

RTK

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

XXIX. évfolyam
2017. 2. szám

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
KATONAI REPÜLŐ INTÉZET
TUDOMÁNYOS KIADVÁNYA

Online kiadás
HU ISSN 1789-770X
Nyomtatott kiadás
HU ISSN 1417-0604

IMPRESSZUM

Szerkesztőbizottság elnöke:
Prof. Dr. Óvári Gyula ny. ezredes, CSc
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service

Szerkesztőbizottság elnökhelyettese:
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service

Főszerkesztő:
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service

Szerkesztő és webszerkesztő:
Dr. Szilvássy László alezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service

Szerkesztőbizottság tagjai és egyben rovatvezetők:
Dr. Kavas László alezredes, PhD (Repülőműszaki)
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD (Üzemeltetés, karbantartás)
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Palik Mátyás ezredes, PhD (Légiközlekedés, légierő alkalmazás)
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Szilvássy László alezredes, PhD (Multidiszciplináris)
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Dunai Pál alezredes, PhD (Hallgatói)
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Bottyán Zsolt százados, PhD (Repülésmeteorológiai)
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Prof. Dr. Makkay Imre ny. ezredes, CSc (Pilótanélküli repülő-eszközök)

A REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK című folyóirat a NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM HADTUDOMÁNYI ÉS HONVÉDTISZTKÉPZŐ KAR KATONAI REPÜLŐ INTÉZET, illetve jogelődjei által alapított folyóiratának jogutódja, a repüléstudomány tematikus kiadványa.

A folyóirat célja lehetőséget teremteni a kutatók, az oktatók, doktori, valamint a mester- és alapképzésben résztvevő hallgatók kutatási eredményeik közzétételére a repüléstudomány-, illetve az ehhez kapcsolódó területeken.

MEGJELENÉS
A kiadvány évente három alkalommal jelenik meg, a megjelenő írások lektoráltak. A közlésre szánt tanulmányokat Repüléstudományi Közlemények honlapján kell regisztrálni és feltölteni http://www.repulestudomany.hu/index_rtk.html. További részletekért látogasson el honlapunkra.

Kiadó:
Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet
Kiadásért felelős: Dr. Palik Mátyás ezredes, PhD
Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.
Levelezési cím: NKE Repüléstudományi Közlemények 5008 Szolnok, Pf.: 1.
Telefon: +36-56-510-535
e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu
HU ISSN 1789-770X (Online)
HU ISSN 1417-0604 (Nyomtatott)

Borítón található fényképet Dr. Toperczer István készítette

TARTALOM

Nagy László
A Magyar Honvédség helikopter-képesség fejlesztés műszaki és üzemben tartási kérdései 7

Schuster György
Szoftver megbízhatóság 31

Sinan Koçak
Fuzzy Logic and its Mechatronics Engineering Applications 41

Bali Tamás
Helikoptervezetők műveleti feladatokra történő képzésnek szövetségesi megközelítése 49

Ványa László
Helikopterek elektronikai hadviselési alkalmazásai a 90-es évekig 65

Kerekes Ferenc Attila, Nyári Péter, Szabó József Zoltán
Gördülési ellenállás összehasonlítására szolgáló tesztberendezés fejlesztése 73

Varga Béla, Kavas László
Gázturbinás hajtóművek égőterei és nyomásveszteségük becslése 85

Nyári Péter, Kerekes Attila, Szabó József Zoltán
Könnyűszerkezetű jármű hátsó futómű optimalizálása 95

Fricke Cathy, Kardos Péter
Neurális hálózatok alkalmazása a látástávolság ultrarövidtávú előrejelzésében 103

Bódi Antal, Szabó Tivadar, Wührl Tibor
Drónok követése közhiteles módon 111

Fehér Krisztina, Óvári Gyula
A mikroalgák felhasználási lehetőségei a biodízel üzemanyagok előállításában 119

Számel Bence Szabó Géza
Forgalom-előrejelző modul fejlesztése szektor-konfiguráció tervező döntéstámogató eszközhöz 137

Bakos Róbertné, Kóródi Márta, Mondok Anita, Szabó Attila
A polgári légijáratok műszaki specifikációjának szerepe az utazási döntésekben 151

Márk Venczel, György Bicsák, Árpád Veress
Coupled Fluid Dynamic and Heat Transfer Analysis of a Small-Sized Research Gas Turbine Combustion Chamber 167

Beneda Károly Tamás, Simon Dávid István
Tengelyteljesítményt adó gázturbinás próbapad fejlesztése 191

Vas Tímea
NDAB (NATO Deployable Airbase) sajátosságai a nemzetközi polgári és katonai szabványok tükrében 211

Tuba Zoltán, Bottyán Zsolt
Analóg és hibrid módszerek alkalmazása a horizontális látástávolság előrejelzésében 229

Papp István
Repülőfedélzeti irányítható rakéták 243

Vránics Dávid Ferenc, Lovas Róbert, Kardos Péter, Bottyán Zsolt, Palik Mátyás
WRF Benchmark Measurements and Cost Comparison. Virtualized Environment Versus Physical Hardware 257

Hollandi Marcell, Kutrovácz Lajos, Simon Sándor
Pilóta nélküli repülőgép gyártása 273

Károly Krisztián, Mikó Gyula
Kis magasságú ballonok honvédelmi alkalmazásának lehetőségei, különös tekintettel a Magyar Honvédség távközlési igényeinek támogatására 293

Foroozan Zare, Árpád Veress
Aerodynamic Redesign and Analysis of a Research Jet Engine - Virtual Proto-typing of Gas Turbine Components 309

Tóth József
A repülő műszaki tisztképzés korszerűsítésének folyamatmodellje 331

Simon Zsolt
Légijármű személyzetek szárazföldi túlélő kiképzése 347

Szaniszló Zsolt
Az ejtőernyő nem működött … a Szojuz-1 katasztrófája 355

Salavec Péter et al.
Repülést veszélyeztető mikroskálájú légköri jelenségek a 2015-ös szegedi planetáris határréteg-mérési adatsorokban **379**

Domján Károly
A légierő számára kialakítható moduláris szimulációs környezet kialakításának lehetőségei, képességek megszerzéséhez,fenntartásához és eljárások tökéletesítéséhez **401**

SZERZŐK – AUTHORS

Bakos Róbertné (MSc) mestertanár Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék bakosne@szolf.hu orcid.org/0000-0002-8890-0710	Bakos, Róbertné (MSc) Master Teacher Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department bakosne@szolf.hu orcid.org/0000-0002-8890-0710
Bali Tamás ezredes Bázisparancsnok helyettes MH 86. Szolnok Helikopter Bázis bali.tamas@hm.gov.hu orcid.org/0000-0001-6098-8602	Col. Tamás Bali Deputy base commander HDF 86th Szolnok Helicopter Base bali.tamas@hm.gov.hu orcid.org/0000-0001-6098-8602
Beneda Károly Tamás (PhD) mérnök-tanár AEROK Repülésműszaki Oktató és Szolgáltató kft. karoly.beneda@aerok.hu orcid.org/0000-0003-1900-7934	Beneda Károly Tamás (PhD) maintenance training engineer AEROK Aviation Technical Training Centre karoly.beneda@aerok.hu orcid.org/0000-0003-1900-7934
Bicsák György (MSc) tanársegéd Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék gybicsak@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-3427-3918	Bicsák György (MSc) Assistant lecturer Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles gybicsak@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-3427-3918
Bódi Antal ITS tanúsítási irodavezető Tanúsítási Igazgatóság KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. bodi.antal@kti.hu orcid.org/0000-0002-6199-8025	Bódi Antal Head of ITS Certification Office Directorate of Transport Systems Certification KTI Institute for Transport Sciences Non Profit Ltd. bodi.antal@kti.hu orcid.org/0000-0002-6199-8025
Dr. Bordás Árpád, PhD középiskolai tanár Bolyai Tehetséggondozó Gimnázium, Zenta, Szerbia bordas.arpad@gmail.com orcid.org/0000-0001-5185-5189	Dr. Bordás Árpád, PhD secondary school lecturer Bolyai High School, Zenta, Serbia bordas.arpad@gmail.com orcid.org/0000-0001-5185-5189
Dr. Bottyán Zsolt, PhD egyetemi docens, tanszékvezető Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék bottyan.zsolt@uni-nke.hu orcid.org/ 0000-0003-0729-2774	Dr. Bottyán Zsolt, PhD Associate Professor, Head of Department National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aerospace Controller and Pilot Training bottyan.zsolt@uni-nke.hu orcid.org/ 0000-0003-0729-2774
Dr. Bozóki Zoltán, PhD egyetemi tanár MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport zbozoki@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-3638-9524	Dr. Bozóki Zoltán, PhD Professor HAS-SZTE Photoacoustic Research Group zbozoki@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-3638-9524

SZERZŐK – AUTHORS

Domján Károly informatikai szakértő domjan.karoly74@gmail.com orcid.org/0000-0002- 0349-0338	Károly Domján IT specialist domjan.karoly74@gmail.com orcid.org/0000-0002- 0349-0338
Fehér Krisztina egyetemi tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék rozovicsne.feher.krisztina@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5057-733X	Fehér Krisztina Assistant lecturer National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine rozovicsne.feher.krisztina@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5057-733X
Fricke Cathy (MSc) hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Meteorológiai Tanszék frcsaat@gmail.com orcid.org/0000-0001-5737-4618	Fricke Cathy (MSc) Student Eötvös Lorand University Faculty of Science Department of Meteorology frcsaat @gmail.com orcid.org/0000-0001-5737-4618
Hollandi Marcell (MSc) Gépészmérnök Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány és Technológia Tanszék hmarcell026@gmail.com orcid.org/0000-0003-1565-0041	Marcell Hollandi (MSc) Mechanical engineer Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical engineer hmarcell026@gmail.com orcid.org/0000-0003-1565-0041
Horváth Gyula szakmai elnökhelyettes Országos Meteorológiai Szolgálat horvath.gy@met.hu orcid.org/0000-0001-5431-1355	Horváth Gyula vice-president Hungarian Meteorological Service horvath.gy@met.hu orcid.org/0000-0001-5431-1355
Dr. Istenes Zoltán, PhD egyetemi docens Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatikai Kar Programozáselmélet és Szoftvertechnológiai Tanszék istenes@inf.elte.hu orcid.org/0000-0002-0169-4791	Dr. Istenes Zoltán, PhD Associate Professor Eötvös Loránd University Faculty of Informatics Department of Software Technology and Methodology istenes@inf.elte.hu orcid.org/0000-0002-0169-4791
Kardos Péter részlegvezető, meteorológus Hungarocontrol Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. Repülőtéri Meteorológiai Részleg Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102	Kardos Péter Head of unit, meteorologist Hungarocontrol Hungarian Air Navigation Services Ltd. Aerodrome Meteorological Unit Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102
Károly Krisztián (MSc) doktorandusz Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola krisztian.karoly@mil.hu orcid.org/0000-0002-5835-7980	Károly Krisztián (MSc) PhD aspirant National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering krisztian.karoly@mil.hu orcid.org/0000-0002-5835-7980

Kavas László (PhD) Egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Sárkány-hajtómű Tanszék kavas.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527	Kavas László (PhD) Associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine kavas.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527
Kerekes Ferenc Attila intézeti mérnök Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet kerekes.attila@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-5103-1742	Kerekes Ferenc Attila institute engineer Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute kerekes.attila@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-5103-1742
Kocak Sinan (BSc) Mechatronika mérnök MSc hallgató Óbuda University Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet Sinankocaak@gmail.com orcid.org/0000-0002-7400-5109	Kocak Sinan (BSc) MSc Student on Mechatronics engineering Óbuda University Faculty of Banki donalt Sinankocaak@gmail.com orcid.org/0000-0002-7400-5109
Dr. Kóródi Márta, PhD főiskolai tanár Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék korodi@szolf.hu orcid.org/0000-0002-7214-3815	Dr. Kóródi, Márta, PhD College Professor Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department korodi@szolf.hu orcid.org/0000-0002-7214-3815
Kutrovácz Lajos mester oktató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és -technológia Tanszék kutrovac@manuf.bme.hu	Lajos Kutrovácz master teacher Budapest University of Technology and Economics Department of Manufacturing Science and Engineering kutrovac@manuf.bme.hu
Lovas Róbert (PhD) tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet robert.lovas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-9409-2855	Lovas Róbert (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control robert.lovas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-9409-2855
Mikó Gyula (MSc) doktorandusz Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola gymiko@gmail.com orcid.org/0000-0002- 2653-7645	Mikó Gyula (MSc) PhD aspirant National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering gymiko@gmail.com orcid.org/0000-0002- 2653-7645
Dr. Mondok Anita PhD főiskolai docens Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék mondoka@szolf.hu orcid.org/0000-0002-6444-970X	Dr. Mondok, Anita PhD College Associate Professor Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department mondoka@szolf.hu orcid.org/0000-0002-6444-970X

Nagy László alezredes törzsfőnök-helyettes MH. 86 Szolnok Helikopter Bázis lesliebig@freemail.hu orcid.org/0000-0002-7831-8639	Lt. Col. László Nagy deputy chief of staff HDF 86th Helicopter Base lesliebig@freemail.hu orcid.org/0000-0002-7831-8639
Nagy Zoltán (MSc), osztályvezető Országos Meteorológiai Szolgálat Megfigyelési Főosztály Adatellenőrzési Osztály nagy.z@met.hu orcid.org/0000-0002-4600-5232	Nagy Zoltán (MSc), Head of Unit Hungarian Meteorological Service Observations Department Unit of Data Verification nagy.z@met.hu orcid.org/0000-0002-4600-5232
Nyári Péter BSc hallgató, OECO csapatvezető Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet nyari.peter@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8437-7117	Nyári Péter BSc student, OECO team leader Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute nyari.peter@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8437-7117
Dr. Óvári Gyula egyetemi tanár Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék ovari.gyula@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-8604-5861	Dr. Óvári Gyula Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine ovari.gyula@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-8604-5861
Palik Mátyás (PhD) intézetigazgató, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet palik.matyas@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2304-372X	Palik Mátyás (PhD) Director of institute, associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation palik.matyas@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2304-372X
Papp István tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Fedélzeti Rendszerek Tanszék pappi@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2929-5864	Papp István Professor's assistant National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of On-Board Systems pappi@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2929-5864
Dr. Joan Cuxart Rodamilans, PhD egyetemi tanár Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica joan.cuxart@uib.cat orcid.org/0000-0002-6217-8045	Dr. Joan Cuxart Rodamilans, PhD Professor Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica joan.cuxart@uib.cat orcid.org/0000-0002-6217-8045

Salavec Péter (MSc) repülésmeteorológus Országos Meteorológiai Szolgálat Előrejelzési Főosztály Repülésmeteorológiai Osztály salavec.p@met.hu orcid.org/0000-0001-5126-192X	Salavec Péter (MSc) aviation meteorologist Hungarian Meteorological Service Department of Forecasting Unit of Aviation Meteorology salavec.p@met.hu orcid.org/0000-0001-5126-192X
Dr. Schuster György (PhD) intézet igazgató Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670	Dr. Schuster György PhD. Director of Institute Instrumentation and Automation Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Óbuda University schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670
Gemma Simó (MSc) PhD hallgató Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica gemma.simo@uib.cat orcid.org/0000-0001-8219-0810	Gemma Simó (MSc) PhD Student Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica gemma.simo@uib.cat orcid.org/0000-0001-8219-0810
Simon Dávid István (BSc) MSc hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék simon.david.istvan@gmail.com orcid.org/ 0000-0001-9159-7233	Simon, Dávid István (BSc) MSc Student Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles simon.david.istvan@gmail.com orcid.org/ 0000-0001-9159-7233
Simon Sándor (MSc) okl. gépészmérnök, repülőgépész Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály Repülőműszaki Felügyeleti Osztály, osztályvezető simon.sandor@hm.gov.hu	Sándor Simon (MSc) mechanical & aeronautical engineer Ministry of Defence State Aviation Division Airworthiness & ATC Department, head of dept. simon.sandor@hm.gov.hu
Simon Zsolt alezredes Repülő felkészítési főnök MH. 86 Szolnok Helikopter Bázis zsoolti@yahoo.com orcid.org/0000-0002-3101-7257	Lt. Col. Zsolt Simon Chief of flight training department HDF 86th Helicopter Base zsoolti@yahoo.com orcid.org/0000-0002-3101-7257
Dr. Szabó Attila PhD főiskolai docens Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék szaboattila@szolf.hu orcid.org/0000-0001-5086-7305	Dr. Szabó, Attila PhD College Associate Professor Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department szaboattila@szolf.hu orcid.org/0000-0001-5086-7305

SZERZŐK – AUTHORS

Dr. Szabó Géza, PhD egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék szabo.geza@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-5956-0868	Dr. Szabó Géza, PhD Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Control for Transportation and Vehicle Systems szabo.geza@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-5956-0868
Dr. Szabó József Zoltán (PhD) intézetigazgató helyettes, egyetemi docens Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-9129-9049	Dr. Szabó József Zoltán (PhD) Deputy Director of Institute, associate professor Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-9129-9049
Szabó Tivadar tanúsítási igazgató, ERTMS szakértő Tanúsítási Igazgatóság NoBo /DeBo KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. szabo.tivadar@kti.hu orcid.org/0000-0003-3759-6605	Szabó Tivadar Director, ERTMS expert Directorate of Transport Systems Certification NoBo / DeBo KTI Institute for Transport Sciences Non Profit Ltd. szabo.tivadar@kti.hu orcid.org/0000-0003-3759-6605
Számel Bence Domonkos (MSc) PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék szamel.bence@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-2844-184X	Számel Bence Domonkos (MSc) PhD student Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Control for Transportation and Vehicle Systems szamel.bence@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-2844-184X
Szaniszló Zsolt okl. mk. őrnagy repülésfelügyeleti (ejtőernyős) főtiszt Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály sunnyboymi24@gmail.com orcid.org/0000-0003-0646-1505	Eng. Maj. Szaniszló Zsolt (MSc) flight supervisor (parachutist) senior officer Ministry of Defence State Aviation Department sunnyboymi24@gmail.com orcid.org/0000-0003-0646-1505
Tordai Ágoston Vilmos BSc hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék tordaiagoston@gmail.com orcid.org/0000-0002-8617-0531	Tordai Ágoston Vilmos BSc student Eötvös Loránd University Department of Meteorology tordaiagoston@gmail.com orcid.org/0000-0002-8617-0531
Dr. Torma Péter, PhD egyetemi adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék torma.peter@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-9282-6931	Dr. Torma Péter, PhD Assistant Professor Budapest University of Technology and Economics Department of Hydraulic and Water Resources Engineering torma.peter@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-9282-6931

Tóth József (MSc, MBA) Gyakorlati oktató, Doktorjelölt Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék toth.jozsef@uni-nke.hu orcid.org/0000-0001-8647-3404	Tóth József (MSc, MBA) Practical instructor, PhD candidate National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine toth.jozsef@uni-nke.hu orcid.org/0000-0001-8647-3404
Tuba Zoltán (MSc) főtiszt Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály tuba.zoltan@hm.gov.hu orcid.org/0000-0002-0345-5292	Tuba Zoltán (MSc) senior officer Ministry of Defence State Aviation Department tuba.zoltan@hm.gov.hu orcid.org/0000-0002-0345-5292
Ványa László (PhD) egyetemi tanár Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Üzemeltető Intézet Elektronikai Hadviselés Tanszék vanya.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0001-5472-7190	Ványa László (PhD) Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Maintenance Department of Electronic Warfare vanya.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0001-5472-7190
Varga Béla (PhD) Egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Sárkány-hajtómű Tanszék varga.bela@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825	Varga Béla (PhD) Associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine varga.bela@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825
Vas Tímea tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék vas.timea@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0082-0370	Vas Tímea Assistant lecturer National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aerospace controller and Pilot Training vas.timea@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0082-0370
Venczel Márk (BSc) MSc. hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem venczelmark@freemail.hu orcid.org/0000-0002-4319-1463	Venczel Márk (BSc) MSc. Student Budapest University of Technology and Economics venczelmark@freemail.hu orcid.org/0000-0002-4319-1463
Dr. Veress Árpád (PhD) docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék averess@vrht.bme.hu orcid.org/ 0000-0002-1983-2494	Dr. Veress Árpád (PhD) Associate professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles averess@vrht.bme.hu orcid.org/ 0000-0002-1983-2494

Vránics Dávid Ferenc (MSc) doktoranduszhallgató, informatikus Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola Biztonságtechnika kutatásterület vranicsd@gmail.com orcid.org/0000-0003-0637-476X	Vránics Dávid Ferenc (MSc) PhD Student, computer scientist National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering Security Technology vranicsd@gmail.com orcid.org/0000-0003-0637-476X
Dr. Weidinger Tamás, PhD egyetemi docens Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék weidi@caesar.elte.hu orcid.org/0000-0001-7500-6579	Dr. Weidinger Tamás, PhD Associate Professor Eötvös Loránd University Department of Meteorology weidi@caesar.elte.hu orcid.org/0000-0001-7500-6579
Prof. Dr. Burkhard Wrenger, DSc oktatási rektorhelyettes, egyetemi tanár Hochscule Ostwestfalen-Lippe burkhard.wrenger@hs-owl.de orcid.org/0000-0003-0196-0698	Prof. Dr. Burkhard Wrenger, DSc Vice-Rector, Professor Hochscule Ostwestfalen-Lippe burkhard.wrenger@hs-owl.de orcid.org/0000-0003-0196-0698
Dr. habil Wührl Tibor Ph.D egyetemi docens, GSM-R szakértő Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Híradástechnika Intézet wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-7522-3511	Dr. habil Wührl Tibor Ph.D associate professor, GSM-R expert Óbuda University Telecommunication Department wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-7522-3511
Zare Foroozan PhD hallgató Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék fzare@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-5486-5881	Zare Foroozan PhD Student Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transporting Engineering and Vehicle Engineering Department of Aeronautical, Naval Architecture and Railway Vehicles fzare@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-5486-5881

Nagy László

A MAGYAR HONVÉDSÉG HELIKOPTER-KÉPESSÉG FEJLESZTÉS MŰSZAKI ÉS ÜZEMBEN TARTÁSI KÉRDÉSEI

A Magyar Honvédség a biztonsági környezet folyamatos romlásával régi – új fenyegetésekkel találja szemben magát, melyeknek meg kell felelnie. Az elmúlt években lezajlott változások, kiemelten a migrációs folyamatok eredményeként, a korábbi expedíciós képességek kialakításáról a hangsúly ismét az ország szuverenitásának védelme irányába helyeződött át. Az elmúlt években a hazai helikopter képesség, köszönhetően a számos nemzetközi szerepvállalásnak, jelentős válságkezelő műveleti tapasztalatot és minimális szinten végrehajtott célirányos eszközfejlesztést/beszerzést jelentett. A korlátozott erőforrások miatt a hagyományos képességek eszköztára javarészt elöregedett, az állomány létszámarányai folyamatosan romlottak. A biztonsági kihívások és a szövetségesi elvárások miatt a nemzeti helikopter-képesség fejlesztése elengedhetetlen. Napjaink döntései az elkövetkezendő 40-50 évre fogják meghatározni a helikopterekkel végrehajtható feladatokat, a hazai „helikopteres kultúrát", ezért a helikopter képesség fejlesztés műszaki és üzemben tartási kérdéseit célszerű már most figyelembe venni és elemezni a későbbi döntések előkészítése érdekében.

***Kulcsszavak**: romló biztonsági környezet, elavult eszközpark, nem megfelelő védelmi képesség, helikopter-képesség fejlesztés, katonai repülés üzemeltetési rendszere*

„Repülőgépről legfeljebb egy virágot tudnak dobni a földön lévő bajbajutottnak, a helikopter viszont életet is menthet"

Igor Sikorsky

BEVEZETÉS

Magyarország a II. világháborút követően egyértelműen és kizárólagosan orosz gyártmányú repülőeszközök rendszerbe állításával oldotta meg a repülőcsapatok részére meghatározott feladatok ellátását. Az üzemeltetési technológia, az ehhez szükséges személyi állomány felkészítése, az infrastruktúra, a logisztikai ellátási rendszer teljes egészében megfelelt a szocialista országokban alkalmazott eljárásoknak, ezáltal biztosítva a korlátozások nélküli együttműködést. A Varsói Szerződés[1] volt tagállamai meglehetősen sokféleképpen kezelték a katonai repülés fejlesztését, a típusváltás kérdését. A skála széles, Lengyelországtól Bulgáriáig egészen más minőségben és megítélésben lehet mérni az elmúlt 25 év eredményeit.

A Szovjetunió vezette kelet-európai országok többségét tömörítő katonai szervezet felbomlása után is a szovjet repülőtechnika határozta meg Európa keleti felének katonai repülését. A repülőeszközök sorsa általában a leállítás lett, a legtöbb repülőgép, helikopter üzemidejét nem hosszabbították meg. A védelmi költségvetések rohamos csökkentésének, illetve a sorozatos, minden országban végrehajtott hadügyi reformoknak, illetve a kelet-európai tagországok gazdasági nehézségeinek következtében meglehetősen lassan zajlott (zajlik) a típusváltás, s van, ahol ez máig

[1] Varsói Szerződés: a közép- és kelet-európai kommunista országok védelmi katonai-politikai szervezete, Varsóban, Lengyelországban alapították meg 1955. május 14-én a Szovjetunió javaslatára, amely a szervezeten belül csaknem az összes hatalmat birtokolta.

várat magára. A lassan végbemenő védelmi beszerzési folyamatoknak érezhetően lendületet adott a 2014-ben kezdődött ukrajnai eseménysorozat, mely az orosz erők fegyveres beavatkozásával járt, valamint a Szíriában zajló események miatt Európa irányába kialakult migráció. A nemzetközi helyzet valóban súlyosbodik – mint ahogyan a kelet-európai országok védelmi beszerzéseinek üteme is felgyorsult köszönhetően a védelmi kiadások fokozatos emelkedésének.

Sajnálatos módon, ha visszatekintünk a hazai helikopterek hadrafoghatósági mutatóinak alakulására az elmúlt negyed évszázadban, a fentiekben említett tünetek szinte mindegyike fellelhető. Ennek következtében egyértelműen kijelenthető, hogy a 24. órában vagyunk, azaz a fejlesztés már nem halasztható tovább. A szükséges döntéseket minél előbb meg kell hozni, hiszen egy esetleges új típus rendszerbe állítása - különösen mire abból hadrafogható, hazai- és nemzetközi környezetben egyaránt bevethető alegységek jönnek létre - évekbe telhet. A Magyar Honvédség helikopter-képességének megtartása érdekében jelenleg 4 db Mi-17 szállítóhelikopter ipari nagyjavítása van folyamatban. Képesség fejlesztésről viszont csak abban az esetben beszélhetünk, ha az elkövetkezendő években új, a napjaink kihívásainak megfelelő helikopterek kerülnek beszerzésre. Annak érdekében, hogy hazánk számára minden tekintetben a legmegfelelőbb légi járművek legyenek rendszerbe állítva, fontos tisztázni, hogy melyek azok a paraméterek, amelyek együttes figyelembevételével, komplex vizsgálatával érhető el a kívánt célkitűzés.

A helikopter-képesség

A kifejezéssel az elmúlt években számos alkalommal találkozhattunk, amely egyre inkább beépült a napjainkban alkalmazott szakterminológiába. Egyik megközelítésben „a helikopter-képességet a következő elemek összessége alkotja: a rendszeresített repülőeszközök, a felkészült, kiképzett személyi állomány, valamint az a szervezeti keret, amelyben a haditechnikát üzemeltetik, alkalmazzák.” [9]

A műszaki- és üzemben tartási kérdések vizsgálata előtt fontosnak tartom tisztázni, hogy „helikopter-képesség” alatt a helikopterek üzemeltetésének (mint például: harcászati-, műszaki paraméterek, üzemeltetési stratégia, üzemeltető állomány) komplex rendszerét értem, melynek hatékony alkalmazásával biztosítható a haza védelme és a szövetségesi feladatok eredményes végrehajtása békében és válság kezelő műveletekben egyaránt.

A helikopter-képesség szükségessége

A forgószárnyas-képesség szükségességét egyértelműen meghatározza Magyarország Nemzeti Katonai Stratégiája.[2] A stratégiában megfogalmazott feladatok végrehajtása, úgymint Magyarország függetlenségének, területének, légterének, lakosságának és anyagi javainak külső támadással szembeni fegyveres védelme, közreműködés a természeti és ipari katasztrófák elhárításában, azok következményeinek felszámolásában, a humanitárius válságok kezelésében, a Szent Korona őrzése és védelme (kimenekítése), a polgári légi járművek fegyverként történő alkalmazásának megakadályozása, a helikopterek alkalmazása nélkül nem lehetséges.

Mindezt csak erősíti, ha áttekintjük a Magyar Honvédség alkalmazásának jellemzőit. Hazánk fegyveres erejének alkalmazására – a békeidőszaki feladatokon túl – jellemzően válságkezelő

[2] Kihirdetve a 1656/2012. (XII. 20.) Korm. határozattal, közzétéve a Magyar Közlöny 2012. december 20-án megjelent 175. számában.

műveletekben kerül sor, sok esetben Magyarországtól jelentős távolságra, szélsőséges természeti és éghajlati viszonyok között, nehezen megközelíthető terepen, sok esetben lakott és beépített területeken ahol csupán korlátozott mértékben vagy egyáltalán nem áll rendelkezésre befogadó nemzeti támogatás. Szárazföldi műveletekre van szükség, ahol a kis létszámú, rugalmasan alkalmazható jól képzett katonákból álló egységek jelentősége megnőtt, melyek légi oltalmazása és légi szállítása kiemelt fontosságú.

A fenti feladatok hosszú távú biztosítása érdekében nem csak repülőtechnikákat kell ipari nagyjavítás alá vetni, vagy beszerezni, hanem a Magyar Honvédség bázisán felállítandó, helikopter képességet is szükséges a kor színvonalának megfelelő szinten megteremteni, majd fenntartani. Ez magában foglalja a technikai eszközöket, a kiképzést úgy hajózó, mint repülőműszaki vonalon, az üzemeltetési stratégiát, a logisztikai támogatást és a szükséges infrastrukturális beruházásokat. Ennek eredményeként egy, a XXI. század kihívásainak megfelelni tudó, modern helikopterekből álló képességet kapunk, mely hosszú távon, gazdaságosan üzemeltethető és egyaránt alkalmas nemzeti- és nemzetközi feladatok ellátására.

A helikopterek feladatrendszere

A katonai szervezetnek rendelkeznie kell minimum 70, de átlagosan 80%-os üzemképességi mutatóval (NATO standard, AFS Volume III.) [2], valamint képesnek kell lenni magyarországi 1 fő- és 1 előretolt bázisról feladatai végrehajtására nappal és éjjel (éjjellátó „NVG” alkalmazásával), egyszerű és bonyolult időjárási viszonyok között.

Az üzemeltetett eszközöknek korszerű navigációs, kommunikációs, illetve aktív önvédelmi (radar és lézer besugárzásjelző, rakétaindítás-jelző, automatikus zavarótöltet kilövő) rendszerekkel kell rendelkezniük. Ezen követelmények nem új keletűek a NATO tagállamokban. Gyakorlatilag mindezen tulajdonságok összessége teszik lehetővé a hazai- és a nemzetközi műveletekben való alkalmazhatóságot.

A helikopterek az egyedi tulajdonságaiknak köszönhetően szerteágazó polgári és katonai elvárásoknak képesek megfelelni, melynek köszönhetően alkalmasak komplex feladatrendszerek biztosítására/teljesítésére. Mindezeket figyelembe véve a helikopter-képességgel szemben az alábbi feladatokban való részvétel igényét lehet megfogalmazni:

- ország védelmi és szövetségesi;
- katasztrófavédelmi;
- kiemelt védelmi;
- nemzetgazdasági.

A felsorolt feladatrendszerből is megállapítható, hogy a helikopter-képességre nem csak a Magyar Honvédségnek van szüksége. Ez sokkal szélesebb körben értelmezendő problémakör, amelyre meg kell találni a hazánk számára legmegfelelőbb megoldást. A hadrafoghatósági mutatókat és a fenti feladatokat figyelembe véve joggal merül fel a kérdés. Mi is a helyes irány? A meglévő helikoptereket egy modernizálással egybekötve ipari nagyjavítás alá vetni, vagy azokat lecserélni és egy új, a kor kihívásainak megfelelő helikopter-képességet kialakítani.

Lehetséges irányok áttekintése

Az előző fejezetben részletesen vizsgáltam a helikopter-képességgel szemben megfogalmazott feladatrendszert. Ennek végrehajtásához első lépésként meg kell határozni a szükséges géplétszámot típusonként (harci, szállító, kiképző/könnyű). Fel kell mérni mindazon gazdasági- és pénzügyi lehetőségeket, amelyek a képesség fejlesztés szempontjából elérhetők, majd előzetes piackutatás segítségével meg kell határozni, hogy hány darab repülőeszköz beszerzése lehetséges és ez a mennyiség elegendő-e a kitűzött feladatok megoldására.

A védelmi képesség fenntartása mellett, a gazdasági lehetőségek összeegyeztetésével ki kell választani a pótlás számításba jöhető legcélszerűbb módozatát, amely:

- hazánkban rendszeresített helikopterek felújítása, vagy;
- ezek felújítása modernizálással;
- más géptípus bérlése (lízingje);
- repülőeszközök gyártása, vagy;
- vásárlása lehet.

Amennyiben megvizsgáljuk a szóba jöhető változatokat, a hazai helikopter-képesség hosszútávó biztosíthatósága érdekében csak az új eszközök beszerzése jelenthet megoldást. A következő részben ennek az elvnek megfelelően vizsgálom az üzemben tartási kérdéseket.

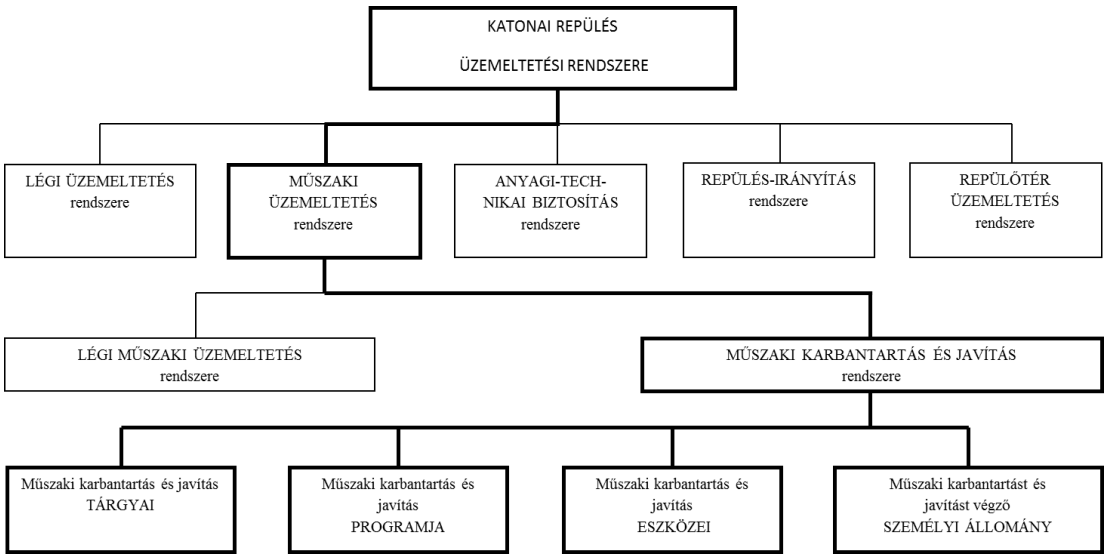
A KATONAI REPÜLÉS ÜZEMELTETÉSI RENDSZERE

Bármilyen szempontok érvényesüljenek is a fegyverzetváltásnál (képesség kialakításnál), mindez eredményre csak akkor vezethet, ha rendszereket vizsgálunk. Jelenleg adott a magyar katonai repülés meglévő üzemeltetési eljárás rendje, a már meglévő személyi állománnyal, repülőeszközeivel, infrastruktúrájával, tartozékaival, amelyhez illeszkednie kell az új repülőeszközök üzemeltetési stratégiájának. Ezen belül csak egy – noha meghatározó fontosságú – elem a kiválasztott repülőeszköz, mint az üzemeltetés tárgya, melynek harcászati-technikai lehetőségeit csak a rendszer, az alrendszerek és azok elemeinek tökéletes illeszkedése és kapcsolódása esetén lehet maximálisan kihasználni.

Az üzemeltetés a repülőeszközök létezési formáinak összessége, minden olyan tevékenységet beleértve, melyeket ebben a létezési formában végeznek az előállítást követően. [4] Ezen tevékenységek a következők: rendeltetésszerű használat, tárolás, szállítás, előkészítés, karbantartás, javítás és az ezen tevékenységek bármelyikére történő várakozás. A repülőeszközök létezési formáit üzemeltetési állapotnak, az ezen belül adott feltételek melletti tartózkodásukat pedig üzemmódnak nevezzük. Az üzemeltetési rendszer egymástól jól elkülönülő – szervezetileg is különálló – önálló funkcionális alrendszerekre bontható, melyek kölcsönös függőségét és hierarchikus egymásra épülését az 1. ábra mutatja be.

A katonai repülés üzemeltetési rendszerének elemei csak kölcsönhatásukban vizsgálhatók, amely azt vonja maga után, hogy a legkorszerűbb repülőeszköz sem működtethető hatékonyan elavult program szerint, korszerűtlen kiszolgáló eszközökkel és infrastruktúrával, valamint nem megfelelően képzett és strukturált személyi állománnyal. Mindez azt jelenti, hogy a rendszer bármely elemében történjen is lényeges minőségi és/vagy mennyiségi változás, az kihat a kap-

csolódó elemekre és szükségessé teszi azok átalakítását, ismételt összehangolását, optimalizálását. A korábbiakban már kifejtettem és indokoltam a helikopter-képesség megőrzésének és fejlesztésének jelentőségét. Szintén fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy a 4 db Mi-17 ipari nagyjavítása mellett, hosszú távon napjaink kihívásainak megfelelő képességekkel bíró helikopterek beszerzése jelenthet megoldást. Ennek megfelelően a hazai helikopterek üzemeltetési rendszerében jelentős változtatásokat kell bevezetni és alkalmazni annak érdekében, hogy a kialakított képességet a leghatékonyabb módon tudjuk alkalmazni a honvédelmi feladatok és a nemzeti érdekű feladatok végrehajtása során. Természetesen azzal számolni kell, hogy az átmeneti időszakban kettős üzemeltetési rendszert kell alkalmazni, hiszen a kifutóban lévő orosz helikopterek mellett meg fognak jelenni új, a korábbi típus üzemeltetésétől jelentősen eltérő repülő eszközök. Ennek a problémának a kezelésére a későbbiekben még ki fogok térni.



ábra A katonai repülés üzemeltetési rendszere [4]

A katonai repülőeszköz, mint harcászati-műszaki rendszer

A katonai repülés üzemeltetési rendszerében a repülőeszköz, a műszaki karbantartás és javítás tárgyaként, mint egy elem került elhelyezésre és meghatározásra. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy a repülőeszköz önmagában is egy bonyolult haditechnikai rendszer, hiszen harcászati, műszaki, gazdaságossági tulajdonságok komplexumával jellemezhető. Ennek megfelelően csak olyan elem alkalmazható a katonai repülés üzemeltetési rendszerében, melynek tulajdonságai és jellemzői a kitűzött céloknak és feladatoknak megfelelően a hierarchikus rendszerbe beilleszthetők.

A 2. ábra logikai rendszere is azt támasztja alá, hogy egy új típus kiválasztása, a kapcsolódó üzemeltetetési rendszer követelményeinek és műszaki biztosítási koncepciójának kidolgozása csak a szükségesség, feladat, valamint alkalmazási kör meghatározását követően lehetséges. Ezért tartottam fontosnak külön vizsgálni a helikopter képességgel szemben megfogalmazott igényeket, hiszen a felsorolt feladatrendszernek való megfelelés biztosítja számunkra a végcél elérését. Olyan új helikopterekre van szükség, amelyek potenciális harci eredményessége teljes mértékben biztosítja a meghatározott feladatok maradéktalan végrehajtását optimális gazdasági mutatók mellett.

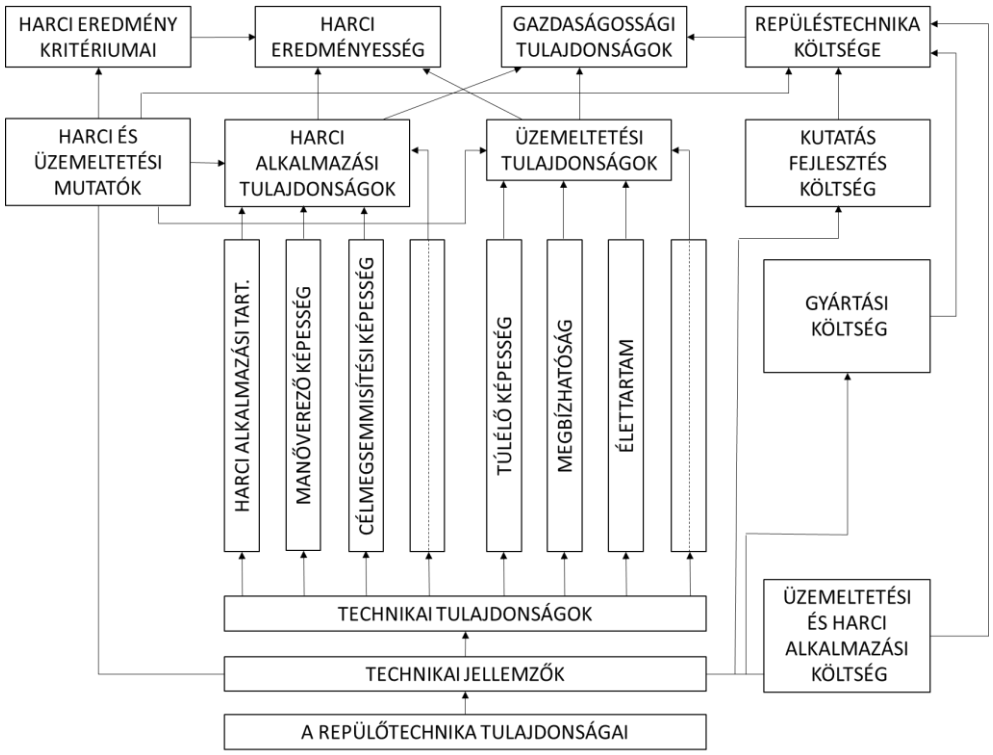
Összességében a harci alkalmazás tartalmának, alkalmazási feltételeinek, tulajdonságainak, illetve eredményességi kritériumainak tisztázását követően, a gazdaságossági mutatók és lehetőségek függvényében kereshetőek azok a műszaki jellemzők, üzemeltetési tulajdonságok, melyek alapján meghatározható a számunkra legkedvezőbb tulajdonságokkal bíró helikopter kategória és/vagy típus(ok).

A helikopterek kiválasztása során alkalmazható szempontok

Az előző fejezetekben bemutattam, hogy a repülő eszköz egy komplex rendszert alkot már önmagában is, és mint a műszaki karbantartás és javítás tárgya illeszthető be a katonai repülés üzemeltetési rendszerébe. A legmegfelelőbb kiválasztása az olyan komplex haditechnikai eszközöknek, mint a légi járművek, egy több szempontú döntési folyamat végeredményeként születik meg. Ennek érdekében nagyon fontos részletesen meghatározni azokat a képességeket, amelyeket el szeretnénk érni, és azokat a feladatokat, amelyeket végre kell hajtani.

Az egyik legkiemeltebb kérdés, melyet tisztázni kell, hogy milyen helikopterekre van szükség (futár/kiképző, szállító, harci, speciális feladatra kialakított) és meg kell határozni a feladatok függvényében a szükséges géplétszámot.

Már ebben az időszakban vizsgálni és elemezni kell a szóba jöhető helikopterek illeszthetőségét a jelenleg meglévő katonai repülés üzemeltetési rendszerébe. Ugyancsak fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy országunk teherbíró képessége nagymértékben meghatározza a lehetséges géplétszámot, ezért ez a korlátozó tényező mindenképpen minőségi feltöltést indokol.



2. ábra A repülőtechnika tulajdonságai [4]

A 2. ábrából egyértelműen kiolvasható, hogy a technikai tulajdonságok határozzák meg egy repülő eszköz potenciális harci eredményességét és gazdaságossági tulajdonságait, melyek természetesen együttesen mutatják meg, hogy a megfogalmazott feladatok ellátására az adott paraméterekkel rendelkező eszköz mennyire felel meg és végeredményként számunkra az elfogadható, vagy sem.

A fentieket figyelembe véve elengedhetetlen a kiinduló „alapadatok", az úgynevezett harcászati- műszaki követelmény rendszer alapos és átgondolt elkészítése és a beszerzési eljáráshoz kapcsolódóan lehetőség szerint ennek értékelése, illetve tulajdonság-vizsgálatának elvégzése, az erre kiválasztott több szempontú döntéselmélet gyakorlati alkalmazásával.

A döntési feladatok megoldásakor az értékelési szempontok fontossági sorrendjének pontos meghatározása, a szempontrendszer kialakítása folyamatában pedig, az ezekhez tartozó konzisztencia definiálása az egyik legfontosabb és legnehezebb feladat. Egy reális adatértékeléshez a súlyozási lépések végrehajtása is szükségszerű, hiszen csak így alakítható ki a lehető legjobb döntési alternatíva mellett a lehetséges választások rangsora is, még akkor is, ha a stratégiai kérdésekkel összefüggésben felmerülhetnek politikai szempontok is.

„A fegyverzet váltás nem árubeszerzést, eszközvásárlást jelent, hanem egy képességnek való megfeleltetést, ami hosszú távú befektetést igényel, hiszen az így rendelkezésünkre álló „termék" teljes élettartama folyamán üzemeltetését, üzemfenntartását (fenntartását) biztosítani kell [5].

A legfontosabb technikai tulajdonságok (harcászati- műszaki követelmény rendszer)

E a fejezetben a különböző rendeltetésű helikoptereket (harci, szállító) leginkább jellemző követelményeket kívánom szétválasztani. Nem tisztem, és nem is feladatom megadni a választ arra a kérdésre, hogy hazánknak szüksége van-e rendeltetés szerint harci-, szállító- és esetleg külön futár/kiképző helikopterekre. Egy biztosan megállapítható, hogy ma a világon nem készítenek olyan helikoptert, amely minden feladatnak maximálisan eleget tudna tenni. Kompromisszumokat lehet kötni, amennyiben gazdaságossági (vagy egyéb) megfontolások alapján felfegyverzett könnyű, többfeladatú helikopter kerül előtérbe, de ez a kategória nem felel meg sem a szállító, sem a harci helikopterrel szemben támasztott követelményeknek. Ezt a tényt a beszerzési eljárás során nem lehet figyelmen kívül hagyni, és ha másképp nem is, a harcászati-műszaki követelmények meghatározása során, a súlyszámoknak tükrözniük kell egy ilyen elhatározást. A legkedvezőbb megoldás mégis az, ha a követelmények meghatározásánál külön választjuk az egyes típusokat.

A beszerzési eljárás során az egyik legfontosabb feladat a harcászati-műszaki követelmények, valamint a súlyozás (prioritás) meghatározása. A kidolgozásra célszerű több csoportot létrehozni, de legalább kettőt. Az egyik csoport meghatározza a harcászati követelményeket, míg a másik a műszaki és az üzembentartási követelményekre koncentrál, majd az ellentmondások elkerülése végett egy közös egyeztetéssel véglegesen meghatározhatók az egyes súlyszámok.

Mind a harcászati, mind pedig a műszaki ismérvek tekintetében a legfontosabb az arányosság és a súlyozás. Az arányosság alatt azt értem, hogy a túlságosan sok szempontú elemzés túl bonyolíthatja a döntés előkészítést és végeredményképpen megfogalmazhatunk olyan összetett (túl részletezett) igényeket, amelyekre nem fogunk találni alkalmas repülőeszközt. A súlyozás

pedig azért fontos, mivel az igények megfogalmazása során egyértelmű sorrendet kell felállítani és a feladatok függvényében a meghatározó ismérveket kell előtérbe helyezni.

Egy korszerű harci helikopter harcászati ismérvei

- manőverező képesség (légi harc megvívásának képessége ellenséges harci helikopterrel, szükség szerint önvédelemből merev szárnyú harci repülőgéppel is);
- fegyverzeti és avionikai felszereltség;
- aktív és passzív önvédelemre alkalmasság.

A manőverező képesség jellemzői:

- repülési sebesség (földközelben) előre, hátra, oldal irányba;
- emelkedési, süllyedési sebesség;
- repülési magasság;
- maximális bedöntési tartományok;
- fordulási sugarak;
- túlterhelési tartományok;
- hatótávolság (légi utántöltés lehetősége) stb.

Fegyverzet és avionika jellemzői:

- alkalmazott fegyverek (gépágyú, irányított, nem irányított rakéták) és azok variációi;
- javadalmazások, tűzgyorsaság, hatótávolság;
- újra fegyverzés ideje;
- célzó komplexum (cél megjelölés, távolság mérés, közös rendszer a navigációs rendszerrel);
- bombavetés lehetősége stb.

Aktív és passzív önvédelem jellemzői:

- alacsony felderíthetőség;
- magas harci túlélőképesség;
- tűz-és robbanásvédelem;
- ABV védelem;
- környezeti viszonyoktól nagymértékben független üzemeltethetőség;
- lezuhanás, durva ütközés, kényszerleszállás esetén a személyzet számára magas túlélési valószínűség;
- egységes kommunikációs rendszerek alkalmazása a szövetséges és hazai szárazföldi- és légvédelmi erőkkel;
- idegen- barát felismerő rendszer stb. [16]

Egy korszerű szállító helikopter harcászati ismérvei

- szállító kapacitás;
- fegyverzeti és avionikai felszereltség;
- aktív és passzív önvédelemre alkalmasság.

A szállító kapacitás jellemzői:

- maximális belső terhelhetőség;
  - szállítható személyek száma (teljes felszerelésben);
  - max. sebesültek száma;

- max. teher súlya, mérete;

- maximális külső terhelhetőség;
- csörlő maximális terhelhetősége;
- repülési magasság;
- függési magasság párnahatással és anélkül;
- hatótávolság (légi utántöltés lehetősége) stb.

Fegyverzet és avionika jellemzői:

- alkalmazott (önvédelmi) fegyverek;
- javadalmazások, tűzgyorsaság, hatótávolság;
- újra fegyverzés ideje;
- célzó komplexum (cél megjelölés, távolság mérés, közös rendszer a navigációs rendszerrel), stb.

Aktív és passzív önvédelem jellemzői:

- alacsony felderíthetőség;
- magas túlélőképesség;
- tűz-és robbanásvédelem;
- ABV védelem;
- környezeti viszonyoktól nagymértékben független üzemeltethetőség;
- lezuhanás, durva ütközés, kényszerleszállás esetén a személyzet (és az utasok) számára magas túlélési valószínűség;
- egységes kommunikációs rendszerek alkalmazása a szövetséges és hazai szárazföldi- és légvédelmi erőkkel;
- idegen- barát felismerő rendszer, stb.

Egy korszerű helikopter műszaki ismérvei

A továbbiakban a műszaki ismérveket együttesen vizsgálom a harci- és a szállítóhelikopterekre vonatkozólag.

Műszaki paraméterek:

- a helikopter üzemideje (javításközi, összműszaki és/vagy naptári üzemidő);
- a hajtóművek és fődarabok üzemideje;
- garancia időtartama;
- megbízhatóság, vész- és tartalékrendszerek megléte és működtethetősége;
- üzemeltetési korlátozások (leszállás szám, túlterhelés, a futóművek túlterhelése);
- alkalmazott szerkezeti anyagok, technológiák, kenőanyagok;
- a szerkezeti elemek csereszabatossága, egy adott eszközön belül és az adott termékcsaládon belül;
- külső és belső felületeken alkalmazott jelek, jelzések, jelölések és feliratok alkalmazása, nyelvezete, megjelenítési formái, lehetőségei[3].

Üzemeltetési, javítási paraméterek:

- alkalmazott üzemeltetési technológia;

[3] NATO STANAG szabályozza, illetve az NKH által megfogalmazott előírásoknak és követelményeknek is meg kell felelni;

- üzemeltethetőség;
- technologizáltság;
- diagnosztizálhatóság;
- javíthatóság;
- rendszeresen elvégzendő műszaki munkák gyakorisága, eszköz és humánerőforrás igénye;
  - „O”[4] szintű munkák aránya az „I”[5] és „D”[6] szintű műszaki munkákhoz viszonyítva;
  - műszaki állomány alapképzettségi szintje;
  - üzembentartó alegység szervezeti felépítése;
  - egy repült óra kiszolgálási igénye [fő óra/rep. óra];
- műszaki állapot meghatározásához rendelkezésre álló módszerek;
- adatrögzítő eszköz jellemzői (kinyerhető paraméterek száma, a kiolvasáshoz szükséges speciális eszköz);
- egy meghibásodásra jutó repült idő;
- meghibásodások gyakorisága;
- üzemanyag, levegő, oxigén és egyéb töltőcsatlakozók elektromos energiarendszer külső csatlakozóinak kompatibilitása a meglévő rendszerekkel;
- javítóanyag és alkatrészellátás megbízhatósága;
- javító eszközök szabványa (metrikus/angolszász rendszer);
- földi kiszolgáló eszközök és ellenőrző berendezések igénye;
- az üzemeltetés klimatikus feltételei (min. és max. külső hőmérséklet, páratartalom stb.);
- szélsőséges időjárási viszonyok közötti üzemeltetés feltételei;
- könnyű, gyors szerelhetőség, emberbarát technológia.

Egy korszerű helikopter élettartam költség ismérvei

A megfelelő hatékonyság elérése érdekében kiemelten fontos az üzemeltetés közvetlen és közvetett költségeinek elemzését végrehajtani, melyek a következők:

- beszerzési költség (repülőgép, földi kiszolgáló eszközök, fegyverrendszerek, szerszámok, műszaki dokumentációk, kiképzést támogató eszközök);
- közvetlen üzemeltetési költség;
- óránkénti üzemanyag fogyasztás;
- 1 repült órára jutó költségek (munkaerő, anyagi ráfordítás);
- közvetett (üzembentartási, javítási) költségek;
  - csere berendezések, javító anyagok, csapat- és ipari nagyjavítás költségei;
  - „O” szintű munkák költsége az „I” és „D” szintű műszaki munkákhoz viszonyítva;
- infrastrukturális költség;
- az állomány kiképzési költsége (amennyiben a vásárlási összeg nem tartalmazza);
- logisztikai és informatikai biztosítás költségei;
- repülőtéri infrastruktúra költsége.

[4] Operational „O” level: A helikopter közvetlen kiszolgálásához köthető műszaki munkák összessége, megfelel az úgynevezett „pirosvonal” kiszolgálási rendszernek;

[5] Intermediate „I” level: A kiszolgálás során a repülő-műszaki alegységnél lévő települő javítókapacitás (hangár, javítóközpont) alkalmazásával végrehajtható műszaki munkák összessége;

[6] Depo „D” level: Gyári illetve ipari kapacitást igénylő műszaki munkák összessége;

A helikopterek kiválasztása során alkalmazható módszerek

A műszaki eszközök, gépek összetett rendszerek, melyek a technológia fejlődésével egyre komplexebbé válnak. A haditechnikai eszközök beszerzése során a megfelelő döntés meghozatala érdekében egzakt, mérhető, számszerű adatokra van szükség, hiszen ezek teszik lehetővé az objektivitást. Természetesen mindezek mellett jelentős szerepet töltenek be a beszerzéssel és az üzemeltetéssel kapcsolatos költségek, hiszen a hatékonyság elérése érdekében már a paramétereket is vizsgálni kell, de nem szabad, hogy ezek legyenek az elsődlegesek. A szakirodalmak [6], ebben a témában kidolgozott értekezések [5][7]áttekintése során megállapítottam, hogy a komplex rendszerek összehasonlítására több módszer is rendelkezésre áll.

Az eljárások kezdetén az értékelési tényezőket kell meghatározni, amelyek megfelelnek a helikopterekkel szemben támasztott harcászati-műszaki és élettartam költség ismérveknek, követelményeknek. Ezeket az ismérveket természetesen csoportosítani szükséges, hiszen a harcászati követelményeket nehezen lehetne súlyozni a műszakiakkal, vagy esetleg az élettartam költségekkel és ezek egymásra gyakorolt közvetlen hatása sem értelmezhető.

Minden eljárás tartalmaz kötöttségeket és szempontokat, amelyeket nem lehet figyelmen kívül hagyni. Ezek a következők [8]:

1. meg kell állapítani a komplex rendszer domináns vetületét, vagy vetületeit (harcászati, műszaki, élettartam stb.);
2. az adott vetületen a tényezők megválasztásában az alábbi kötöttségeket kell szem előtt tartanunk:
   - a választott vetületeken belül valamennyi lényeges paramétert fel kell venni;
   - ezek teljes mértékben nem zárhatják ki egymást;
   - egymástól kölcsönösen függetlenek (a gyakorlatban nehezen megvalósítható, ezért fontos a megalapozott szakmai döntés);
   - diszkrétek legyenek. (nem fedhetik át egymást fogalmi terjedelmükben);
3. megválasztásuknál élesen definiálni kell minden fontos tényezőt;
4. egyszerűség illetve összetettség szempontjából lehetőleg azonos szintűek legyenek.

Ezt követően végre kell hajtani a vetületeken belüli technikai jellemzők súlyozását. Az eljárás megválasztására nincs egységes kiválasztási kritérium. A legelfogadottabb, az egyszerű közvetlen becslés, ahol több döntéshozó esetén egy egyszerű számtani átlagot számítunk az egyének közvetlen becsléséből. Előfordulhat az is, hogy a döntéshozók becsléseit nem azonos súllyal vesszük figyelembe az átlag számításánál, hanem az összegzést (átlagolást) a különböző súlyszámoknak megfelelően hajtjuk végre. Amint látható, ez az eljárás végtelenül egyszerű, de tisztában kell lenni azzal, hogy nem hibátlan. A közvetlen becslés módszere korrekció nélkül csak igen kis valószínűséggel szolgáltatja a „valódi” súlyszámokat.

A Churchman-Ackoff eljárás - mint módszeres becslés – mindenképpen pontosabb az egyszerű becslésnél, de bonyolultabban használható, ráadásul ezt általában akkor lehet jól alkalmazni, ha egyetlen döntéshozó súlyoz.

A szakirodalmak [11][12] elméleti és gyakorlati szempontból is a Guilford-féle eljárást ajánlják, amely több döntéshozó esetében kiválóan alkalmazható, de fontos kitétel, hogy a döntés-

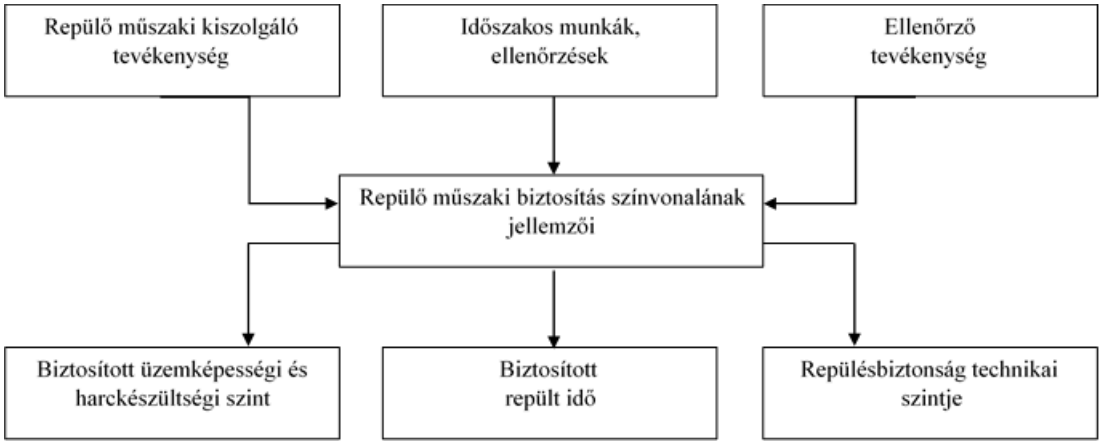
hozók között ne legyen teljes egyetértés. A csoport tagjainak számára vonatkozólag nincs elméleti megkötés, gyakorlatilag minimum 5 fő bevonása ajánlott. Ez az eljárás a páros összehasonlításra épül, ezért egy-egy területen belül az értékelési tényezőket célszerű 15 alatt tartani.

Az értékelési szempontok súlyozását követően végre lehet hajtani az értékelést és a különböző haditechnikai eszközök összehasonlítását. Az értékelésre is több módszert ajánl a szakirodalom [7]. Ilyen lehet a Kesselring módszer, amely alapvetően gépipari termékek összemérésére született, de komplex rendszerek esetében is jól alkalmazható. Az Analytic Hierarchy Process (AHP) módszer szintén jól alkalmazható az értékelés végrehajtására. Ebben az esetben a döntési probléma az áttekinthetőség érdekében egy többszintű fastruktúraként jeleníthető meg, amelynek legfelső szintje a cél, az alatta lévő szinteken a szempontok, az alszempontok, stb., a legalsó szinten pedig az alternatívák helyezkednek el.

A fenti példával kívántam bemutatni, hogy egy alapos előkészítő munkával (harcászati-, műszaki- és költségvetési ismérvek összeállítása), majd egy célszerűen megválasztott matematikai eljárással nagymértékben elő lehet segíteni a döntéshozók munkáját a beszerzési eljárás során.

A műszaki karbantartást és javítást végző személyi állomány

A repülőtechnikán valamennyi munkafolyamatot jogszabályokban rögzített előírásoknak megfelelően, speciálisan erre a feladatra kiképzett személyi állomány hajtja végre. E tevékenység során a szakszemélyzet rendszeres, előírásoknak megfelelő kiszolgáló- és ellenőrző tevékenységek, valamint időszakos javítások és ellenőrzések sorozatával biztosítja a kívánt üzemképességi, harckészültségi és repülésbiztonsági szintet, valamint a kiképzéshez, hadműveleti feladatok ellátásához szükséges repült időt. [4]



3. ábra A repülőműszaki biztosítás színvonalának jellemzői [4]

Bármilyen repülésről is legyen szó a repülésbiztonságot követően a hatékonyságot kell szem előtt tartani, hiszen önmagában a repülés mindig is nagy költségeket igényelt és igényel, ezért a repülőműszaki állomány tevékenységének célja, a repülőeszköz tulajdonságai közül a technikai feltételekkel biztosítható hatékonysági jellemzők maximumának fenntartása a legalacsonyabb munka- és anyagi ráfordítás mellett. Ezért az üzemeltetési technológiától függetlenül, a műszaki állomány kiemelkedő felkészültsége, szakmai elhivatottsága alapfeltétele egy hatékony, gazdaságos repülés kiszolgálásnak, a biztonság szem előtt tartása mellett.

A helikopterek üzembe állításakor (’60-as évek) – köszönhetően a kiemelkedő színvonalú szakmai képzésnek - nem jelentett problémát az új repüléskultúrára felkészíteni azt a műszaki állományt, akik a későbbiekben hosszú évekre meghatározó szereplői voltak egy eredményes üzemeltetési technológia fenntartásának. Az orosz gyártmányú helikopterekre meghatározott szigorú üzembentartási előírások betartása és betartatása jellemezte a mindenkori repülőműszaki állományt. Ennek érdekében egy következetes szakképzést követően igen nagy hangsúlyt fektettek a szakmai fejlődésre és a szakismeret megtartására. Az osztályba soroló vizsgák biztosították, hogy a műszaki kiszolgálás ne váljon sablonossá, hiszen ezeken nem csak a gyakorlati, hanem az elméleti szaktudásról is számot kellett adni. A rendelkezésre álló repülőtechnikák üzemeltetése[7] és üzembentartása[8] során kiemelten fontos volt az egyes rendszerek működésének a teljes körű ismerete. A hiba behatárolása és javítása ezen ismeretek nélkül nem volt lehetséges. Természetesen a szakmai tapasztalat nagymértékben segítette a minden napi munkát, de az elméleti szakismeret szintén elengedhetetlen volt.

Sajnálatos módon, az elmúlt években történt változások eredményeként elsősorban a repülőműszaki oktatói és elöljárói állomány létszáma csökkent jelentős mértékben. Természetesen azt mindenki elfogadta, hogy a nagymértékű fegyverrendszer kivonásoknak, a repülőcsapatok megszüntetésének és összevonásának eredményeként csökkent a szükséges repülőműszaki állomány létszáma. Ez az oktatási rendszerben jól nyomon követhető volt, hiszen a repülőműszaki mérnök képzés az egykori önálló főiskola többszöri átalakítását követően, jelenleg a Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Katonai Repülő Intézeten belül, míg az altiszti állomány felkészítése a MH Altiszti Akadémia, Repülő Altiszti Oktatási Osztályon valósul meg. Szerencsére - az oktatók létszámának jelentős mértékű csökkenése ellenére - az oktatás színvonala lényegesen nem változott. Ami viszont sajnálatos tény, hogy a szakmai órák száma jelentős mértékben lecsökkent, úgy a tiszti, mint az altiszti hallgatók tekintetében. Mindezt csak úgy lehet kompenzálni, hogy a frissen avatott tisztek és altisztek szakmai ismeretének bővítésére a katonai szervezeteknek kell nagyobb hangsúlyt fektetni. Ezt a felkészítést a jelenleg alkalmazott üzemeltetetési technológia elősegíti, hiszen a hiba feltárás és annak elhárítása elsősorban a személyi állomány szakmai, gyakorlati felkészültségét veszi igénybe. Ennek a kiforrott üzemeltetési tapasztalatnak köszönhetően a pályakezdő állomány szakmai felkészítése alapvetően biztosított, habár a korábbi évekhez képest több időt vesz igénybe.

Az elmúlt években többször felmerült a kérdés, hogy szükségünk van-e repülőműszaki képzésre. Egyes érvek szerint elsősorban vezetőkre van szükség és a speciális szakismeretekkel rendelkező állományt a civil életből felvéve, átképzéseket követően kiválóan tudjuk alkalmazni. A Gripen üzemeltetés elmúlt 10 éve jól példázza, hogy az új típusú technikai eszközök is igénylik az alapos szakmai ismeretek meglétét, nem beszélve a kötött üzemidejű orosz repülőtechnikák által megkövetelt szigorú technológia fegyelemről. Ezt csak abban az esetben biztosítható, ha a kezdetektől fogva – ismerve a végcélt – egy tematikus tananyag segítségével, megfelelő tanóra szám biztosítása mellett készítjük fel a jövő repülőműszaki állományát.

[7] Üzemeltetés: a repülő eszköz létezési formáinak összessége, minden olyan tevékenységet beleértve, amelyet ebben a létezési formában végeznek az előállítást követően az eszközzel (azaz a repülő eszköz rendszereivel, berendezéseivel a gyártás és a kiselejtezés között történtek összessége) [13][14].

[8] Üzembentartás: az üzemeltetett (használt, alkalmazott) haditechnikai eszközök üzemképes állapotban tartására és adott feladatra, alkalmazhatóságának növelésére irányuló tevékenységek összessége, Hadtudományi lexikon;

Az oktatási rendszerben tapasztalható nehézségekhez képest sokkal nagyobb problémát jelenthet a szakmai irányítást végző repülőműszaki állomány létszáma. Jelenleg a Magyar Honvédség stratégiai szintjén (Honvéd Vezérkar Logisztikai Csoportfőnökség, mint a légi járművek fenntartója) 4 fő foglalkozik repülőműszaki kérdésekkel, míg az MH hadműveleti szintjén (MH Összhaderőnemi Parancsnokság, Üzembentartási és Ellátási Főnökség, mint a légi járművek üzembentartója) 3 fő lát el hasonló feladatokat. Egy új fegyverrendszer bevezetése igen összetett feladat, mely folyamatos irányítást és felügyeletet igényel, – elsősorban az üzembentartó szintjén - hiszen egy alapos előkészítő munka ellenére is felmerülhetnek a kezdeti fázisban olyan előre nem látott feladatok, amelyekre azonnal reagálni kell. Nem beszélve azokról az elöljárói intézkedésekről, szabályozókról, amelyeket ki kell dolgozni az adott fegyverrendszer hazai viszonyok közötti üzemeltetése érdekében. Mindezen feladatok tervezésére szervezésére – mint vezető – a HVK Logisztikai Csoportfőnökség kiemelt logisztikai főtisztjét lehet kijelölni.

A JAS-39 Gripen harcászati repülőgép rendszerbe állításakor (2006.) még működött a MH Repülőműszaki Szolgálat Főnöksége, valamint a MH Légierő Parancsnokság, Logisztikai Főnökség, Repülőműszaki Részlege. Ezen két szervezeti elem elkötelezett repülőműszaki állományának köszönhetően egy IV. generációs harcászati repülőgép üzemeltetési stratégiáját eredményesen lehetett integrálni a hazai rendszerbe. A fentiek alapján a jelenlegi repülőműszaki állományra, különösen a vezetőre jelentős feladat fog hárulni a beszerzés megindításától egészen a rendszerbe állítás befejezéséig.

Egy új helikopter típus hazai rendszerbe történő beillesztése esetén kérdésként merülhet fel, hogy a rendelkezésre álló repülőműszaki állomány milyen felkészültséggel rendelkezik, annak érdekében, hogy lehetőség szerint az átállás minél eredményesebben megtörténhessen.

Az elmúlt időszakban tapasztalható tendenciák – a rendelkezésre álló géplétszám, hadrafoghatósági mutatók – ellenére, az elkötelezett parancsnoki munkának (az alegység parancsnokoktól a bázis parancsnokig) és a tervezett személyügyi tevékenységnek köszönhetően az MH 86. Szolnok Helikopter Bázis repülőműszaki állománya jó alapot biztosít egy új típus rendszeresítésére. A Repülőműszaki zászlóalj repülőműszaki szakállományának jelenlegi feltöltöttsége 85 %-os, amely a Magyar Honvédség egyes katonai szervezeteinek alegységeihez, de akár a MH 86. Szolnok Helikopter Bázis alegységeihez viszonyítva is kifejezetten jónak mondható. A kiképzettséget jól jellemzi, hogy az állomány 5%-a felsőfokú, 41%- középfokú, 36%-a alapfokú angol nyelvvizsgával rendelkezik és mindössze csak 18%-a vár beiskolázásra, de az ő felkészítésük is tervezett. Mindezek mellett az érintettek több alkalommal műszaki angol nyelvtanfolyamon vettek részt. Ez azért is nagyon fontos, mert új típus beszerzése esetén, a teljes dokumentáció angol nyelven lesz elérhető.

A szakmai felkészültséget leginkább az alábbi táblázatokban feltüntetett adatok jellemzik.

	mester fokozat	I. osztály	II. osztály	III. osztály	fokozat nélküli
SH szakág	15	--	--	2	--
RTB szakág	5	1	--	--	--
EMO szakág	5	--	--	--	1
FE szakág	3	1	--	1	1
KLGS GK szakág	1	--	--	--	--

1. táblázat A tiszti állomány osztályos fokozatai, forrás: MH 86. SZHB adatbázis 2017.03.13.

	mester fokozat	I. osztály	II. osztály	III. osztály	fokozat nélküli
SH szakág	43	6	5	4	3
RTB szakág	7	1	1	--	1
EMO szakág	17	1	--	3	5
FE szakág	11	2	--	1	--
KLGS GK szakág	6	6	3	2	4

2. táblázat Az altiszti állomány osztályos fokozatai, forrás: MH 86. SZHB adatbázis 2017.03.13.

A fenti táblázatok alapján egyértelműen megállapítható, hogy az állomány jelentős része kimagasló (mester fokozat) szakmai felkészültséggel rendelkezik, amely első sorban a következetes felkészülésnek a rendszeres számon kérésnek és az elhivatottságnak köszönhető. Az éves repülésbiztonsági konferenciák alkalmával mindig kiemelésre kerül, hogy a repülőműszaki állomány által elkövetett technológiai fegyelemsértés miatt repülőesemény nem következett be.

Összességében kijelenthető, hogy a helikopter képesség fejlesztéséhez szükséges, szakmailag jól felkészült repülőműszaki tisztek és altisztek rendelkezésre állnak. Ezzel szemben a szakmai irányítások szintjén (HM HVK[9], MH ÖHP[10]) a rendelkezésre álló szakállomány létszámát nem tartom elegendőnek. Az átmeneti időszakban jelentkező kettős üzemeltetési rendszer irányítására, továbbá az új típushoz kötődő okmányrendszerek kidolgozására és átdolgozására, valamint a hatékony elöljárói ellenőrzések eredményes végrehajtására a korábban már említett repülőműszaki létszám nem elegendő. Mindezek mellett szükségesnek tartom a tiszti és az altiszti hallgatók szakmai képzéséhez kötődő programok áttekintését és átdolgozását annak érdekében, hogy szakmailag jól felkészített repülőműszaki állomány álljon rendelkezésre. Ugyanilyen fontosnak tartom a már megkezdett nyelvi felkészítés folytatását, egyre inkább előtérbe helyezve a műszaki szaknyelv oktatását.

A műszaki karbantartás és javítás programja

A műszaki karbantartás és javítás programja alatt mindazon tevékenységek összességét értjük, amelyek magukba foglalják a repülőeszköz üzemeltetéséhez, üzembentartásához és annak irányításához, felügyeletéhez és ellenőrzéséhez köthető munkafolyamatokat. Ezek összességét üzemeltetési stratégiának nevezzük. Ez az előírásrendszer teszi lehetővé a műszaki üzemeltetés folyamatának és ezen keresztül a repülőeszköz, mint az üzemeltetés tárgya üzemállapot-változási folyamatának olyan irányítását, amelyben üzemképessége[11], megbízhatósága, repülési biztonsága és harckészsége (harcképesség)[12] az előírt szinten marad.

Minden rendszeresített repülőeszköz különböző alkatrészeit, berendezéseit, szerkezeti elemeit és ezáltal magát a repülőeszközt is az alábbiakban felsorolt módszerek valamelyikével lehet üzemeltetni:

- üzemeltetés a meghibásodások bekövetkezéséig;
- kötött üzemidő (hard time) szerint;

[9] HM HVK: Honvédelmi Minisztérium Honvéd Vezérkar;

[10] MH ÖHP: Magyar Honvédség Összhaderőnemi Parancsnokság;

[11] Üzemképes: az olyan repülőeszköz, melynek műszaki és repüléstechnikai adatai, műszaki üzemidő tartalékai megfelelnek az előírt normáknak, kijavították az összes meghibásodást, az adott típusra érvényes technológia szerint végrehajtották az érvényes munkákat és a soron következő előkészítéseket.

[12] Harckész: az olyan üzemképes repülőeszköz, amely fel van töltve a kitűzött harcfeladat végrehajtásához szükséges fegyverzeti eszközökkel és más anyagokkal, valamint végrehajtották a felszállásra történő előkészítést.

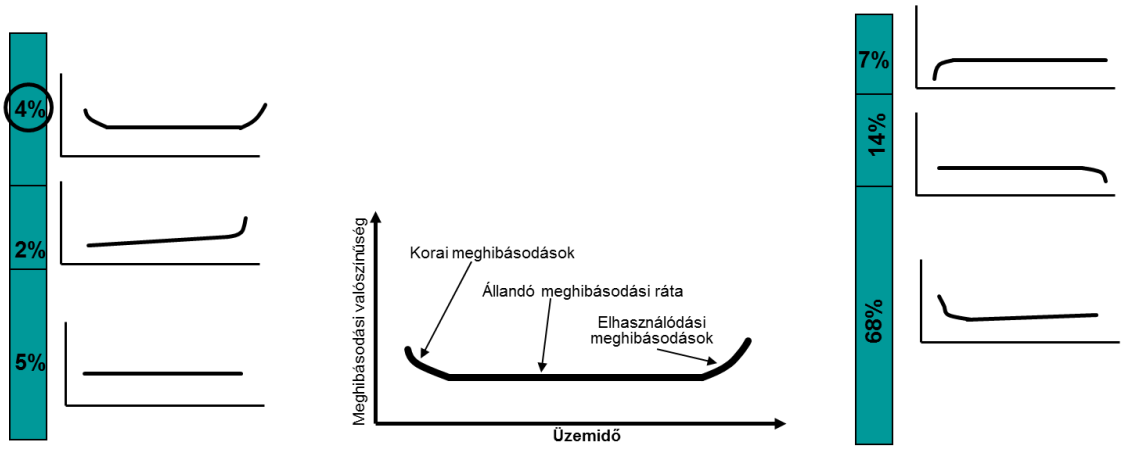
- megbízhatósági szint (condition monitoring) szerint;
- műszaki állapot (on condition) szerint, melynek az ellenőrzéséhez szükséges műszaki jellemzők folyamatosan és/vagy szakaszosan mérhetők.

A konkrét üzemeltetési módszer kiválasztása az üzemeltetési rendszer fejlettségének, technologizáltságának, az üzemeltetők felkészültségének (személyi és tárgyi), valamint az adott repülőeszköz korszerűségének függvénye.

A jelenlegi, hazai üzemeltetési rendszer

A hazai helikopterek üzemeltetése kötött üzemidő szerint, egy tervszerű megelőző karbantartás alapján történik, amelynek eszköz, javító- és karbantartóanyag, valamint humánerőforrás igénye jelentős, ezáltal igen költséges. Ennél az üzemeltetési módszernél nem vizsgáljuk, hogy az adott berendezés, alkatrész, kenőanyag esetleg biztosítja-e az előírt paramétereket, visszaépíthető-e, azaz rendelkezik-e az előírt műszaki követelményekkel. Az előírt üzemidő (repült idő, ciklus és/vagy naptári idő) ledolgozását követően a szigorúan meghatározott technológiának (üzemeltetési stratégiának) megfelelően hajtjuk végre az esedékes műszaki munkákat.

Az egyes alkatrészek üzemidejének meghatározása nem könnyű feladat, mint ahogyan azt a 4. ábra is mutatja. Statisztikailag igazolt, hogy az azonos alkatrészek csak mintegy 4%-a mutat teljesen hasonló meghibásodásokat, a maradék 96% pedig jelentősen eltér.



4. ábra A meghibásodások jellege [15]

Mindezt figyelembe véve – a repülésbiztonság magas szinten tartása érdekében – az egyes alkatrészekre megadott üzemidő jelentős tartalékokkal bírhat, de a technológiai előírások miatt ezeket az alkatrészeket a ledolgozott üzemidőt követően kicseréljük. Ennek köszönhetően az alábbi nehézségekkel kell szembe nézni:

- a repülő eszközök repüléshez történő előkészítése, az időszakos és javítási munkák mennyisége megnövekszik;
- a korlátozott üzemidőkkel rendelkező („kiemelt”) berendezések nagy száma;
- feleslegesen nagy állásidők, a repülőgépek javítása során;
- a tényleges üzemeltetési feltételektől függően, igen nagy elvesztegetett üzemidő tartalékok maradnak az egyes, illetőleg az azonos típusú, különböző modifikációjú repülőgépekben;

- a nem megfelelő üzemképességi szint nem csak a „kiemelt” berendezések esetleges hiánya miatt lehetséges, hanem a repülőgép rendszereiből, ellenőrzésre ki- és beépített berendezések szerelési munkálatai jelentősen megnövelik a meghibásodások valószínűségét;
- repülőtechnika fejlődésével, modernizációjával az üzemeltetési költségek rohamosan és aránytalanul megnövekednek.

A fentiekben említett nehézségek a jelenlegi feltételek mellett hatványozottan érezhetők. A nem megfelelő alkatrészellátás miatt évekkel ezelőtt megkezdődött a „műszaki kannibalizmus”, amely jelentősen megnövelte a javításokra fordított költségeket és nagymértékben megnövelte az egyes berendezések meghibásodási valószínűségét, a felesleges megbontások miatt. A tervszerű megelőző karbantartás, mint üzemeltetési módszer további hátránya a jelentős humán erőforrás igény. Egy repülés kiszolgálásához bázis repülőtéren 9 fő repülőműszaki szakember összehangolt munkájára van szükség, ellenben egy modernebb repülő eszközzel, ahol ezt a munkát általában 2 fő látja el. Az időszakos ellenőrzések, fődarab cserék, kalibrálások végrehajtása érdekében egy igen nagyszámú javító állományt kell fenntartani. Megállapítható, hogy a hazánkban jelenleg rendszeresített orosz gyártmányú helikopterek üzemeltetési módszere elavult, csak jelentős költségráfordítások mellett biztosítható a hadrafoghatóságuk. Még egy modernizált változat esetén is meg kell fontolni, hogy ilyen formában célszerű e a XXI. században helikoptereket működtetni, hiszen a tervszerű megelőző karbantartás hátrányait továbbra sem tudnánk kiküszöbölni a gyártó előírásai miatt.

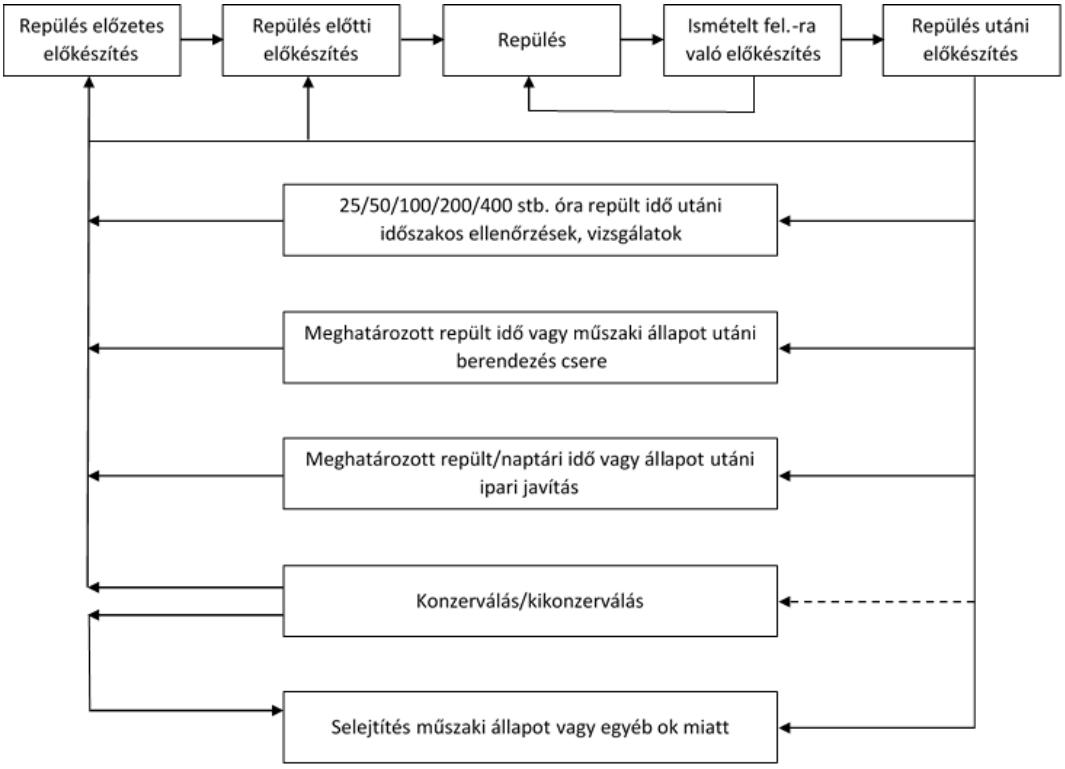
Korszerű helikoptereknél alkalmazott üzemeltetési eljárások

Az üzemeltetés során a repülőműszaki állomány az 5. ábrán bemutatott munkafolyamatokat hajtja végre az üzemeltetési stratégiától függetlenül. Az üzemeltetési stratégia az ellenőrzések tartalma, mélysége és periodicitása alapján tesz különbséget az egyes géptípusok között. Ezek azok a folyamatok, amelyekkel egy repülőeszköz üzemeltetési hatékonyságát alapvetően lehet befolyásolni.

A műszaki ismérvek azonosítása során, fontos szempontként jelöltem meg a helikopterek üzemeltethetőségét, ezen belül is a technologizáltságot, a diagnosztizálhatóságot és a javíthatóságot. A technologizáltság a helikopter azon tulajdonságainak összessége, amelyek lehetővé teszik, hogy a műszaki karbantartási és javítási munkák valamennyi fajtája a leggazdaságosabb technológiai eljárások alkalmazásával legyen elvégezhető. Gazdaságossági, hadrafoghatósági és repülésbiztonsági szempontból hasonlóan fontos jellemző a diagnosztizálhatóság, mely az üzemeltetés tárgya (repülő eszköz) azon tulajdonságainak összessége, amelyek lehetővé teszik az egyes műszaki paraméterek megfelelő pontossággal történő mérése esetén az üzemállapot egyértelmű meghatározását. Végül, a helikopterek azon tulajdonságát, hogy működőképességük helyreállítható, – vagyis meghibásodásaiknak, sérüléseiknek keletkezési okai megelőzhetők és feltárhatók, valamint következményeik javítással és műszaki karbantartással elháríthatók – javíthatóságnak nevezzük.

Ezen tulajdonságok (diagnosztizálhatóság, javíthatóság) kialakítása döntően a tervezés és a gyártás folyamán történik, amelyekre a megfelelően meghatározott üzemeltetési rendszer és stratégia is hatást gyakorol. Úgy a gyártónak, mint az üzembentartó szervezetnek az a célja, hogy a helikopter a mai kor követelményeinek megfelelően a lehető legnagyobb hatékonysággal legyen alkalmazható, ezért a helikopterek összehasonlítása során nagy jelentőséget kell tulajdonítani a meghatározó jelentőségű műszaki ismérveknek.

A nyugati és orosz eredetű légi járműveken az 50-es évek kezdetétől – számos egybeesés mellett – jól megfigyelhető a helyenként eltérő tervezői koncepció, valamint a technikai fejlettségben mutatkozó eltérés. A különbség azonban még markánsabban jelentkezett/jelentkezik az alkalmazott üzemeltetési stratégiák, illetve eljárások területén a nyugat javára. Ennek egyik meghatározó oka lehetett, hogy kiemelt fontosságúnak tekintették a gazdaságosság/hatékonyság optimális viszonyának kialakítását. Az üzemeltetés elméleti és gyakorlati kutatásainak központja az USA volt.



5. ábra A repülőműszaki biztosítás folyamata [4]

A gyakorlati tapasztalatok azt mutatták, hogy azonos típusú és azonos üzemidőt ledolgozott repülőeszközök esetében is, a különböző üzemeltetési és üzembentartási tényezők miatt, a vizsgált repülőeszközök jelentősen különböző technikai állapotban voltak. Ebből kiindulva, új megközelítések, és módszerek alapján kellett megállapítani az időszakos és javítási munkák mélységét, mennyiségét és periodicitását is. Egy ilyen új és jövőbemutató módszer a ténylegesen állapotszerinti üzemeltetés.

Az állapotszerinti üzemeltetés lényege, hogy a repülőtechnika funkcionális rendszerei elemeinek üzemeltetése üzemidők meghatározása nélkül történik úgy, hogy a rendszereket alkotó elemekben, berendezésekben rejlő üzemidő tartalékokat, a lehetőségeket is figyelembe véve, teljesen kinyerjük. Ez azt jelenti, hogy a gyártó – az üzembentartók, üzemeltetők tapasztalatai alapján is – konkrét üzemidőket nem határoz meg, csak – mint számítási alap – életciklus-üzemidőben gondolkodik [13]. Mindebből következően, a hagyományos értelemben vett helyreállító és nagyjavító munkálatok nem kötött ciklusok szerint történnek. Gyakorlatilag, az állapotszerinti üzemeltetés keretében, a technikai kiszolgálás és az időszakos vizsga során eddig kötelezően elvégzett munkák többségét ma már csak szükség esetén kell elvégezni, a repülőtechnika sárkány szerkezetének, rendszereinek és berendezéseinek ellenőrzését követően.

Az állapotszerinti üzemeltetés lehetséges stratégiái:

- a rendszerek és elemei, berendezései paramétereinek ellenőrzése;
- a rendszerek és elemei, berendezései megbízhatósági szintjének ellenőrzése.

A rendszerek és elemei, berendezései műszaki jellemzőinek ellenőrzése

Ebben az esetben, a korábban megadott, vagy az időszakos vizsgák során elvégzett mérések eredményei alapján meghatározott értékeket, összehasonlítják az előírt periodicitással végrehajtott ellenőrzések eredményeivel. Az elemzések alapján meghatározható a rendszer elemeinek állapota, és előre jelezhető a repülőeszköz és rendszereinek, a következő ellenőrzésig történő működőképessége is. Abban az esetben, ha a mért paraméterek értékei megközelítik a határértékeket – azaz a repülőeszköz adott rendszere meghibásodás előtt van – akkor szabályzás szükséges, vagy ki kell cserélni a nem megfelelően működő elemet, alkatrészt. Ez azt jelenti, hogy a munkálatokat kötelező végrehajtani a berendezések meghibásodás közeli állapotában.

A rendszer alapvetően a mérési eredmények alapján, azaz a repülőeszköz technikai állapota szerint határoz a további üzemeltethetőségről, cseréről, vagy javíthatóságról, így ez egy *„meghibásodást közvetlenül megelőző állapotszerinti üzemeltetési elv”*.

A rendszerek és elemei, berendezései megbízhatósági szintjének ellenőrzése

Ebben az esetben a rendszert, vagy elemeit, a repülés biztonságát még nem veszélyeztető meghibásodásig üzemeltetjük, majd döntést kell hozni a további működtetéséről, vagy a berendezés kiselejtezéséről. A rendszerek és berendezések üzemképességét a fedélzeti adatrögzítők és ellenőrző-berendezések adatai (on-board), valamint a földi mérő- és adatkiértékelő eszközök információi alapján (on-ground) döntjük el. Az utóbbi méréseket, vizsgálatokat a repülőtechnika operatív előkészítései, illetőleg a soros technikai kiszolgálások során hajtjuk végre.

Ez a módszer csak akkor lehet igazán sikeres, ha a repülőtechnika, vagy rendszerei leggyakoribb sérülései, vagy meghibásodásai a helyes tervezés következtében nem veszélyeztetik a repülés biztonságát jelentős mértékben. Azaz a légi jármű egyik elemének (berendezésének) nem megfelelő működése nem okvetlenül kell, hogy előidézzen egy teljes leállást, és/vagy meghibásodást.

Ezen kívül olyan ellenőrző és visszajelző berendezésekkel kell felszerelni a repülőeszközöket, amelyek minden olyan meghibásodást, vagy változást jeleznek, amelyek előbb, vagy utóbb a fő- és tartalékrendszer egyidejű meghibásodásához vezethet. Ez a módszer egy *„meghibásodásig történő üzemeltetési elv”*.

Természetesen a fentiekben vázolt két technikai kiszolgálási és javítási stratégia nem zárhatja ki, hogy bizonyos fedélzeti rendszerek egyes elemeit, berendezéseit, melyek nincsenek megkettőzve (tartalékuk, helyettesítőjük nincs), tényleges technikai állapotuk nehezen értékelhető, de közvetlen ráhatásuk van a repülés biztonságára, üzemidő-stratégia szerint üzemeltessük. Az üzemeltetési és javítás stratégia keretében, az üzemidejüket ledolgozott elemek, berendezések cseréje terv szerint, a technikai kiszolgálások, vagy helyreállító javítások idején történik, a repülőszerkezet állapotfelmérése után.

Amint látható, a korszerű helikopterek esetében már kifejezetten csak állapotszerinti üzemeltetést alkalmazunk. Egy ilyen „felhasználóbarát” rendszerre történő átállás nem jelenthet különösebb gondot a repülőműszaki állománynak, hiszen az alkalmazott módszerek nagymértékben segítik

munkájukat, viszont speciális felkészítést igényel. A helikopter közvetlen kiszolgálásához köthető műszaki munkák végrehajtása során, - amely megfelel az úgynevezett „piros vonal”-i kiszolgálásnak - megszűnnek a klasszikus szakági struktúrákra (Sárkány-hajtómű, Rádiótechnikai és lokátor berendezések, Elektromos, Műszer és Oxigén berendezések, Fegyver rendszerek) specializálódott szakemberek igénye. Ezek helyett olyan jól felkészült technikusokra van szükség, akik képesek a teljes sárkány-hajtómű és avionikai rendszerek átfogó 'O'-, korlátokkal 'I'-level szintű üzemeltetésére. Ennek érdekében a jelenlegi képzési rendszert ismételten át kell tekinteni és törekedni kell a minél alaposabb szakmai felkészítésre mind a tiszti és altiszti állomány tekintetében.

Annak ellenére, hogy a Magyar Honvédségben a JAS-39 Gripennek köszönhetően már alkalmazzuk az állapotszerinti üzemeltetést, a korszerű helikopterek megjelenése miatt várhatóan szükségessé válik az alap dokumentumok teljeskörű aktualizálása. Remélhetőleg ez hamarabb bekövetkezik, mint a Gripenek esetében. 2006 óta rendelkezünk IV. generációs harcászati repülőgépekkel és a repülőműszakiak „bibliáját” (Utasítás a repülőcsapatok mérnök-műszaki szolgálata részére, Re/664) csak 2015-ben módosítottuk az új üzemeltetési technológiának megfelelően.

Egy megfontoltan felépített üzemeltetési stratégia és a megfelelő mélységben kidolgozott dokumentációk, szabályozók mellett kiemelt fontossággal bír a hatékony karbantartó- és javítóanyag ellátás megszervezése. Annak ellenére, hogy jelenleg a logisztikai ellátás központosítása zajlik, a Magyar Honvédségen belül kialakításra tervezett egy 10 000 m^2 alapterületű Központi Raktár, a helikopter alkatrészek esetében a több lépcsős ellátási rendszert (központi raktár, majd alakulat raktár) nem tartom szerencsésnek, mivel az állapotszerinti üzemeltetés nagyfokú rugalmasságot igényel az ellátás területén is. Ebben az esetben csak minimális szinten lehet előre tervezni a szükséges alkatrész igényt, hiszen az egységek, berendezések állapota határozza meg a csere időpontját. Az ellátás tekintetében az a legszerencsésebb, ha a megrendelt alkatrész közvetlenül az alakulathoz érkezik meg, ott kerül bevételezésre és azonnal kiadásra a javító állománynak, ezáltal lerövidítve a szállítási időt és elősegítve a javítás, karbantartás hatékonyságát. Ennek érdekében az alakulatnál ki kell alakítani egy minden igényt kielégítő, megfelelő alapterületű és informatikai hátérrel felszerelt raktárt, ahol megtörténhet a szükséges karbantartó anyagok és a tapasztalati adatok alapján kialakított minimális javító készletek tárolása. Természetesen a központi nyilvántartás biztosítása érdekében az információ áramlás elengedhetetlen. Ezt a folyamatot nagymértékben elősegítheti az Alap Logisztikai Alkalmazás Projekt (ALAP[13]), amelynek célja az eszközök és készletek tárca szinten integrált és naprakész nyilvántartása, a központi tároló helyi nyilvántartás biztosítása, az eszköz és a meglévő szakági szigetszerű nyilvántartó rendszerek valamint az IK32 programok kiváltása, továbbá a szükséges vezetői információk biztosítása. A projektet tervezetten 2018-ban vezetik be.

Összességében megállapítható, hogy napjainkban gazdaságos és hatékony üzemeltetésről csak akkor beszélhetünk, ha olyan helikoptereket szerzünk be, amelyek - a kor színvonalán - állapotszerinti üzemeltethetőek.

[13] ALAP: A 78/2015 HM KÁT- HVKF együttes intézkedésben elrendeltek szerint, a kijelölt HM/MH szakmai szervezetek együttműködésével megvalósuló, jelenleg is folyamatban lévő feladat.

A műszaki üzemeltetés és karbantartás eszközei és objektumai

Azt gondolhatnánk, hogy egy jól kiválasztott helikopter típussal/típusokkal, jól felkészített hajózó- és műszaki állománnyal, valamint egy jól megválasztott üzemeltetési stratégiával sikeresen kialakítottunk egy megfelelő alapokra helyezett helikopter képességet. Az üzemeltetéshez szükséges berendezésekre, szerszámokra és a kiszolgáláshoz szükséges infrastruktúrára is hangsúlyt kell fektetni, mivel ezek az eszközök és objektumok ugyan olyan fontos részei a komplex rendszernek, mint az üzemeltetés és karbantartás tárgya, személyi állománya és annak programja. Egy rendszer alkalmazhatóságát a leggyengébb láncszem, a legszűkebb keresztmetszet határozza meg, ezért már a helikopterek kiválasztása során megfelelő súlyozással figyelembe kell venni ezeket a szempontokat is.

A műszaki üzemeltetés és karbantartás eszközei

Az üzemeltetéshez, üzemben tartáshoz szükséges szerszámok, berendezések, speciális eszközök tekintetében jó helyzetben vagyunk, hiszen többnyire a gyártó cég ezen eszközök szállítását beépíti az ajánlattételbe és együtt kezeli a megvásárlásra felajánlott helikopterekkel, vagy ajánlásokat fogalmaz meg a lehetséges beszerzési változatokra. A nyugati repülőeszközök esetében igen gyakori az angolszász szabvány, amely azt jelenti, hogy a teljes szerszám- és ellenőrző berendezés készletet le kell cserélni, amely jelentős mértékben megnövelhetik a költségeket. A rendszer üzemeltetéséhez szükséges, de a gyár által nem biztosított - ajánlásként szereplő - eszközök megvásárlása előtt célszerű felvenni a kapcsolatot olyan bázisokkal, ahol a beszerzésre tervezett helikoptereket már régebb óta üzemeltetik és az ottani tapasztalatok felhasználásával javasolt kiválasztani a számunkra legkedvezőbb változatokat.

A műszaki üzemeltetés és karbantartás objektumai

Minden új beszerzésű repülőtechnika rendszerbe állítása az üzemeltetés közvetlen költségein kívül jelentős közvetett kiadásokat is szükségessé tesz. Ezek sorába tartozhatnak a tárolásra, javításra szolgáló épületek, az állóhelyek, a guruló utak, a felszállópálya, a repülésirányítási és fénytechnikai eszközök. Ezeket a szempontokat ugyanúgy mérlegelni kell a beszerzés során, mint az előzőekben már bemutatott jellemzőket (harcászati, műszaki, gazdaságossági adatokat), hiszen az infrastrukturális kiadások jelentős költségeket tehetnek ki. Erre szintén jó példa a JAS-39 Gripen rendszerbe állításához kötődő – az elmúlt 10 évben felmerült - infrastrukturális igények sorozata, amelyek jelentős része a beszerzéskor nem került beazonosításra. Szerencsére ezeket az okmányokat csak elő kell venni és az abban foglaltak figyelembevételével („mankóként") kell kialakítani az igényeket, természetesen a szolnoki helikopter bázis sajátosságait szem előtt tartva.

A beszerzési eljárás során az infrastrukturális beruházások tekintetében az alábbi szempontok figyelembe vételére teszek javaslatot:

- a repülőtér fizikai- és technikai őrzésvédelmi rendszere (kerítés, beléptető kapuk, kamera rendszer stb.);
- felszálló mező, guruló utak, állóhelyek minősége;

- navigációs, leszállító és hírközlő berendezések (VOR[14], ILS[15], DME[16], NDB[17] berendezések);
- fénytechnikai rendszerek;
- javító hangár, műhely szükséglet;
- a javítás, karbantartás feltételei (próbapadok, speciális eszközök);
- a helikopter tárolására vonatkozó előírások (hangár, fedezék, szabad ég alatt állóhelyen);
- titkosító berendezések miatti kötöttségek (fizikai védelem előírásai);
- fegyverrendszer bevizsgálására szolgáló helyiség kialakítása/átalakítása (Egyesített Műszaki Állomás);
- kiképzést támogató eszközök, berendezések (szimulátor) elhelyezésére vonatkozó követelmények;
- kiszolgáló eszközök tárolásához szükséges létesítmények (tűzoltó szertár);
- javító készletek, fődarabok tárolásához szükséges létesítmények.

A légi járművek gazdaságos és hatékony üzemeltetése egy igen komplex rendszeren keresztül valósulhat meg, amelyben maga a légi jármű, már önmagában is egy bonyolult alrendszert alkot. Ahhoz, hogy egy ilyen „képességet" kialakítsunk, átfogó elemzésre van szükség, fel kell tárni a szűk keresztmetszeteket és lehetőségként minimalizálni kell a plusz kiadásokat. A katonai repülés üzemeltetése és ezen belül annak tárgya (légi jármű), a repülőműszaki állomány, az üzemeltetési program és a szükséges eszközök és objektumok csak abban az esetben biztosítják a kívánt célok elérését, ha a képesség kialakításakor teljes mértékben vizsgáljuk azokat a szempontokat, amelyek döntő fontossággal bírnak. Ebben a fejezetben arra törekedtem, hogy a legfontosabb kérdéseket megfogalmazzam, amelyekre a beszerzési eljárás során kiemelt figyelmet kell fordítani.

ÖSSZEFOGLALÁS

Elemezve a katonai repülés üzemeltetési rendszerét, a hazai helikopter képesség hatékonyságának és gazdaságosságának javítása érdekében az alábbi javaslatokat fogalmaztam meg:

- számításba kell venni, a lehetséges helikopter kategóriákat (szállító, harci, könnyű helikopter);
- el kell dönteni, hogy az új típust (típusokat) lízing, vagy vásárlás keretében tervezzük beszerezni;
- minimum 4-5 db Mi-17 szállító helikopter ipari nagyjavítását végre kell hajtani;
- a beszerzést megelőzően – a megfelelően alkalmazott matematikai módszerrel - el kell végezni a gyártók által ajánlott helikopterek komplex összehasonlítását;
- törekedni kell a meglévő repülő műszaki szakállomány megtartására;
- folytatni kell az idegennyelvi képzést, kiemelten annak szakmai tartalmát;
- a szakmai képzéshez (tiszt, altiszt képzés) kötődő programokat felül kell vizsgálni;
- meg kell erősíteni a fenntartásért (HM VKF) és az üzemben tartásért (MH ÖHP) felelős elöljáró szervezetek szakállományát;

[14] VOR: VHF Omni Directional Radio Range, VHF kisugárzó rádió irányadó;
[15] ILS: Instrument Landing System, Műszeres leszállító rendszer;
[16] DME: Distance Measuring Equipment, Távolságmérő berendezés;
[17] NDB: Non Directional Beacon, Nem irányított (rádió) jeladó;

- a szükséges dokumentációkat ki kell dolgozni, különösen nagy hangsúlyt kell fektetni az „Utasítás a repülőcsapatok mérnök-műszaki szolgálata részére, Re/664” módosítására az üzemeltetési stratégiának megfelelően;
- ki kell alakítani egy hatékony karbantartó- és javítóanyag ellátási rendszert;
- ki kell választani a számunkra legkedvezőbb - az üzemeltetéshez szükséges - eszközök, berendezések, gépjárművek összetételét;
- a beszerzési eljárás során – figyelembe véve a szóba jöhető helikopter típusokat – fel kell mérni az üzemeltetés érdekében szükséges infrastrukturális beruházások költségeit;
- a JAS 39 EBS HU könnyű vadászbombázó repülőgép rendszerbe állítása során szerzett tapasztalatokat fel kell dolgozni, a plusz igényeket, a dokumentációkat át kell tekinteni és a lehetőségek függvényében azokat célszerű figyelembe venni a helikopter képesség kialakítása során.

Napjaink döntései az elkövetkezendő 40–50 évre fogják meghatározni a helikopterekkel végrehajtható feladatokat, a hazai „helikopteres kultúrát”, ezért a helikopter képesség fejlesztéssel kapcsolatos kérdéseket már most célszerű figyelembe venni és elemezni a későbbi döntések előkészítése érdekében.

Tanulmányomban a helikopterek műszaki és üzembentartási rendszeréhez kötődő kérdéseket elemeztem. Javaslataimmal, észrevételeimmel egy minél eredményesebb/hatékonyabb rendszer kialakítását kívántam elősegíteni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] PETER R. MARCH: A repülés története A Wright fivérektől a Concorde-ig; Fordította: FAZEKAS ANDRÁS, Zrínyi Kiadó Bp. 2008. pp. 212.

[2] AFS VOLUME III.: ACO FORCES STANDARDS VOLUME III.: A NATO erőkkel szemben megfogalmazott követelmények, 2005.;pp. 15-20.

[3] DSC, SERES GYÖRGY: „FUTURE AVIATION TECHNOLOGIES” tudományos konferencián elhangzott előadás „A magyar légierő korszerűsítésének folyamata” 2002.;pp- 1-2.

[4] ÓVÁRI GYULA: A Magyar Honvédség repülőeszközei típusváltásának és üzemeltetésének lehetőségei gazdaságossági-hatékonysági kritériumok valamint NATO csatlakozásunk figyelembevételével. A légierő fejlesztése TANULMÁNYGYŰJTEMÉNY Budapest, 1997. pp. 9-127.

[5] POGÁCSÁS IMRE OKL. MK. EZREDES: A repülőeszközök mérnök-műszaki biztosításának és üzemeltetésének vizsgálata a fegyverzetváltással összefüggésben, NKE PhD értekezés 2012., pp. 22-27.

[6] TURCSÁNYI K., KENDE GY., GYARMATI J.: Haditechnikai eszközök összehasonlításának korszerű módszerei és azok alkalmazása, Tanulmány, Honvédelmi Minisztérium, Oktatási és tudományszervező Főosztály, 2002. évi kutatási terv, Budapest, 2002. pp- 9-38.

[7] KAVAS LÁSZLÓ OKL. MK. ALEZREDES: Harcászati repülőgépek kiválasztásának módszere gazdasági-hatékonysági mutatók alapján, kis létszámú haderő légierejének korszerűsítésére, ZMNE BJKMK, PhD értekezés, 2009. pp. 32-47.

[8] KINDLER J., PAPP O.: Komplex rendszerek egyes összemérési szempontjai. A KIPA-eljárás alkalmazástechnikája, Kézirat, BME Továbbképző Intézete, Budapest, 1977. pp. 68-75.

[9] OROSZ ZOLTÁN ALTÁBORNAGY: A Magyar Honvédség szállítórepülő- és helikopter-alegységek alkalmazási lehetőségei a NATO szövetségi rendszerében, Doktori (PhD) értekezés, 2011. pp. 106.

[10] ÓVÁRI GYULA - VARGA BÉLA: A MI-8 típusú helikopterek üzemidő-hosszabbításának egy lehetséges, korszerű megoldása (A MOTOR SZICS elgondolása), Katonai Logisztika 2014/2. szám; pp. 11-31.

[11] GÁL ZOLTÁN: A döntéshozatal alapjai, Veszprémi Vegyipari Egyetem, Vállalatgazdasági és Szervezési Intézet, egyetemi jegyzet, Veszprém, 1989.;

[12] GYARMATI J.: Több szempontos döntéselmélet alkalmazása a haditechnikai eszközök összehasonlításában, Zrínyi Miklós Nemzet Védelmi Egyetem, PhD értekezés, Budapest, 2003.; pp. 18-32.

[13] POKORÁDI LÁSZLÓ: Karbantartás elmélet, Elektronikus tansegédlet, Debrecen, 2002.; pp. 5-12.

[14] ROHÁCS JÓZSEF, SIMON ISTVÁN: Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve, Budapest Műszaki Könyvkiadó, 1989.; pp. 25-35.
[15] ÓVÁRI GYULA: Régi gondok új közelítésben: vadászrepülőgép beszerzés 2000 után HADTUDOMÁNY 1999/3-4, pp. 126-141. http://www.zmne.hu/kulso/mhtt/hadtudomany/1999/ht-1999-34-14.html
[16] Szilvássy László: A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a Magyar Honvédségben, (Tanulmány a szerző ZMNE Katonai Műszaki Doktori Iskolában megvédett doktori (PhD) értekezésének főbb eredményeit mutatja be). MTA DAB Műszaki Szakbizottsága, Elektronikus Műszaki Füzetek X. Debrecen, 2011., ISBN 978-963-7064-26-5; url: http://store1.digitalcity.eu.com/store/clients/release/aaaabchf/doc/musz_fuz_10_2011.09.09-09.21.50.pdf; url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/2011-35_A_HH_fvrensz_mod_lehet_a_MH-ben.pdf

THE TECHNICAL AND OPERATIONAL MATTERS OF THE DEVELOPMENT OF THE HDF'S HELICOPTER CAPABILITY

The Hungarian Defence Forces encounters old-new threats because of the continuous deterioration of the security environment in the region, and these threats need to be met. The changes that have taken place in recent years, especially the ones that have resulted from migration processes, shifted the focus from the earlier evolving of expedition capabilities towards protecting the country's sovereignty. With respect to the past few years the national helicopter capability, due to a number of international engagements, gained a significant amount of experience in crisis-management operations and it also experienced a purposeful development of some gears at a minimum level. In addition, limited resources resulted in obsolete conventional equipment and steadily deteriorated numbers in the strength of the forces. Because of the contemporary security challenges and the expectations of the alliance the development of the national helicopter capability is essential. The present decisions will determine the tasks performed by helicopters and the domestic „helicopter culture" over the next 40-50 years, so it is vital to take the technical and operational matters of the development of helicopter capability into account and analyse it in order to prepare for future decisions.

Keywords: *worsening security situation, obsolete equipment, insufficient defense capabilities, development of the helicopter capability, military flight management system*

Nagy László alezredes	LtCol. László Nagy
törzsfőnök-helyettes	deputy chief of staff
MH. 86 Szolnok Helikopter Bázis	HDF 86th Helicopter Base
lesliebig@freemail.hu	lesliebig@freemail.hu
orcid.org/0000-0002-7831-8639	orcid.org/0000-0002-7831-8639

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-01-0370_Nagy_Laszlo.pdf

Schuster György

SZOFTVER MEGBÍZHATÓSÁG

Az előző évi előadásunkban megvizsgáltuk, hogy mely tényezők befolyásolhatják a szoftverek megbízhatóságát és definiáltuk azokat a mérőszámokat, amelyek megbízhatóság mérésére alkalmasak. Ha a szoftver széles körben kerül felhasználásra, akkor viszonylag könnyű dolgunk van, mivel a nagyszámú felhasználás statisztikai értelemben úgy viselkedik, mintha egyedi felhasználás esetén hosszú ideig vizsgáltuk volna az alkalmazást. De mi történik akkor, ha a szoftver egyedi, vagy csak minimális számú példányban fut, ekkor „bajban vagyunk". Nem beszélve arról az esetről, amikor a már akkor valamilyen becslést szeretnénk kapni az elkészülendő termékről, amikor az még el sem készült. Intézetünkben pontosan erre az esetre kezdtünk meg egy kutatást. Ez az előadás az eddigi eredményeket és kutatási irányokat mutatja be.

***Kulcsszavak**: szoftver, megbízhatóság, szint, tesztelés, folyamat*

BEVEZETŐ

Klasszikus műszaki alkotások esetében viszonylag könnyű előre becsülni a megbízhatóságot. Az alkalmazott anyagok és technológiák viszonylag jól leírhatók és kellő mennyiségű információ áll rendelkezésre, hogy időbeli viselkedésük megjósolható legyen. Ez informatikai termékek esetén a hardverre is igaz. A szoftverek esetén sajnos ezt nem tudjuk elmondani. Ezért a hangsúly sokkal inkább áttevődik a tervezési fázisra, majd a megvalósításra. Ezt vizsgálni nehéz, ezért a fejlesztő szervezeteket kezdték vizsgálni a szervezeti felépítés és a működési folyamatok szempontjából. Ez ugyan ad támpontot ahhoz, hogy az elkészült terméktől milyen statisztikai mutatókat várhatunk el. Várható ez elég jól korrelál a cég besorolásával, de ennél jobb lenne, ha erősebb mutatókat használhatnánk.

CMM és CMMI a szoftverfejlesztési képesség – érettség vizsgálata

A CMM (Capability Maturity Model) képesség-érettség modellt az 1980-as évek végén dolgozták ki az USA Védelmi Minisztériumának megbízásából szoftverfejlesztő szervezetek megbízhatóságának felmérésére és javítására. A módszer folyamat szemléletű megközelítést alkalmaz, amely nem csak szoftver fejlesztésben, hanem tetszőleges integrált rendszer jellegű termékfejlesztésben alkalmazható. Több országban a legszélesebb körben elfogadott alapmodellé vált.

Hatást gyakorolt az ISO/IEC 12207:1995 szoftveréletciklus folyamatokat leíró szabványra és az ISO/IEC 15504 (SPICE, Software Process Improvement and Capability dEtermination) szoftverfolyamat értékelési szabványtervezetekre is. CMMI (Capability Maturity Model Integration), mint a CMM szoftver-, mind a rendszerfejlesztésre alkalmazható integrált verziója 2000. év második felében a Carnegie Mellon Egyetem Software Engineering Institute fejlesztésében Amerikai Védelmi Minisztérium támogatásával.

A modell kidolgozásának célja az eddigi szoftver-, rendszer- és termékfejlesztésben leggyakrabban alkalmazott modellek összevonása egyetlen modellé, amelyet fejlesztéssel foglalkozó szervezet alkalmazhat. A CMMI tehát egy olyan keret, amelyből kiindulva különböző

szervezetek számára lehet modellt szabni folyamatainak minősítésére és ezek javítására.

A CMMI modell a következő szabványokat, modelleket és megközelítéseket vonja össze:

- Capability Maturity Model for Software (SW-CMM) v2.0 draft C;
- Electronic Industries Alliance Interim Standard (EIA/IS) 731, Systems Engineering Capability Model (SECM);
- Integrated Product Development Capability Maturity Model (IPD-CMM) v0.98;
- modell kompatibilis az ISO/IEC 15504 és a SPICE szabvánnyal.

A CMM és a CMMI szabványok eltérően a klasszikus minőségbiztosítási elvektől már nem csupán megfelelőséget definiálnak, hanem úgynevezett érettségi modelleket is alkalmaznak, mellyel az adott céget vagy szervezetet, illetve annak projektjeit minősítik.

A CMM öt érettségi szintet állít fel, ezek:

- kezdeti, vagy kaotikus szint;
- ismételhető szint;
- meghatározott szint;
- menedzselt szint;
- optimalizált szint.

A CMM szintek meghatározásához a cég teljes szervezeti egészét vizsgálják. Úgy tekintik a céget mint amelyben csak egyetlen folyamat van, a szervezeti szintű folyamat, ez maga a szoftverfejlesztési folyamat, amelybe beletartoznak:

- a szoftverfejlesztésben részt vevő emberek;
- a szoftverfejlesztésben alkalmazott technológia;
- a szoftverfejlesztésben alkalmazott módszerek;
- a szoftverfejlesztésben alkalmazott eszközök.

A szervezeti szintű folyamatnak bizonyos jellemzői/összetevői vannak. Ezen jellemzők alapján dönthető el, hogy a szervezet milyen érettségi szinten áll.

Kezdeti vagy kaotikus szint

Tipikusan kezdő cégekre jellemző a tipikus túlvállalás. Ez azt jelenti, hogy több feladatot vállalnak be, mint ami a teljesítő képességük, illetve elvállalnak olyan feladatokat, amelyek jelentősen meghaladják a tudásukat.

Ennek egyenes következménye az, hogy a folyamatosan túllépik a határidő és a költségkeretet. A siker egyes személyek lététől és „hősiességétől” függ.

Egy sikeresen befejezett projekt nem jelenti azt, hogy a következő is sikeres lesz.

Az ilyen szervezetek vagy nagyon gyorsan a következő szintre lépnek, vagy megszűnnek.

Ismételhető szint

Ezen a szinten már megjelenik a szoftverek konfiguráció kezelése és a cégnél létezik minőségbiztosítás. A projekteket nyomon követik, tervezik és létezik követelmény kezelés. A cég vezetése megfelelő és kellő hozzáértéssel rendelkezik.

Ezek a szervezetek már képesek a piacon működőképesek maradni és fejlődni a következő

szintre. Egy elindult projekt sokkal nagyobb valószínűséggel lesz sikeres, mint az előző esetben.

Meghatározott szint

Minden pozitív jellemzőt „örököl" az előző szintről, ezeket javítja és kibővíti. A termék szintű menedzselés megjelenik, a különböző fejlesztői csoportok közötti kommunikáció követelmény, a kölcsönös belső auditok és szemlék megjelennek. Szervezeti szintű folyamatszemlélet szintén megjelenik.

Lényeges szempont, hogy a munkatársakat folyamatosan képzik.

Fontos megjegyzés, hogy ezek a cégek már nagyrészt specializáltak. Tehát nem foglalkoznak mindennel, csak azzal, ami a profiljuk.

Menedzselt szint

A szoftver minőség menedzselése. A folyamatokat mennyiségi szempontból menedzseli. A spontán, vagy tervezett folyamatváltozások statisztikai vizsgálata megtörténik.

Ennek következménye, hogy a folyamatok nagy mértékben felgyorsulnak.

Optimalizált szint

A folyamatváltozások menedzselése és optimális folyamatok keresése. A technológiai változások menedzselése, hibamegelőzés. Az esetleges eltérések, gyenge teljesítmények és hibák okainak folyamatos keresése.

A fentieknek köszönhetően a fejlesztési ciklusidők tovább rövidülnek és a fejlesztés biztonsága nagymértékben javul.

Érdekes megfigyelés, hogy csak az első szint ugorható át bizonyos segítséggel. A többi szint elérése nagyrészt folyamatos fejlődés következménye. Az is érdekes megfigyelés, hogy a felső két szint elérése nem csak tudásszint, hanem kulturális háttér függvénye is. Erre egy következő példa:

Egy jó nevű szoftver fejlesztő cég létrehozott egy leányvállalatot egy szoftverfejlesztésről híres ázsiai országban megcélozva az optimalizált érettségi szintet. Ez sehogy sem sikerült. Nagyon komoly erőfeszítésekkel a meghatározott szintet voltak képesek tartani.

Hiba kalkuláció

A megbízhatóság számításánál célszerű a meghibásodás bekövetkezési valószínűséget számítani.

Ennek oka az, hogy a működési valószínűség P_w komplementere a nemműködés a P_f.

Tehát:

$$P_w = 1 - P_f$$

Számos esetben a probléma matematikai tárgyalása így egyszerűbb.

Az elsőnek vizsgált eset az egyszálas futású program. Ez az eset gyakorlatilag nem fordul elő, azonban komoly jelentősége van a további vizsgálatok során.

Tegyük fel, hogy a ismertek a kérdéses program statisztikai adatai. Ekkor a legegyszerűbb matematikai megközelítés az adott időtartamra történő meghibásodásra a Poisson eloszlás:

$$P_f(\mathrm{X=k}) = \frac{\lambda^k}{\mathrm{k!}} e^{-\lambda}$$

ahol $\lambda > 0$az adott időtartamra a meghibásodás várható értéke, k = 1, 2, 3, ... pedig a meghibásodások száma.

Probléma: az általunk vizsgált esetben így megadható a meghibásodás valószínűsége. Kérdés továbbá is az, hogy honnan kapunk megbízható információt a λ paraméterről.

Magyarázat: a szoftverek alapvetően jól konstruált, helyesen megvalósított alkotások. Így a hagyományos megfigyelési módszerek nem vezetnek eredményre.

Adott egy a fenti feltételeknek megfelelő szoftver. A szoftver már alkalmazásba került és több – akár – tízezer példány is fut különböző felhasználóknál. Az így összegyűjtött meghibásodási adatokat vizsgálva következtetést lehet levonni a keresett λ paraméterre.

Példa: tegyük fel, hogy egy adott szoftver 1000 példánya fut. Az átlagos meghibásodási ráta 100 óránként egy meghibásodás erre a populációra. Ezt egyetlen futó programra vetítve 100 000 óránkénti meghibásodást jelent.

Azonban a szoftver tervezőinek szempontjából az lenne a kedvező, ha ezt az értéket már nem a futó program kibocsájtása után, hanem még – akár a tervezési fázisban – lehetne meghatározni.

Kérdés: lehet-e ezt a módszert konkurens rendszerekre alkalmazni?

A válasz: igen az önállóan futó programrészletek vizsgálatára egyértelműen, de csak az adott feladatokra és szálakra. Ezt a problémát tovább bonyolítja a közös erőforrás használat és a processzek közötti kommunikáció (Inter Process Communication).

Amennyiben feltételezzük, hogy egy önállóan futó és vizsgált szoftverelem meghibásodása a teljes rendszer hibás működéséhez vezet, akkor a számítható hiba valószínűsége független valószínűségi változók esetén:

$$P_{\mathrm{f}\Sigma} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{n} P_{f_i}.$$

Feltételezzünk egy négy szálból álló alkalmazást (IPC kizárva), amely minden szálát tekintve azonos várható értékkel hibásodik meg, és egy meghibásodás a teljes rendszer hibás működéséhez vezet.

Ekkor eredményként azt kapjuk, hogy a meghibásodás valószínűsége négyszeresére nő[1].

IPC esetben a folyamatok közötti kapcsolat újabb hibalehetőséget rejt magában. Ennek klaszszikus esete a két folyamat közötti létrejövő halálos ölelés (dead-lock). Ez akár szemaforok, akár MUTEX-ek esetén előfordulhat.

[1]A komplexitás növekedése a megbízhatóságot csökkenti.

Példa:

Adott két folyamat A és B és két MUTEX X és Y. B prioritása magasabb, mint A prioritása. A kérdéses szituáció:

1. A folyamat fut és megszerzi X MUTEX-et;
2. az ütemező (scheduler) leállítja A folyamatot, mert B folyamat futásra kész és B-t elindítja;
3. B folyamat megszerzi Y MUTEX-et;
4. B folyamat blokkolttá válik X MUTEX-en;
5. A folyamat fut, mivel B blokkolt állapotba került;
6. A folyamat blokkolttá válik Y MUTEX-en.

A folyamat nem tud futni, mert Y MUTEX felszabadítására vár, és ezért nem tudja feloldani X MUTEX-et, amelyen B folyamat várakozik, és ezért B nem tudja felszabadítani Y MUTEX-et.

Ez a példa a legegyszerűbb eset, amelyet viszonylag könnyű észrevenni és kiküszöbölni. Probléma akkor van, ha ez a jelenség nem páronként következik be, hanem több folyamat kerül „egyfajta körbevárás" (cyclic blocking) állapotba.

Ennek az állapotnak a bekövetkezési valószínűsége becsülhető. Két folyamatra a következő módszer használható az előző példa alapján:

Tételezzük fel, hogy mind A, mind B folyamatok egyenletes valószínűségi eloszlás alapján használják X, illetve Y MUTEX-eket. Ez alapján:

- A folyamat normál futást tekintve $P_X$valószínűséggel tartózkodik X MUTEX által védett területen;
- B folyamat normál futást tekintve $P_Y$valószínűséggel tartózkodik Y MUTEX által védett területen;
- A folyamat futási valószínűsége P_A;
- B folyamat futási valószínűsége P_B;
- A és B folyamat egyidejű futásának valószínűsége: $P_{\mathrm{AB}}=\mathrm{P}_A P_B$;
- A két MUTEX „átlapolódásának" valószínűsége: $P_{\mathrm{dead-lock}}=\mathrm{P}_A P_B P_X P_Y$.

A megoldás nem tűnik bonyolultnak, viszont a kapott eredmény érezhetően „kedvezőtlen", ha futási – megbízhatósági szempontból nézzük. Tesztelési szempontból nagyon kedvező, mert a hiba gyorsan kiderül.

A fenti példa elnagyolt. Több tíz, esetleg több száz folyamat esetén ilyen jellegű hiba bekövetkezésének valószínűsége ciklikus lényegesen csökken, de felderíthetőségének esélye is drasztikusan csökken.

Hasonló eredményt kapunk, ha kissé eltávolodva a szoftver szempontoktól a hardveres hatásokat is vizsgálunk. Egy hardver által létrehozott állapot feldolgozása is időbe telik.

Tipikus esete ennek egy hálózati foglaltság feldolgozása, ahol a kérdéses egység a hálózati médiumot az adott pillanatban szabadnak érzékeli, de amire azt használtba venné, addigra egy másik egység már használja. Ezt az időt szoft időszeletnek nevezik.

Sajnos ez akkor is fennáll, ha az ilyen jellegű feldolgozást hardver végzi. Ezt különböző eljárá-

sokkal ki lehet küszöbölni, például CSMA/CD, vagy CSMA/CA. A kérdéses médium terheltségétől függően firm real-time és hard real-time esetben megengedhetetlen időbeli csúszások következhetnek be.

Ennek feltétele azonban az, hogy a rendszer erőforrásai a kritikus időszakban nem bizonyulnak elegendőnek. Ha a hardver és szoftver erőforrások elegendőek, akkor a rendszer a legkedvezőtlenebb állapotot is le tudja kezelni és nem kerül időzavarba. A számításra az általunk alkalmazott eljárás a következő:

ρ_i jelöli az adott erőforrás használatának relatív gyakoriságát, ahol

$$\rho_i = \frac{\sum_j \tau_{\mathrm{ij}}}{T_i}$$

τ_{ij} a kritikus szakasz időtartama, amíg a probléma jelentkezhet (az i-edik folyamatra számítva), ha ebben az időtartamban egy másik folyamat is el akarja érni a kérdéses erőforrást, akkor ütközés következik be.

T_i a vizsgált időtartam (az i-edik folyamatra).

Ennek $T_i$végtelenbe vett határértéke p_i, a kritikus szakasz bekövetkezési valószínűsége.

Akkor keletkezik hiba, vagy eltérés, ha egy bizonyos számú folyamat ütközik. Ha egy adott erőforrás eléréséhez tartozó $p_i$valószínűségek egyformák, akkor egy adott rész állapot binomiális eloszlást mutat.

$$p_{\mathrm{ik}} = \binom{n}{k} p_i^k (1 - p_i)^{n-k}$$

A hiba vagy eltérés bekövetkezéséhez n folyamatból k folyamatnak kell az adott szakaszon bekövetkezni. Azonban akkor is hiba keletkezik, ha *k*-nál több folyamat lép be a kérdéses időben.

$$p_f = \sum_{\mathrm{j=k}}^{n} \binom{n}{j} p_i^j (1 - p_i)^{n-j}$$

ahol:

p_f az eltérés, vagy hiba bekövetkezési valószínűsége.

Ennek elkerülése úgy lehetséges, hogy a rendszer tervezése során annyi erőforrást biztosítunk, hogy a legnagyobb terhelés esetén se léphessen fel probléma.

Memória szivárgás (memory leaking) a következő eset, amelyet vizsgálunk. Az eltérés, majd a hiba oka az, hogy egy adott folyamat memória jellegű erőforrást foglal le, amelyet adott valószínűséggel nem szabadít fel, ezáltal a rendelkezésére álló memória fokozatosan elfogy.

A hiba modell egy egyszerű alprogram, amely több kilépési ponttal rendelkezik az egyik kilépési ponton, ahol a kérdéses erőforrás felszabadítás nem történik meg $p_i$valószínűséggel, ezáltal csökkentve a rendelkezésére álló memória méretét.

p_i becslése szintén a relatív gyakoriság segítségével határozható meg és egyenletes eloszlást feltételeztünk.

Tegyük fel, hogy:

M_a a rendelkezésre álló memória;

Δm az allokált, de fel nem szabadított memória mennyisége;

k a futtatások száma;

τ a futtatások átlagos „periódus” ideje;

T_f a hiba bekövetkezésének várható idő intervalluma.

Az eltérés és vagy a hiba bekövetkezésnek feltétele, az hogy a rendelkezésre álló memória elfogyjon.

$$0 > M_a - k\Delta m \text{ ebből } T_f > \tau \frac{M_a}{\Delta m}$$

A memória szivárgás hiba. Azonban számos esetben a szoftverfejlesztők nem foglalkoznak vele, hanem előírják a rendszer adott időnként történő újraindítását.

Következő kérdés a szoftver vizsgálata Markov folyamatként [5].

Markov folyamatnak az a sztochasztikus folyamat tekinthető, amelynek jövőbeli viselkedése csak a rendszer jelenlegi állapotától függ [5]. Röviden ezt a szakirodalom úgy fogalmazza meg, hogy a Markov folyamat nem emlékezik.

Ezt a peremfeltételt a szoftver rendszerek nem teljesítik. Erre egy nagyon egyszerű példa a rendszer adott időpillanatig történő erőforrás használata.

Vegyük a következő példát! Adott egy folyamat, amely komoly háttértároló hozzáféréssel dolgozik. Köszönhetően a nagy igénybevételnek a háttértároló tartalma töredezett lesz, így hozzáférési ideje (access time) meghosszabbodik. Ez egyértelműen egy múltbéli hatás.

Amennyiben a rendszer rétegekre bontott struktúrával rendelkezik a „felső” rétegek egyfajta felügyeleti és javító funkciókat is ellátnak – különös tekintettel a SIL3 és SIL4 besorolású rendszerek esetén. Ekkor sem célszerű a rendszert Markov folyamatként kezelni.

Az eddigiek folyamán olyan hibákat mutattunk be, amelyek valamilyen tervezési hiba alapján eltéréshez és vagy hibához vezettek. Minden esetben kerestük a részfolyamat bekövetkezési valószínűségét. Ezt a valószínűségi értéket azonban rendkívül nehéz meghatározni. Ennek oka, az, hogy a kritikus szakaszok bekövetkezési valószínűsége olyan kicsi, hogy a kérdéses folyamatot akár évekig kell megfigyelni, vagy nagyszámú elem megfigyelésével kell a kívánt értéket meghatározni.

További problémát jelent, hogy a szoftverek kivétel nélkül konkurens rendszerek. Így a megfigyelésük is jóval komplexebb feladat, mint bármilyen hagyományos műszaki rendszeré.

A szoftver gyártók és felhasználók a kockázati elemeket még a szoftver kibocsájtása előtt szeretnék meghatározni. Erre az előbb említett módszerek nem alkalmazhatók.

A megoldás a szoftver előállítójának megfigyelése. Az előállító várhatóan több szoftvertermékkel rendelkezik, amelyből éles körülmények között számos példány fut. Az ilyen szoftverelemek adatainak összegyűjtésével már értékelhető statisztikai mintával rendelkezünk.

Jelenlegi kutatásainkban azt vizsgáljuk, hogy a szoftverhibák bekövetkezése mennyire véletlenszerű, illetőleg az adott előállító milyen trendet mutat az hibák számát tekintve.

Erre a szoftver fejlesztési folyamatot úgy tekintjük, mint egy idősort és a kérdésre a választ a Hurst analízissel határozzuk meg [7].

Megjegyzés: a Hurst analízis idősorokra lett kifejlesztve, azonban a szoftver futása nem egyértelműen időfüggő annyira, hogy idő intervallumokat vizsgáljunk, ezért az időt a kódsorok számával helyettesítjük.

Adott számú kódsorra határozzuk meg az eltérések és hibák előfordulási számát.

Jelölje

E_i adott számú kódsorra az eltérések és hibák száma, i = 1, 2, ... m;

m a vizsgált idősorok száma;

N a minták kódsorainak száma;

E_N az átlagos hibaelfordulás.

$$E_N = \frac{1}{m}\sum_{\mathrm{i}=1}^{m} E_i$$

Számítsuk ki a vizsgált tartományok kumulált átlagait.

$$X(\mathrm{i,N}) = \sum_{\mathrm{i}=1}^{m} E_i - E_N$$

Majd számítsuk ki az $X(\mathrm{i, N})$ maximális és minimális értékének különbségét.

$$\mathrm{R}=\max X(\mathrm{i,N}) - \min X(\mathrm{i,N})$$

Ezt az értéket a teljes sorra vonatkoztatott standard tapasztalati szórással S_N(standard deviation) normáljuk.

Ekkor:

$$\frac{R}{S_N}=\mathrm{N}^H$$

A Hérték az úgynevezett Hurst exponens, amelynek az értéke a hibákat és a trendeket jellemzi.

A H = 0,5érték azt jelenti, hogy a hibák előfordulása a hibák előfordulása véletlenszerű.

A H > 0,5érték azt mutatja, hogy az idősor erősen trendtartó. Tehát, ha egy időszakban a hibák csökkentek, akkor a következő időszakban ugyanaz a trend várható.

A H < 0,5 érték az idősorban hullámzást jósol. Tehát egy időszakos csökkenést emelkedés, illetve emelkedést csökkenés követ.

A módszer ígéretes. Problémája kettős. A szoftver előállítói a kisebb hibákat hajlamosak eltitkolni, mert így a cég hírnevén – esetleg – nem esik csorba. A másik probléma, hogy a felhasználók vagy nem ismerik fel az eltéréseket, vagy nem foglalkoznak a problémával. Mindkét esetben a statisztikai minta torzul.

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS ÖSSZEFOGLALÁS

A szoftver megbízhatóság valószínűségi jellemző. Nehéz olyan valószínűségi modellt találni, amely jól becsülhetővé teszi az értékét. Több szempontból vizsgálva kijelenthetjük, hogy egységes és minden szempontból megfelelő elméletet nem tudunk megnevezni.

Az ismertetett matematikai eljárások alkalmazásához is mindenképpen szükséges a kérdéses szoftverről valamilyen előzetes tudás, amelynek megszerzése sem történhet teljes bizonyossággal.

Az általunk kutatott eljárás a szoftver előállítójának vizsgálatát célozza. Az általa előállított termékek statisztikai vizsgálata valamilyen megfogható és körüljárható támpontot ad a szoftver további vizsgálatához.

Különböző módszerekkel, szabályokkal és teszteléssel a megbízhatóság javítható, de a tapasztalat azt mutatja, hogy hasonlóan a más ember által előállított rendszerekhez a szoftverek megbízhatósága nem lehet 100%. A megbízhatóság alapvetően a tervezés fázisában eldőlhet, de komoly problémát jelent, hogy az előállított kód emberfüggő.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Van Solingen, R. and Berghout, E. (1999) The Goal/Question/Metric Method: A Practi-cal Guide for Quality Improvement and Software Development. McGraw-Hill Inter-national.

[2] Tokody Dániel, Schuster György, Papp József Study of How to Implement an Intelligent Railway System in Hungary In: Anikó Szakál (szerk.) SISY 2015: IEEE 13th nternational Symposium on Intelligent Systems and Informatics: Proceedings. Subotica, Szerbia, 2015.09.17-2015.09.19. Subotica: IEEE Hungary Section, 2015. pp. 199-204.

[3] Long, J (ed.) (2008) Metrics Data Program, National Aeronautics and Space Administratio http://mdp.ivv.nasa.gov/index.htm

[4] Norman F. Schneidewind, "Reliability Modeling for Safety Critical Software", IEEE Transactions on Reliability, Vol. 46, No.1, March 1997

[5] Markov process (mathematics) - Britannica Online Encyclopedia

[6] Marszal, Edward, "Safety Integrity Level Selection – Systematic Methods Including Layer of Protection Analysis", The Instrumentation, Systems, and Automation Society, Research Triangle Park, NC, USA, 2002.

[7] Szilágyi Győző Attila: A légi balesetek fraktáldimenziója, (on-leni doc), url: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2016_2/2016-2-14-0311_Szilagyi_Gyozo_Attila.pdf

SOFTWARE RELIABILITY

We investigated the influential factors of software reliability and we defined those indexes, which are suitable to measure software reliability in our last year presentation .If the software is widely used it is quite easy to observe the given application. The reason for this that in statistically meaning the given software acts as single application would have run for very long time. But what does it happen when the observed software is unique or it has limited applications to run. In this case we are in „trouble". The other problem is that the software is not finished and we have to get some prior information on the product. In our institution we have started a new research on this topic. This presentation shows our new research trends and results.

***Keywords**: software, reliability, level, testing ,process*

Dr. Schuster György (PhD)	Dr. Schuster György PhD.
intézet igazgató	Director of Institute
Óbudai Egyetem	Instrumentation and Automation Kandó Kálmán Fa-
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar	culty of Electrical Engineering
Műszertechnikai és Automatizálási Intézet	Óbuda University
schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu	schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8573-3670	orcid.org/0000-0002-8573-3670

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-02-0363_Schuster_Gyorgy.pdf

Sinan Koçak

FUZZY LOGIC AND ITS MECHATRONICS ENGINEERING APPLICATIONS

Every modern scientific research area the fuzzy sets have great progress. It found many application areas in both practical and theoretical studies from engineering area to health sciences, from computer science to arts and humanities, and from life sciences to physical sciences. Recently, fuzzy sets extensions have been used in many areas such as energy, material, economics and medicine. In this paper, a comprehensive literature review on the fuzzy set theory is considered. This literature review also explains the concept of operation fuzzy sets. In the last section of the paper, I present some researcher works with my interpretations of fuzzy sets.

***Keywords**: Fuzzy sets, fuzzy operations, industrial applications*

1. INTRODUCTION

Fuzzy logic is a way of getting computers to make the decision more like a human being feelings and interface process. It is a philosophical ideology and mathematical methodology, which is similar in construct to Boolean algebra, but more general in fundamental ideas. Fuzzy logic uses fuzzy sets and fuzzy rules for modelling the world and make the decision about it.

Most of the traditional tools for formal computing, modelling, and reasoning, and are deterministic, crisp, and precise in character. Crisp means dichotomous that is, more or less type rather than yes or no type. In dual logic, for instance, a statement can be true or false and nothing in between. “In set theory, an element can either belong to a set or not; in optimization, a solution can be feasible or not” [14].

A simple example of the fuzzy mathematical structure is a fuzzy set. A fuzzy set is a generalization of a classical set and the membership function a generalization of the characteristic function. This fuzzy structure has brought out new research topics in connection with algebra, category theory, analysis, and topology. In recent years, the fuzzy sets trend in the study of generalized measures and integrals, and are combined with statically methods. In addition, fuzzy set show us logical underpinnings in the tradition of many-valued logics.

The paper is organized as follows: Section 2 provides fuzzy sets conception. Section 3 shows fuzzy set operations. Section 4 presents modern applications of fuzzy sets and some research work with my interpretations of fuzzy sets.

2. FUZZY SETS

Fuzzy sets theory is the generalization of classical set theory, which provides a mathematical model for working with imprecise data. A fuzzy set is the collection of related items, which belong to that set different degrees. The knowledge can get from fuzzy sets and can be combined using rules to make a decision based on the information. Fuzzy sets theory firstly

was proposed by Zadeh [13] at the University of California in 1965 to represent/manipulate data and information possessing non-statistical uncertainties.

The theory of standard, i.e. crisp, sets is strongly related to classical logic. Therefore, this becomes particularly obvious if one looks at the usual set algebraic operations like intersection and union. The crisp sets can for *A, B* be characterized by the conditions

$$x \in A \cap B \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B, \tag{1}$$

$$x \in A \cup B \Leftrightarrow x \in A \vee x \in B. \tag{2}$$

The theory of sets, started with quite similar definitions for the membership degrees of the set algebraic operations by Zadeh [13],

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \tag{3}$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \tag{4}$$

but offered also other operations for fuzzy sets, called “algebraic” by Zadeh, for example, an algebraic product AB and an algebraic sum A + B defined via the equations.

$$\mu_{AB}(x) = \mu_A(x)\,\mu_B(x), \tag{5}$$

$$\mu_{A+B}(x) = \min\{\mu_A(x) + \mu_B(x), 1\}. \tag{6}$$

For modeling of uncertain notions, Zadeh [13] designed the fuzzy sets as a mathematical tool. In essence, he did not relate his fuzzy sets to non-classical logic. There was only a minor exception.

The membership function of fuzzy sets is ordinary fuzzy sets are usually precise. However, we may be able to identify appropriate membership functions only approximately. Interval-value fuzzy sets whose membership functions does not assign to each element of the universal set on a real number, but a closed interval of numbers between the identified lower and upper bounds.

In fuzzy sets, each element is mapped to [0,1] by the membership function. $\mu A : X \rightarrow [0, 1]$
Where [0,1] means real numbers between 0 and 1 (including 0 and 1).

2.1. Example 1

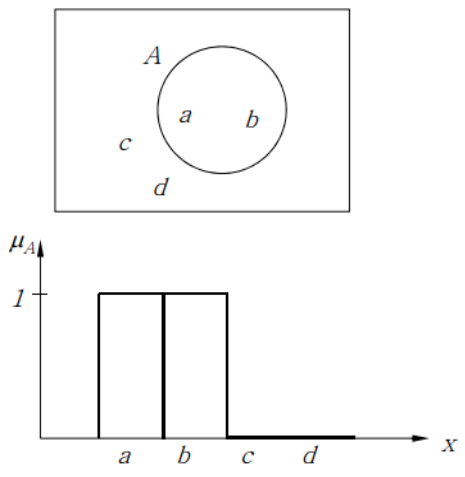


Fig 1. Graphical representation of crisp set [7]

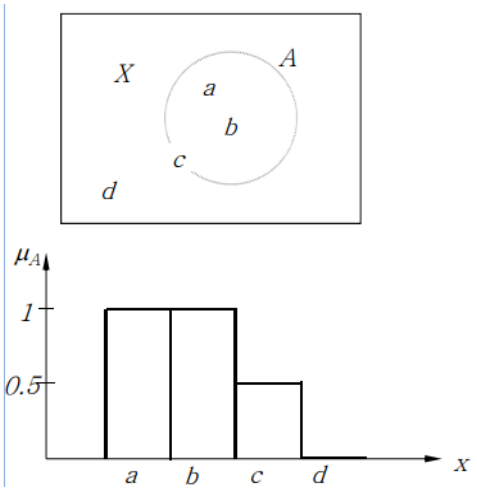


Fig 2. Graphical representation of fuzzy set [7]

Type-n Fuzzy Set, the value of membership degree can include uncertainty. If the value of membership function is given by a fuzzy set, it is a type-2 fuzzy set. This notion can be extended up to Type-n fuzzy set.

2.2. Example 2

Fuzzy sets of type 2, A:X→ F ([0,1]), F ([0,1]), the set of all ordinary fuzzy sets that can be defined with the universal set [0,1].F ([0,1]), is also called a fuzzy power set of [0,1].

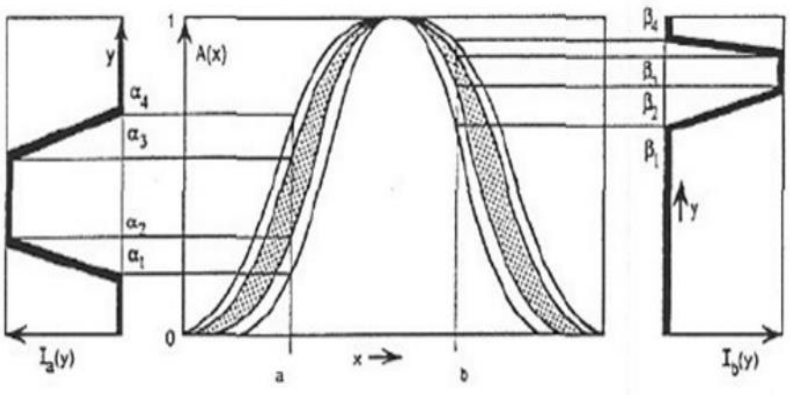


Figure 3. Illustration of the concept of a fuzzy set of type-2 [8]

The primary disadvantage of interval-value fuzzy sets is computationally more demanding than ordinary fuzzy sets. The computational demands for dealing with fuzzy sets of type 2 are even greater than those for dealing with interval-valued fuzzy sets. This is the primary reason why the fuzzy sets of type 2 have almost never been utilized in any applications.

3. FUZZY SET OPERATIONS

Considering two fuzzy sets that represent the concepts of an A, B on the universe, the following function union, intersection, and complement are defined for A, B on X:

Union $\mu A \cup B\,(x) = \mu A\,(x) \vee \mu B(x).$ (7)

Intersection $\mu A \cap B(x) = \mu A(x) \wedge \mu B(x).$ (8)

Complement $\mu \bar{A}\,(x) = 1 - \mu A(x).$ (9)

Ven diagram for these operations, extended to consider fuzzy sets, are shown in figures 4-5 [11]. The operations are given in equations (7)–(9) are known as the standard fuzzy operations.

Any fuzzy set A defined on a universe X is a subset of that universe. Also by definition, the membership value of any element x in the null set Ø is 0, and the membership value of any element x in the whole set X is 1, just as with classical sets. Note that the null set and the completely set are not fuzzy sets in this context (no tilde 9under strike). The appropriate notation for these ideas is as follows;

$A \subseteq X \Rightarrow \mu A\,(x) \leq \mu X(x).$ (9)

For all $x \in X$, $\mu \emptyset(x) = 0.$ (10)

For all $x \in X$, $\mu X(x) = 1.$ (11)

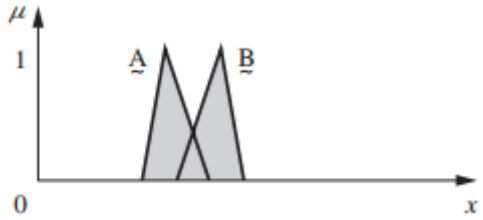


Figure 4. Union of fuzzy sets A and B [2]

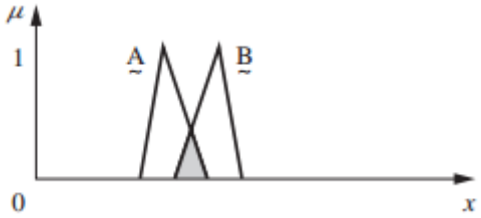


Figure 5. Intersection of fuzzy sets A and B [2]

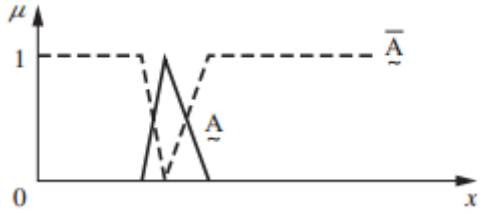


Figure 6. Complement of fuzzy sets A [2]

The group of all fuzzy sets and fuzzy subsets on X is denoted as the fuzzy power set $P(X)$. It should be obvious, based on the fact that all fuzzy sets can overlap, that the cardinality, $n_{p(x)}$, of the fuzzy power set is infinite; that is, $n_{p(x)}=\infty$.

De Morgan's principles for classical sets also hold for fuzzy sets, as denoted by the following expressions:

$$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}. \tag{11}$$

$$\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}. \tag{12}$$

All other operations on classical sets hold for fuzzy sets as well, except for the excluded middle axioms. These two axioms do not hold for fuzzy sets since they do not form part of the basic axiomatic structure of fuzzy sets [5]. Since fuzzy sets can overlap, a set and its complement can also overlap. The excluded middle axioms, extended for fuzzy sets is expressed as

$$A \cup \overline{A} \neq X. \tag{13}$$

$$A \cap \overline{A} \neq \emptyset. \tag{14}$$

Extended Venn diagrams comparing the excluded middle axioms for classical (crisp) sets and fuzzy sets are shown in Figures 7 and 8, respectively.

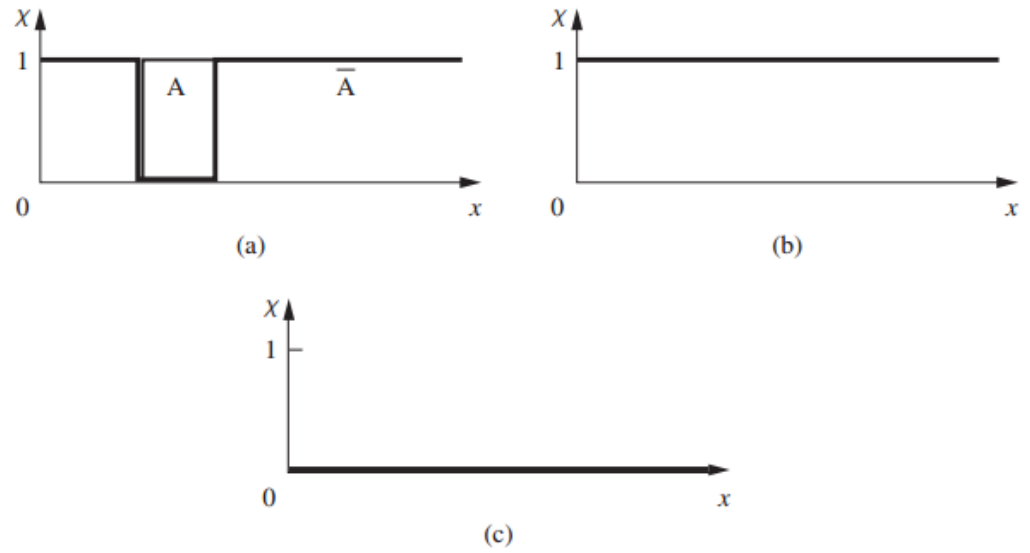


Figure 7. Excluded middle axioms for crisp sets. (a) Crisp set A and its complement; (b) crisp A ∪ ~~A~~ = X (axiom of excluded middle); and (c) crisp A ∩ ~~A~~ = Ø (axiom of contradiction) (source: [11])

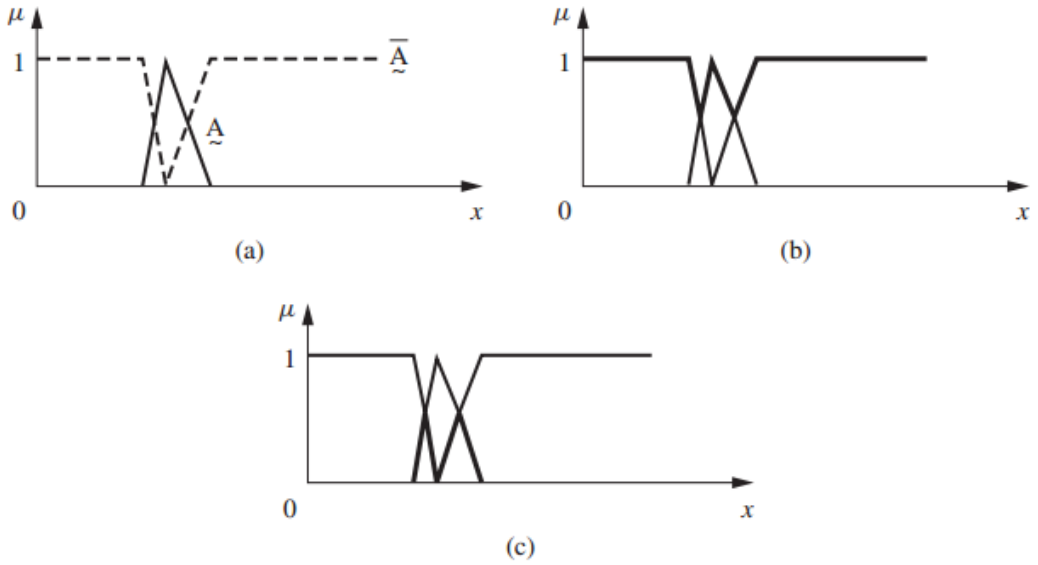


Figure 8. Excluded-middle axioms for fuzzy sets are not valid. (a) Fuzzy set A and its complement; (b) fuzzy A ∪ A ≠ X. (axiom of excluded middle); and (c) fuzzy A ∩ A ≠ Ø [11]

4. MODERN APPLİCATİON OF FUZZY SETS

Fuzzy logic is very useful for many people involved in research and development including engineers (mechanical, electrical, mechatronics, computer, aerospace, industrial, civil, chemical, aerospace, agricultural, biomedical, environmental, geological and environmental), mathematicians, researchers, computer software developers and natural scientists (physics, chemistry, biology, and earth science), medical researchers, social scientists (management, economics, political science, and psychology), public policy analysts, business analysts.

Certainly, the applications of fuzzy logic, once thought to be a vague mathematical curiosity, can be find in many engineering and scientific works. Fuzzy logic has been used in numerous applications such as facial pattern recognition, washing machines, air conditioners, vacuum

cleaners, transmission systems, antiskid braking systems, control of subway systems and unmanned helicopters, knowledge-based systems for multi-objective optimization of power systems, models for new product pricing or project risk assessment, medical diagnosis, weather forecasting systems, treatment plans, and stock trading.

Fuzzy logic has used in numerous fields such as power engineering, control systems engineering, image processing, robotics, industrial automation, consumer electronics, and optimization. This branch of mathematics has implanted new life into scientific domains that have been dormant for a long time.

There are some submitted researcher papers following the below refers, but not all of them are accepted. Researchers are extremely working hard for solving many issues in the real-life application of fuzzy logic. Many numerous applications of fuzzy logic have to researched and developed. Today, fuzzy sets is a great challenge for reaching computer reasoning like a human. In the last four centuries, mathematical models proved that how much they are usefulness for the comprehension of natural phenomena.

By Pokorádi, "Modern equipment and systems should meet technical, safety and environmental protection requirements." He has mentioned it in a study on fuzzy logic-based risk assessment method [10]. Pokorádi, the author presents the level of assessing risks with using fuzzy rule-based tools. To manage a special helicopter mission, its risk using the fuzzy logic based risk assessment method. He has considered severity and probability of possible air-crashed, which have been determined by expert air staff assesses. Moreover, his paper informs to emphasize of popularize usage, investigate and methodology theory, study methodology and possibilities of fuzzy use tools in the future modern Hungarian military science.

In "Detection and elimination of a potential fire in engine and battery compartments of hybrid electric vehicles" [1] by Dattatreya. The authors present a novel fuzzy deterministic non-controller type (FDNCT) and FDNCT in inference algorithm (FIA) to build an architecture for an intelligent system to detect and eliminate probable fires in the engine and battery compartments of a hybrid electric vehicle. The fuzzy inputs consist of sensor data from the engine and battery compartments, i.e., moisture, temperature, and voltage and current of the battery. The system integrates the data and detects potential fires, takes actions for elimination the hazard, and informs the passengers about the potential fire using an audible alarm. They also present the computer simulation results of the comparison between the FIA and singleton inference algorithms for detecting potential fires and determining the action for eliminating them.

In Boolean Decision Diagrams (BDD), Boolean Neural Net (BNN), and Field Programmable Gate Array (FPGA) on fuzzy techniques for rapid system analysis by R. Dixit and H. Singh, the authors look at techniques to simplify data analysis of large multivariate military sensor system [3]. The approach illustrated from a video scene analyzer using representative raw data. Hence, develop fuzzy neural net relations using Matlab. This represents the best fidelity fit to the data and will be using as a reference for comparison. Then, the data is converted to Boolean and using BDD techniques, to find similar relations between input vectors and output parameter. It will be showing that such Boolean techniques offer the dramatic improvement in system analysis time, and with minor loss of fidelity. To further this study, BNN methods used to bridge the Fuzzy Neural Network (FNN) to BDD representations of the data. Neural

network approaches give an estimation technique for the complexity of Boolean Decision Diagrams, which also can be used to predict the complexity of digital circuits. The neural network model can be used for complexity approximation over a set of BDDs derived from Boolean logic expressions. Experimental results show good correlation with theoretical results and give insights to the complexity. The BNN representations can be useful in the embedded processor based multivariate situations and can be used as a means to FPGA implementation of the system relationships.

In "A Hybrid approach to failure analysis using stochastic Petri nets and ranking generalized fuzzy numbers" [12] by Torshizi and Parvizianthe, authors present a novel failure analysis approach, the combine structural properties of stochastic Petri Nets and flexibility of fuzzy logic. Firstly, they develop a powerful fuzzy ranking technique and analyze major drawbacks of existing ranking techniques. Then they demonstrate the capabilities of the presented algorithm to overcome such drawbacks. The approach considers spread, weight, and difference of coordinate of the center of gravity point of each fuzzy number and is able to deal with a wide variety of fuzzy numbers. Using this technique, utilizing the isomorphism between stochastic Petri Nets and their corresponding Markov chains and present a failure analysis algorithm incorporating some critical factors. This algorithm might have implemented in different industrial applications.

In "Effect of road traffic noise pollution on human work efficiency in government offices, private organizations, and commercial business centers in Agartala city using fuzzy expert system: a case study" [9] by Pal and Bhattacharya, the authors examine the reduction in human work efficiency due to growing road traffic noise pollution. Using fuzzy logic, they monitor and model disturbances from vehicular road traffic and the effect on personal work performance.

In "Comparison of detection and classification algorithms using Boolean and fuzzy techniques" [4] by R. Dixit and H. Singh, the authors compare various logic analysis methods and present results for a hypothetical target classification scenario. They show how pre-processing can reasonably preserve result confidence and compare the results between Boolean, multi-quantization Boolean, and fuzzy techniques.

5. SUMMARY, FUTURE WORK

In this paper, the author has developed the basic definitions fuzzy logic and operations on fuzzy sets and crisp sets. Also shown some examples of important applications based on fuzzy sets in modern technology. The author will be following tasks:

- Study the fuzzy logic properties of membership functions, development of membership functions, fuzzification, and defuzzification, fuzzy systems simulation;
- To investigate fuzzy logic's possibilities of use in the modern air condition and technical systems operation;
- To work out new fuzzy rule-based risk assessment analysis;
- To determine the risk context and acceptability, use defuzzycation to minimize the overall loses
- To use the Summarized defuzzification process in fuzzy decision making, Fuzzy Failure Mode, and Effect analysis.

REFERENCES

[1] DATTATHREYA Macam. - SINGH Harpreet. - MEITZLER T. : "Detection and elimination of a potential fire in engine and battery compartments of hybrid electric vehicles" Advances in Fuzzy Systems 2012, 6

[2] De Morgan's principles the excluded middle axioms, Fuzzy Set and Operations, http://www.ibu.edu.ba/assets/userfiles/it/2012/eee-Fuzzy-2.pdf.

[3] DIMIX Rahul. - SINGH Harpreet : "BDD, BNN, and FPGA on Fuzzy Techniques for Rapid System" Analysis Advances in Fuzzy Systems Volume 2012, Article ID 290710, 9 pages doi:10.1155/2012/290710

[4] DIMIX Rahul. - SINGH Harpreet : "Comparison of detection and classification algorithms using Boolean and fuzzy techniques" Advances in Fuzzy Systems Volume 2012 (2012), Article ID 406204, 10 pages

[5] GAINES B.R. : Fuzzy and probability uncertainty logic, Inf. Control 38, No. 2, 154-169.

[6] GUPTA M. - QI J. (1991) :"Theory of T-norms and fuzzy inference methods," Fuzzy Sets Syst., vol. 40, pp. 431–450.

[7] KLIR G. J. – YUAN B.: Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications, Prentice Hall, 1995

[8] LIANG Q. – MENDEL J. M.: Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 8, No. 5, October 2000, and pp. 535-550.

[9] PAL. D., - BHATTACHARYA D.: "Effect of road traffic noise pollution on human work efficiency in government offices, private organizations, and commercial business centres in agartala city using fuzzy expert system: a case study" Advances in Fuzzy Systems Volume 2012, Article ID 828593, 9 pages doi:10.1155/2012/828593

[10] POKORÁDI László: Application of Fuzzy Set Theory for Risk Assessment, JOURNAL OF KONBIN 14-15:(1) pp. 187-196. (2010)

[11] ROSS, Timothy J.: Fuzzy logic with engineering applications / University of New Mexico, USA. 1995

[12] TORSHİZI. A. D. – PARVİZİAN. J. : "A Hybrid approach to failure analysis using stochastic petri nets and ranking generalized fuzzy numbers" Advances in Fuzzy Systems Volume 2013 (2013), Article ID 581879, 3 pages

[13] ZADEH Lofti. A. : Fuzzy Sets, Information and Control, 8(1965) 338-353BÉKÉSI BERTOLD: A repülőszerkezetek műszaki karbantartása. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 1999/3, pp. 93–104.

[14] ZIMMERMANN Hans-J. : Fuzzy Set theory-and Its Applications, Third Edition,

FUZZY LOGIKA ÉS MECHATRONAKAI ALKALMAZÁSA

A modern tudományokban egyre nagyobb szerepet játszanak a fuzzy halmazok. Egyre szélesebb körben terjed a gyakorlati és elméleti műszaki tudomány az egészségügyi, a informatika, bölcsész-, és élettudományok, valamint fizikai tudományok területén. A tanulmányban átfogó szakirodalmi áttekintést ad a fuzzy halmazelméletről és annak alkalmazási lehetőségeiről a modern mechatronikában, valamint irodalmi áttekintés nyújt a témakörben.

***Kulcsszavak**: fuzzy halmazok, fuzzy operátorok, ipari alkalmazás*

KOCAK Sinan (BSc)	KOCAK Sinan (BSc)
Mechatronika mérnök MSc hallgató	MSc Student on Mechatronics engineering
Óbuda University	Óbuda University
Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet	Faculty of Banki donalt
Sinankocaak@gmail.com	Sinankocaak@gmail.com
orcid.org/0000-0002-7400-5109	orcid.org/0000-0002-7400-5109

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-03-0366_Sinan_Kocak.pdf

Bali Tamás

HELIKOPTERVEZETŐK MŰVELETI FELADATOKRA TÖRTÉNŐ KÉPZÉSNEK SZÖVETSÉGESI MEGKÖZELÍTÉSE

A többnemzeti környezetben teljesített katonai forgószárnyas feladatok végrehajtásai több esetben nehézségekbe ütköztek a benne résztvevő nemzetek eltérő harcászati felfogásai, illetve a gépszemélyzetek különböző repülési jártasságainak okán. A műveleti siker megkívánja azt, hogy a benne résztvevő helikoptervezetők rendelkezzenek az elvárt műveleti repülési képesítésekkel. Olyan szintű és jellegű képesítésekkel, melyek biztosítják a zökkenőmentes interoperabilitást. Természetszerűleg a NATO szabványosítási feladatait ellátó szervezetek sem mehetnek el e feladat mellett. Megkezdődött a témával kapcsolatos kidolgozói munka, melynek részleteivel foglalkozik tanulmányom.

Kulcsszavak: *helikopter, helikoptervezető, jártasság, kiképzés, forgószárnyas feladatok*

BEVEZETÉS

A németországi Kalkarban lévő NATO Légierő Kompetencia Központ (a továbbiakban: JAPCC[1]) több mint négy évvel ezelőtt kiadta az ún. „Enhancing NATO's Operational Helicopter Capabilities" [1] című tanulmányát, melyben elemezve a NATO haderők helikopteres fegyvernemének képességeit, lehetőségeit és azonosított több alkalmazási akadályt. Ezek közül a fontosabbak:

- a nemzetek által eltérően értelmezett forgószárnyas harceljárások, melyeket tovább nehezít az amerikai és európai helikopter erők közötti diszharmónia;
- a koalíciós műveletekben résztvevő forgószárnyas gépszemélyzetek eltérő kiképzettsége;
- a szövetséges műveletekben résztvevő, a nemzetek által biztosított helikopterek alacsony száma;
- a többnemzeti helikopteres kiképzések és gyakorlatok alacsony száma;
- a helikopterek egymás közötti, illetve a támogatott szárazföldi erőkkel folytatott (titkosított) kommunikációját biztosító berendezések kompatibilitási problémái;
- a nemzetközi alapokon nyugvó olyan tanfolyami képzési forma hiánya, mely a helikopteres műveletek tervezőit és irányítóit egységes szabványnak megfelelően képezné;
- a korlátozott formában megvalósuló nemzetek közötti tapasztalatcserét.

Amellett, hogy a problémák egy részének megoldására a tanulmány önmaga is javaslatot tett, bizonyosak azóta is megoldatlanok maradtak. Ezek közé tartozik a helikopter gépszemélyzetek műveleti alkalmazásához szükséges kiképzettségi követelményeinek egységesítési kérdése, mellyel a brüsszeli székhelyű NATO Szabványosítási Ügynökség (a továbbiakban: NSA[2]) helikopter műveletek egységesítéséért felelős munkacsoportja (a továbbiakban: HISWG[3]) kezdett el foglalkozni.

[1] JAPCC – Joint Air Power Competence Center
[2] NSA – NATO Standardization Agency
[3] HISWG – Helicopter Inter Service Working Group

A munka végcélja az volt (és az ma is), hogy kidolgozzanak egy olyan szabványosított, a nemzetek által egységesen elfogadott ATP-90[4] elnevezésű dokumentumot, mely egyértelműen meghatározza a műveletekben résztvevő nemzetek számára a forgószárnyas gépszemélyzetei minimális kiképzettségi követelményeit.

A HISWG a JAPCC 2015 júliusában kiadott „Standardization of Qualification for NATO Helicopter Crews in Support of Land Operations" című újabb tanulmányában[2] foglalt javaslatok és irányelvek alapján mára kidolgozta az ún. „ATP-90 – Minimum Core Competence levels and Proficiency of Skills for Heicopter Crew for NATO Operations" elnevezésű dokumentum tervezetét, ami hangsúlyozottan hívja fel a figyelmet a szárazföldi műveletek támogatásában résztvevő helikopter gépszemélyzetek kiképzettségi követelményeinek egységesítésének fontosságára.

HELIKOPTERVEZETŐK KÉPZÉSE ÉS A KIKÉPZETTSÉGI SZINTEK

A helikoptervezetők kiképzése – ideális esetben – több fázisból épül fel. Ezekben kell lennie egy olyannak, ahol az akkor még helikoptervezető jelölt az alapvető repüléstechnikai elemeket sajátítja el, amit majd egy általános, mégis alapszintű műveleti képzés követ. Az alapkészségek és műveleti eljárások elsajátítása után következhetnek a specializációk, melyekkel egy adott személyt képessé tehető olyan repülési feladatok végrehajtására, melyek az első csapatbeosztása ellátásához nélkülözhetetlenek. Ezek után részleteiben érdemes meghatározni az alap-, és a műveleti repülések képzési elemeit.

Helikoptervezetők képzése

A JAPCC által kidolgozott kiképzési struktúrában is kontrasztosan elkülönülnek felkészítési fázisok. Az ún. „**Initial Qualification Training**" (a továbbiakban: IQT) biztosítja a helikoptervezetőknek azt az alapképzettséget, melynek birtokában az adott személy egy bizonyos típusú helikopter vezetésre (repüléstechnikai szempontból) képessé válik. Az IQT hangsúlyozottan csak repüléstechnikai jellegű képzés, mely nélkülözi a műveleti elemek elsajátítását. Ennek eredményeként a helikoptervezető megszerzi az un „Basic Aircraft Qualified" jogosítást, mely a képzésbe bevont légijárműre vonatkozó alapképzettséget jelent.

Az IQT-t követi az un „**Mission Qualification Training**" (a továbbiakban: MQT) elnevezésű haladó repülés-technikai képzési fázis. E kiképzési fázison belül a helikoptervezetők azokat a repülési készségeket sajátítják el, melyek elengedhetetlenül szükségesek lesznek a későbbi harcászati képzésükhöz. Ennek fontosabb elemei az NVG-vel történő, valamint a földközeli és terepkövetéses módszerrel megvalósuló repülések, az ellenséges támadó eszközök elleni önvédelmi manőverek begyakorlása, a hegyvidéki repülések, a poros területeken történő fel- és leszállási manőverek, a külsősúlyos repülések, stb. Az MQT eredményeként a helikoptervezető megszerzi az ún. „Basic Mission Capable" jogosítást, mely lehetőséget nyújt a harcászati repülőkiképzés megkezdésére.

Ennek megfelelően, az MQT után kezdhető meg az a harcászati repülő-kiképzési fázis, melyet a szakirodalom un „**Continuation Training**"-nek nevez (a továbbiakban: CT).

[4] ATP – Allied Tactical Publication

A CT során a helikoptervezető elsajátítja mindazon repülési készségeket, melyek a harceljárások teljesítéséhez szükségesek, majd ezek összefűzésével megkezdődhet a harceljárások lerepülése. A helikoptervezető a képzésbe bevont helikopterrel teljesíti a repült kategóriájának megfelelő feladatokat. Például egy rajtaütési művelet kapcsán a szállítóhelikoptert vezetője a katonák kiszállítási, kirakási és kiemelési feladatait gyakorolja be, míg a harci helikoptert vezetője a közel légiharc fegyveres támogatási feladatait sajátítja el. A CT eredményeként a helikoptervezető megszerzi az un „Mission Capable" jogosítást, mely lehetőséget nyújt számára, hogy harcászati feladatokat repülhessen. Mindemellett, a CT nemcsak a harcászati kiképzésre szolgál, hanem lehetőséget nyújt a már képzett helikoptervezetők korábban megszerzett jogosításainak fenntartására (hosszabbítására), illetve a bármely okból lejárt repülési jogosítások visszaszerzésére.

A kiképzettségi szintek

Egy helikoptervezető bevethetőségi mutatója a műveleti kiképzettségének szintjére utal. Meghatározza, hogy az általa vezetett légijármű harcászati alkalmazására történő felkészítése elérte-e a „Mission Capable" jogosítást, az érintett területeken rendelkezik-e élő jártasságokkal, vagyis milyenek a műveleti bevethetőségének lehetőségei.

A korlátozás nélkül bevethető (ún. „**Combat Ready**", a továbbiakban: CR) helikoptervezetőről akkor beszélhetünk, ha képes végrehajtani mindazon repülő-harcászati manővereket, melyeket az általa vezetett forgószárnyas légijármű a kialakítási, és felszereltségi sajátosságaiból adódóan lehetővé tesz, illetve melyeket az alakulata feladatrendszere tőle megkíván. A manőverek tekintetében élő repülési jártasságokkal kell rendelkeznie. Ahhoz, hogy ez megvalósulhasson, az egyénnek sikeresen kell teljesítenie az IQT-t, MQT-et és a CT-t. és a repülési elemeket a nemzeti szakhatóság által meghatározott lejárati időkorláton belül újra és újra teljesíti (azaz élő jogosításokkal, így jártassággal rendelkezik).

A helikoptervezető egy adott feladatra korlátozás nélkül bevethető (ún. „**Deployment Combat Ready**", a továbbiakban: DCR), ha ő a kiképzést ugyan megkapta, de csak az érintett műveletekhez szükséges jogosításokkal rendelkezik. Ennek kapcsán teljesítette az IQT-t és az MQT-t, azonban jogosításai és ezzel együtt jártasságai bizonyos repülési elemekből nem élők. Példaként, ha a helikoptervezető NVG-vel történő repülési jártassága nem él, akkor ő csak a nappali VMC[5] viszonyok közötti repülésekre jelölhető ki. Ugyanígy, ha a helikoptervezető elveszti a poros körülmények közötti vagy hegyi repülési jártasságait, akkor sivatagi vagy éppen hegyvidéki feladatokra nem vethető be.

A korlátozással bevethető (ún. „**Limited Combat Ready**", a továbbiakban: LCR) helikoptervezető az alapképzését (IQT) követő haladóképzése (MQT) még csak részben valósult meg. A műveleti repülés bizonyos elemeire már élő jogosításokkal rendelkezik, azonban a kiképzési hiányosságai okán valós műveletbe csak erős korlátozásokkal jelölhető ki. Megjegyzendő, hogy pont e hiányosságai miatt az ilyen személyt a JAPCC nem is tekinti harcászati szempontból bevethetőnek [2].

A negyedik bevethetőségi kategória olyan helikoptervezetőkre vonatkozik, akik még kiképzés alatt állnak. Az IQT-t talán már teljesítették, de az MQT-n belül még semmiféle műveleti jogosítást nem szereztek, így az ún. „**Not Combat Ready**" bevethetőségi kategóriába tartoznak.

5 VMC – Visual Meteorological Condition

A FORGÓSZÁRNYAS FELADATOK

A helikopterekkel teljesíthető feladatokat több módon lehet csoportosítani abból adódóan, hogy vonatkozásukban nagyon széleskörű alkalmazási módozatok ismertek vagy a szerkezeti kialakításuk, vagy pedig az általuk alkalmazott fegyverzetek miatt. Ugyanígy, más várható el egy könnyű futár, egy felderítő csapásmérő, egy szállító- vagy éppen egy harci helikoptertől. A feladatokat vizsgálhatjuk abból a szemszögből, hogy azok országvédelmi vagy éppen expedíciós jelleggel, többnemzeti környezetben valósulnak-e meg [3]. Az egyik, és talán a legkompetensebb megközelítés szerint, a feladatrendszer vizsgálatát a helikopterkategóriák szerinti műveleti alkalmazási körök alapján lehet megtenni. Ehhez nyújt segítséget a NATO Szabványosítási Hivatala által kiadott ATP-49(G) [4] megnevezésű dokumentum.

1. **Szállítási feladatok**, amely gyűjtőfogalomként a helikopterek alkalmazhatóságának legszélesebb körét öleli fel. A szállítás kategóriái és tartalmuk:
   - 1.1 *Légiszállítás* az élőerő-, és harci-technikai eszközök, illetve az utánpótlási anyagok légi úton történő áthelyezését jelenti a helikopter teherterében, illetve külső függesztményként.
   - 1.2 *Légi mozgékonysági műveletek* a szárazföldi erők számára a gyors reagálás lehetőségét-, a műveletek idején mozgékonyságot-, illetve a meglepetésre épülő harcvezetést biztosítják.
   - 1.3 *Légi deszant műveletek* során a helikopterek a szárazföldi erőket és technikai eszközeiket, illetve a harcuk fenntartásához szükséges felszereléseket légi úton juttatják ki a műveleti körzetbe, meghatározóan ejtőernyővel.
   - 1.4 *Légi egészségügyi kiürítés* (a továbbiakban: AE[6]) során a sérülteket légi úton – egészségügyi szakember(ek) felügyelete mellett – a sérülés helyszínéről az egészségügyi ellátó intézménybe vagy két ellátó intézmény között szállítják. Megjegyzendő, hogy a légiszállítás ugyan időhatékony lehetőség az életmentés szempontjából, ugyanakkor kiemelt stresszhatást gyakorolt a sérült szervezetére. Az AE-nak doktrinális szinten 3 alkategóriája ismert [12]:
     - 1.4.1 Az *előretolt légi egészségügyi kimenekítés* a műveleti területen (harci zónán) belül valósul meg közvetlenül a sérülés helyéről az egészségügyi ellátás első lehetséges pontjáig.
     - 1.4.2 A *harcászati légi egészségügyi kimenekítés* a műveleti területet (a harci zónát) elhagyva, közvetlenül a sérülés helyéről az egészségügyi ellátás első lehetséges pontjáig valósul meg.
     - 1.4.3 A *stratégiai légi egészségügyi kimenekítés* a sérült légi úton történő szállítását jelenti a műveleti területről a honi egészségügy ellátó intézménybe. Abban az esetben, ha ez a sérülés jellegéből adódóan időben túlzottan elhúzódó szállításhoz vezetne, akkor az történhet más NATO tagországok-, vagy éppen a legközelebbi béketerület egészségügyi intézményébe is.
2. A támadó feladatok során a harci vagy felfegyverzett helikopterek az ellenséges élőerőt és technikai eszközöket pusztítják vagy mozgásszabadságát bénítják. Alkategóriái az alábbiak:

[6] AE – Aeromedical Evacuation

2.1 *Légi lefogás*, mely az ellenséges harci potenciál megbontására vagy megsemmisítésére irányul még azt megelőzően, hogy az bevetésre kerülhetne a saját csapatok ellen. Ez a feladat olyan műveleti mélységben kell megvalósuljon, hogy az ellenséges erők egy esetleges válaszcsapása esetén ne legyenek képesek a saját erők pusztítására.

2.2 *Közvetlen légi támogatás* (a továbbiakban: CAS[7]), mely a szárazföldi erők harctevékenységének tűztámogatása céljából valósul meg olyan ellenséges célok ellen melyek a harcbavetés körzetében helyezkednek el. A CAS hatékonysága nagymértékben függ az azt vezető előretolt légiirányító (a továbbiakban: FAC[8]) tevékenységétől.

2.3 *Közel légi támogatás* (a továbbiakban: CCA[9]), mely a szárazföldi erők harctevékenységének tűztámogatására valósul meg olyan ellenséges célok ellen melyek a harcbavetés közvetlen körzetében helyezkednek el. Mivel a helikopterek tűzkiváltása közvetlenül a saját erők körzetében teljesül, ezért a CCA folyamán kiemelt jelentőséget kap a kommunikáció a légi és földi erők között. A helikopterek alkalmazása nem követeli meg a FAC alkalmazását. A CCA nem szinonim a CAS-el.

3 Légi tűzvezetés a helikopterek fedélzetéről valósul meg a tüzérségi lövegek, vagy a közvetlen légi támogatásban résztvevő repülőgépek vagy helikopterek tüzének koordinálása, vezetése érdekében. Tartalmazza a tűz kiváltásával, megfigyelésével és helyesbítésével kapcsolatos döntések sorozatát.

A helikopterek a manőverező képességük kihasználásával olyan megfigyelési pozícióba kerülhetnek (így hatékony tűzvezetést megvalósítva), mely a szárazföldi erők számára a rálátási nehézségeik miatt lehetetlen. Alkategóriái az alábbiak:

3.1 *Előretolt légi tűzvezetés* a helikopter fedélzetén elhelyezkedő FAC irányítása melletti CAS műveletek idején valósul meg.

3.2 *Tűzérségi légi tűzvezetés* a helikopter fedélzetén lévő megfigyelővel/irányzóval támogatott célkiválasztást és tűzérségi tűzhelyesbítést biztosít.

3.3 *Haditengerészeti légi tűzvezetés*, a tengeri és tengerparthoz közeli műveletek során történik, amely folyamán a haditengerészet tüzéreszközeinek tüzét támogatja a helikopter fedélzetén elhelyezkedő megfigyelő/irányzó.

4 A **légi felderítés** célja az információszerzés az ellenséges erők pillanatnyi tevékenységéről, a saját erők műveleteinek végrehajtásához fontosnak ítélt utakról, területekről. A helikopterek gépszemélyzetei a fedélzeti felderítő elektro-optikai vagy infraeszközeik használatával a műveleti döntéshozatalhoz elengedhetetlenül fontos információgyűjtést hajtanak végre. Alkategóriái és azok rövid tartalma az alábbiakban olvasható:

4.1 *Felderítés*, mely során vizuális és műszeres légi információszerzés történik az ellenség tevékenységével, elhelyezkedésével, felépítésével, összetételével kapcsolatban. Ez megvalósulhat különböző terepszakaszok tereptani feltérképezése érdekében is.

4.2 *Megfigyelés*, olyan módszeres, időben elnyúló tevékenység, mely a helikopter fedélzetéről valósul meg (vizuálisan vagy annak fedélzeti berendezéseivel) a légtérben, a földfelszínen vagy az az alatti tevékenységek figyelemmel kísérése érdekében. Történhet továbbá helyek és személyek tekintetében is.

---

7 CAS – Close Air Support

8 FAC – Forward Air Controller

9 CCA – Close Combat Attack

4.3 *Felderítői harcászati védelem* olyan légi felderítő tevékenység, melynek célja az ellenséges műveletekről szerzett információ biztosításával a korai előrejelzés és a saját erők időbeni riasztása.

5 Speciális feladatok

5.1 *Vezetés, irányítás és kommunikáció légi biztosítása* azokat a feladatokat öleli fel, melyek biztosítják a döntéshozatalban résztvevő, illetve a műveleteket irányító parancsnok tevékenységét a földi telepítési vezetési rendszerek elérhetetlensége esetén. Kategóriái:

5.1.1 **Légi vezetés és irányítás**, mely különösen a lakott területeken végrehajtott műveletek „dinamikájához" igazodóan segíti elő a rugalmas vezetést azzal, hogy a művelet irányítására kijelölt parancsnok és törzse számára nagy mozgásszabadságot biztosít. A helikopter fedélzetéről a parancsnok azonnali információt kap a saját erők és ellenséges csapatok harctevékenységéről. A helikoptereken kialakított légi vezetési pontok a fedélzeti felderítő-, illetve kommunikációs eszközök képességeinek kihasználásával biztosítják a vezetéshez szükséges feltételeket.

5.1.2 **Vezetés és irányítás támogatása**, mely a parancsnokok, törzsek és összekötő személyek gyors, időhatékony légi áttelepítését szolgálja. Emellett a fedélzeten elhelyezkedő parancsnok valós idejű légi helyzetképet kaphat a hatáskörébe tartozó műveleti területről.

5.1.3 **Légi kommunikációs átjátszás**. A helikopterek üzenetek és adatok átjátszására is alkalmazhatók, abban az esetben, ha a földi eszközök képességei azt nem teszik lehetővé. Ráadásul a légi átjátszással megnő a kommunikációs hatótávolság.

5.2 *Személymentési eljárás* (a továbbiakban: PR[10]) magába foglalja mindazon katonai, diplomáciai erőfeszítéseket, melyek (a műveleti területen) a saját erőktől elszigetelődött személyek mentését és katonai rendszerbe történő visszaillesztését biztosítják. A PR-nak több változata ismert, úgymint a békeidős, nemzeti keretek között megvalósuló kutatás-mentés (a továbbiakban: SAR[11]), a műveleti viszonyok közötti, alkalmi harci kötelékben teljesülő harci kutatás-mentés (a továbbiakban: CSAR[12]), a műveleti poszttraumás stressz oldását követő Reintegrálás (a továbbiakban: CR[13]) és a nem konvenciális erőkkel támogatott személymentés (a továbbiakban: NAR[14]).

A PR műveletekben a szállítóhelikopterek kutatási és mentési-, a harci helikopterek pedig azok támogatását, illetve CCA feladatokat hajtanak végre.

5.3 *Humanitárius jellegű feladatok*. A katonai helikopterek széleskörűen alkalmazhatók nem katonai jellegű feladatok ellátására. Ezek meghatározóan a különböző nemzetközi szervezetek humanitárius segély akcióinak élelem és gyógyszerszállítási feladatai lehetnek. Általánosságban megközelítve ez az ellenségeskedésben részt nem vevő polgári személyek megsegítésére irányuló légi tevékenység.

[10] PR – Personal recovery
[11] SAR – Search and Rescue
[12] CSAR – Combat Search and Rescue
[13] CR – Combat Recovery
[14] NAR – Non-conventional Assisted Recovery

5.4 *Katasztrófa elhárítási feladatok* a természeti és mesterséges katasztrófák megelőzésében, illetve következményeinek felszámolásában résztvevő katonai helikopterek alkalmazását öleli fel.

E téren ki kell emelni a légi tűzoltást, mely a külső függesztményként szállított tűzoltó víziballon (ún. Bambi Bucket) eszközzel hajtanak végre.

A FORGÓSZÁRNYAS FELADATOKHOZ TARTOZÓ HELIKOPTERVEZETŐI KÉPESÍTÉSEK KÉRDÉSEI

A helikopteres fegyvernem az előzőekben bemutatottak alapján szerteágazó feladatrendszerrel rendelkezik, mely bizonyos tekintetben specializációt követel meg. Példaként vizsgálhatóak, - mintegy összehasonlításként - a nemzeti légi kutató-mentő készenlét biztosításához-, illetve a különleges erők tevékenységének támogatásához szükséges képzettségi kompetenciák. A kutató-mentő feladatrendszer két terület köré csoportosítható:

1. kis és közepes magasságon teljesülő vizuális vagy műszeres kutatási repülési eljárásokra;

2. a mentési eljárásokra, mely tartalmazza mindazon helikopteres repülési elemeket, amelyek a mentésben résztvevő katonák (ejtőernyős és egészségügyi) tevékenységét támogatják[5].

Ezzel ellentétben a különleges műveletek támogatásához a helikopter gépszemélyzetének képesnek kell lennie például éjjel, terepkövetéses módszerrel történő repülésekre (NVG alkalmazásával), a légi rajtaütési harceljárás végrehajtására nappal és éjjel akár városharc körülményei mellett, katonák deszantolására gyorslecsúsztató- (a továbbiakban: FRIES[15]), illetve kiemelő rendszerek (a továbbiakban: SPIES[16]) alkalmazásával.

Annak érdekében, hogy az előzőekben leírt feladatok végrehajthatóvá váljanak, a HISWG kidolgozott egy olyan helikoptervezetői kompetencia gyűjteményt, mely meghatározza a teljesítésekhez szükséges kiképzési ágakat és az azok útján elérhető jogosításokat. Így, a feladatok és kompetenciák tudatában, azok már összeilleszthetővé válnak, kialakítva ezzel egy olyan mátrixot, mely pontos képet ad a helikoptervezetők műveleti bevethetőségével kapcsolatban. Ennek a mátrixnak az egységes értelmezésével, minden, a NATO műveletben résztvevő nemzet által történő elfogadásával és alkalmazásával elérhetjük azt a célt, hogy a forgószárnyas gépszemélyzetek egységes kiképzettség mellett legyenek bevethetők. Egy ilyen mátrix létrehozásához elengedhetetlen meghatározni a szükséges forgószárnyas kompetenciákat.

1. **Harci manőverezési képesítés**, mely magas ellenséges fenyegetettség mellett valósul meg merev- vagy forgószárnyas légijárművek, illetve földi telepítésű légvédelmi eszközök ellentevékenységének elkerülésére. A sikeres manőverezés több összetevő feltétele:
   1.1 *az ellenséges eszközök időbeni azonosításának képessége,*
   1.2 *az ellenséges erők által alkalmazott harceljárások ismerete,*
   1.3 az ellenséges eszközök, fegyverzetek ismerete (képességek, alkalmazási sajátosságok, korlátok),

[15] FRIES – Fast-Rope Insertion/Extraction System

[16] SPIES – Special Patrol Infiltration/Exfiltration System

1.4 az ellenmanőverek doktrinális szintű ismerete, az azokra irányuló repülő-kiképzettség megléte.

2. **Kötelékrepülő képesítés**, mely biztosítja az alkalmi harci kötelékbe szervezett helikopterek közös feladat végrehajtását.
3. **Földközeli repülő képesítés**, mely biztosítja a helikopterekkel támogatott műveletek rejtettségét, a harcászati rajtaütés lehetőségét. E repülési módozatnak több fajtája ismert, úgymint földközeli (terep felszíne felett 10–15 méterrel) és kontúr (a terep természetes és mesterséges akadályai felett 10 méterrel) és terepkövetéses (terep felszíne felett 10 méternél alacsonyabban, a továbbiakban: NOE[17]) repülések, melyek megvalósulhatnak mind nappal és éjjel.
4. **Műszerrepülő** (a továbbiakban: IFR[18]) **képesítés**, melyre minden olyan esetben szükség van, amikor a látás utáni repülés valamely oknál fogva nem teljesíthető.
5. **Eszközökkel/fedélzeti berendezésekkel támogatott éjjeli repülési képesítés**. Éjjeli viszonyok között repülések végrehajthatók a környező fények (hold, csillagok, földi fényforrások) vagy a kisugárzott hő felerősítése útján képalkotásra képes eszközök és berendezések használatával.

   A kiképzésnél figyelembe kell venni, hogy ezen eszközök korlátjai miatt (mélységérzet elvesztése, beszűkült látószög, csökkent láthatóság a földi referenciapontok tekintetében) a helikoptervezetésben nehézségek jelentkeznek.
6. **Csökkent látási viszonyok** (a továbbiakban: DVE[19]) **közötti repülésre való képesítés**. DVE körülményekről akkor beszélünk, amikor a csökkent látási viszonyok miatt a légijármű vezetésében nehézségek jelentkeznek a térbeli helyzet megítélési hibáiból fakadóan. A helikoptervezető nem képes a látás szerinti repülés viszonyok (a továbbiakban: VMC[20]) között megszokott biztonsággal a saját helyzetének értékelésére, a környezetéből érkező ingerek maradéktalan észlelésére.

   DVE kialakulhat füst, homok, por, köd, felhőzet, eső, hó, szmog miatt, illetve egyszerűen éjjeli körülmények között, amikor a megvilágítás csökken. DVE körülményeket a helikoptervezető önmagának is létrehozhat, amikor az porral vagy porhóval fedett területekről száll fel (vagy éppen száll le).
7. **Kirakási és kiemelési képesítés** helikopterekkel természetszerűnek tűnik azaz, hogy a katonák kirakása és kiemelése a légijármű megadott pontra történő leszállását követően történik. Ez azonban ez nem minden esetben valósítható meg. Városharcok idején, akadályokkal átszabdalt területen (pl. erdőknél), vízfelszíni műveletekkor, nagy lejtőszögű területeknél például nincs lehetőség leszállásra, így a kirakás vagy kiemelés csak függési üzemmódon történhet. Légideszant műveletekkor a kirakás ejtőernyős dobással történik. A kirakásokhoz és kiemelésekhez szükséges kompetenciák a részleteiben az alábbiak:

   7.1 *Speciális gyorskirakó és kiemelő rendszer (a továbbiakban: SPIES[21]) használatára való képesítés.* Míg a SPIES egyik vége a helikopterhez van erősítve, addig a katonák magához az eszközhöz vannak csatlakoztatva. A helikopter úgy szállítja

[17] NOE – Nap of the Earth
[18] IFR – Instrument Flight Rules
[19] DVE – Degraded Visual Environment
[20] VMC – Visual Meteorological Condition
[21] SPIES – Special Patrol Infiltration and Exfiltration System

a kirakási helyszínre a katonákat, hogy azok az eszközön lógnak. Kirakáskora helikopter megfügg, majd süllyedni kezd. A katonák a földetérésükkör lecsatlakoznak az eszközről. A kiemelés fordított elvvel történik.
A rendszer tartalmazhat csatlakoztatást biztosító alpin-technikai eszközökkel kiegészített kötelet vagy kötéllétrát.

7.2 *Gyorskirakó kötél (a továbbiakban: FRIES[22]) használatára való képesítés*. A katonák a helikopterre függesztett kötélen ereszkednek le a kirakási pontra. Esetenként ezen a kötélen kisebb függesztő füleket is elhelyeznek a kiemelés biztosítása érdekében.

7.3 *Vízideszantra (a továbbiakban: HELO casting) való képesítés*, mely kapcsán a katonák a vízfelszín felett alacsonyan (maximálisan 5 méter), kis sebességgel (v_{rep}< 40 km/h) repülő helikopter oldal vagy hátsó tehertérajtaján keresztül ugranak a vízbe.

7.4 Alpintechnikai lecsúsztatásra (a továbbiakban: Rappel) való képesítés.

7.5 *Csörlőzésre (a továbbiakban: Hoisting) való képesítés* a helikopter fedélzeti csörlőberendezésének alkalmazásával.

7.6 Ejtőernyősök dobására való képesítés.

8. **Fedélzeti fegyverrendszerek alkalmazására való képesítés** magába foglalja a gépágyú, a nem irányított és irányított rakéták használatára történő képzést a bombavetéssel. Ehhez tartozik a fedélzeti lövészekkel történő közös képzés végrehajtása is.
9. **Terhek külsősúlyként történő szállítására vonatkozó képesítés.** Azzal, hogy a helikopterek nagykiterjedésű terheket (például fegyvereket) képesek gyorsan, a létfontosságú helyekre szállítani, nagy műveleti szabadságfokot biztosítanak a műveleteket vezető parancsnokoknak. Helikoptervezető kiképzés szempontjából három típusú külsősúlyt lehet megkülönböztetni:
   9.1 *Nagysűrűségű terhek*, melyek a légiszállítás folyamán a nagy tömegükből adódóan stabilan viselkednek, nem hajlamosak a kilengésekre,
   9.2 *Kis sűrűségű terhek*, melyek amellett hogy nagy terjedelemüek, kis tömegükből adódóan a repülési sebesség függvényében instabilan viselkednek (hajlamosak a nagymérvű kilengésekre),
   9.3 *Aerodinamikai terhek*, melyek a formájukból adódóan a repülési sebesség növekedésével egyre stabilabban viselkednek, azaz – tömegüktől függetlenül – minél nagyobb a sebesség, annál kevésbé lengenek ki.
10. **Hegyvidéki repülési képesítés.** Doktrinális szempontból [11] akkor kell hegyvidéki terepről beszélni, amikor a terepdomborzat magasságkülönbsége a vizsgálati pontot környező 10 mérföldes körzetben eléri a 900 méteres szintkülönbséget. Az ilyen környezetben végrehajtásra kerülő repülések sajátos képzettséget igényelnek a lejtőszelek fel és leáramlásainak, illetve az alacsony légnyomás miatti csökkent hajtómű teljesítmény negatív hatásai miatt.
11. **Nagykiterjedésű vízfelszín feletti repülési képesítés.** A víz hullámzása miatt a helikoptervezetőknél térbeli helyzetértékelési zavar jelentkezik. A repülést (főleg a függési üzemmódon megvalósuló személymentési feladatokat) nehezítik a gyakran tapasztalható erős szelek.
12. **Tűzoltó ballon alkalmazására történő képesítés**. A légi tűzoltás helikopterre függesztett, vízzel tölthető ballonnal valósul meg, mely egyfajta külsősúlyos repülési készéget igényel.

[22] FRIES – Fast Rope Insertion and Extraction System

Az oltási feladat végrehajtása azonban speciális repülési készségek meglétét is megköveteli a magas hőmérsékleti, illetve alacsony légnyomási viszonyok miatt. A sikeres tűzoltáshoz figyelembe kell venni a az előbbi viszonyokat, a szél irányát és sebességét, helyesen kell megválasztani a repülés sebességét és magasságát.

13. **Vegyi-, biológiai- és sugárszennyezett** (a továbbiakban: CBRN[23]) **környezetben történő repülési képesítés.** Korunk biztonsági helyzetében egyre inkább kell azzal számolni, hogy a helikopterrel támogatott műveletek körzetében CBRN hatások jelentkeznek.
    A helikoptervezetőknek képesnek kell lenniük az egyéni védőfelszerelésük használatára, az abban történő légijármű vezetésre, megfelelően kezelve a fokozott pszichés terhelés negatív hatásait.
14. **Légi utántöltési képesítés,** mellyel a forgószárnyas műveletek idejét és hatótávolságát lehet megnövelni.

FORGÓSZÁRNYAS FELADAT ÉS HELIKOPTERVEZETŐI KÉPESÍTÉS MÁTRIX

Azután, hogy meghatározásra kerültek a forgószárnyas feladatok és az azok teljesítéséhez szükséges helikoptervezetői kompetenciák, már mindenki számára (jelen esetünknek minden nemzetnek) mátrix-szerűen megjeleníthető a műveletek végrehajtásához megkövetelt jártassági szintek. A mátrix nyújt segítséget a kiképzési követelmények egységesítéséhez Utóbbiak meghatározását azonban árnyalttá teszi az, hogy nem minden esetben egyértelmű, hogy egy adott feladathoz egy bizonyos képesítés megléte, kötelező vagy csak javasolt. Ugyanígy, figyelembe lehet venni az aktuális műveleti igényeket és környezeti viszonyokat ahhoz, hogy eldönthetővé váljon a képesítés szükségessége. Példaként: Légiszállítás végrehajtásához vajon kötelező-e a földközeli repülési képesítés a fenyegetettség csökkentése érdekében, vagy csupán javasolt, ha megfelelő felderítői támogatás biztosított a körzetre. Maradva a légiszállításnál, a hegyvidéki repülési képesítés nem lehet minden esetben követelmény, hiszen nem valószínű, hogy mindig hegyi viszonyok között kell repülni.

Az alábbi 1. táblázat mutatja be az említett mátrixot. Az alkalmazott rövidítések:

- X – szükséges a képesítés;
- J – javasolt a képesítés;
- M – Műveleti feladatfüggő a képesítés szükségessége;
- K – környezetfüggő a képesítés szükségessége;
- nincs szükség a képesítésre.

Ezzel vagy a tartalmában ehhez hasonlatos mátrix használatával minden nemzet számára egyértelművé válik, hogy milyen képesítésekkel kell rendelkezniük egy adott feladat teljesítéséhez. Ez pontos iránymutatást ad a helikoptervezetői kiképzés irányultságára.

A problémát mégis ott jelentkezik, hogy a nemzetek között nincs egyetértés a képesítési követelményekben. A JAPCC ajánlásait még el is fogadták, azonban a HISWG által lefektetett képesítési követelmények körül már komoly vita alakult ki. Amellett, hogy a mátrix a minimum követelményeket tartalmazza, mégis határozott különbség van a nemzetek között e szint

[23] CBRN – Chemical, biological, radiological and nuclear

értelmezése körül. Míg egyeseknek a minimum azt jelenti, hogy egy-két képesítésen túl nincs is szükség egyebekre, mások azt szorgalmazzák, hogy minden feladat kapcsán az összes képesítést figyelembe kell venni a műveleti igény/feladat körülményei szerint. Ennek megfelelően az összes eshetőséget számba kell venni, és a minimum követelményeket ehhez kell kialakítani.

Feladat típusok	Helikoptervezetői képesítések																						
	Légi utántöltési képesítés	Harci manőverezés			Kötelék repülési képesítés	Földközeli repülés			Külsősúlyos repülés		DVE képesítés	CBRN képesítés	Hegyvidéki képesítés	Vízfelszín feletti repülő képesítés	IFR képesítés	Eszközökkel támogatott éjjeli repülési képesítés	Kirakás és kiemelés						Légi lövészeti képesítés
		Merevszárnyas elleni képesítés	Forgószárnyas elleni képesítés	Földi telepítésű eszköz elleni		Földközeli repülés	Kontúrozás	NOE képesítés	Külsősúlyozás	Vízi ballon használat							FRIES képesítés	SPIES képesítés	HELO-casting	Rappel képesítés	Csörlőzési képesítés	Ejtőernyős dobási képesítés	
Szállítási feladatok																							
Légi szállítás	-	M	M	J	X	J	-	-	M	-	-	K	M/K	M	-	J	-	-	-	-	-	-	M/J
Légi mozgékonysági műveletek	M	M	M	X	X	X	X	X	M/J	-	X	K	M/K	M/K	K/J	X	M/J	M/J	M/J	M/J	M/J	M/J	X
Légi deszant	M	M	M	X	M	-	-	-	-	-	K/J	K	-	M/K	K/J	X	-	-	-	-	-	X	-
Légi egészségügyi kiürítés	-	M	M	X	X	X	X	M/J	-	-	K/J	K	M/K	M/K	K/J	M/J	-	-	-	M/J	J	-	M
Támadó feladatok																							
Légi lefogás	-	M/J	M/J	X	X	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	K/J	X	-	-	-	-	-	-	X
CAS	-	M/J	M/J	X	X	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	K/J	X	-	-	-	-	-	-	X
CCA	-	M/J	M/J	X	X	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	K/J	M/J	-	-	-	-	-	-	X
Légi tűzvezetés																							
Előretolt	-	M	M	X	-	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	J	X	-	-	-	-	-	-	X

Tüzérségi	-	M	M	X	-	X	X	X	-	-	-	K	M/K	-	J	M/J	-	-	-	-	-	X
Haditen-gerészeti	-	M	M	X	-	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	J	M/J	-	-	-	-	-	-
Légi felderítés																						
Felderítés	-	M/J	M/J	X	-	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	J	X	-	-	-	-	-	X
Megfigye-lés	-	M/J	M/J	X	-	X	X	X	-	-	-	K	M/K	M/K	J	X	-	-	-	-	-	X
Felderítői harcászati védelem	-	M/J	M/J	X	-	X	X	X	-	-	M/J	K	M/K	M/K	J	X	M	-	-	M	M	-	X
Speciális feladatok																						
Vezetés, irányítás és kom-munikáció légi biztosí-tása																						
Légi veze-tés és irá-nyítás	-	M	M	X	-	X	X	X	-	-	-	K	K	M/K	J	X	-	-	-	-	-	-
Vezetés és irányítás támoga-tása	-	X	X	X	-	X	X	X	-	-	K	K	M/K	M/K	J	X	-	-	-	-	-	-
Légi kom-munikáci-ós átját-szás	-	M	M	X	-	X	X	X	-	-	-	K	K	M/K	J	X	-	-	-	-	-	-
Személy-mentési eljárás																						
CR	-	M	M	X	X	X	X	X	-	-	K/J	K	M/K	M/K	J	X	J	J	J	J	J	X
CSAR	M	M	M	X	X	X	X	X	M	-	X	K	M/K	M/K	X	X	X	X	M/J	X	X	J	X

SAR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	K	M/K	M/K	X	M/J	-	-	J	J	X	J	-
Humanitárius feladatok	M	M	M	X	J	-	-	-	-	-	K	K	-	M/K	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Katasztrófa elhárítás	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	K/J	-	M/K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. táblázat Forgószárnyas feladat és helikoptervezetői képesítési mátrix [2]

A légi egészségügyi kiürítés kapcsán a kötelékrepülő képesítésre lehet úgy tekinteni, hogy fenyegetettség esetén a harci helikopteres támogatás miatt arra szükség van, de úgy is, hogy ez nem is teljesülhet magas fenyegetettség mellett (mert akkor már CR feladatról beszélünk), így nincs is erre szükség [6]. Ugyanígy, egy légi felderítés végrehajtásakor az ellenséges légijárművek elleni harcászati manőverezési képesítés az egyik nemzet számára feladatfüggőnek minősített, míg a másiknak javasolt a megléte. A nézőpontok különbözőségét érzékelteti az is, hogy a 2016 decemberében hazánknak megküldött hatodik változatú mátrixban még 61 db módosító javaslatunk volt.

A leírt disszonancia előrevetíti, hogy a kidolgozói munka még sokáig tarthat és valószínűsíthetően konszenzus nem is születik. Az NSA ki fog adni egy olyan Stanag-et, mely leginkább tükrözi a többség álláspontját. Erre válaszul a kisebbséghez tartozó nemzetek a Stanag-et valószínűsíthetően csak kitételekkel vezetik be (ha egyáltalán bevezetik). Ez a dilemma így visszavezet az alapproblémához, mely szerint a műveleti területen nagymérvű eltérések tapasztalhatók a nemzetek helikoptervezetői képzettségi szintjei között.

A helyzetet tovább árnyalhatja két dolog. Az egyik a képesítés tartalma, a másik pedig a jártasság fenntartásához szükséges repülések sűrűsége. A képesítés tartalmánál jelentkező problémát talán azzal lehetne legjobban tisztázni, ha megértjük, hogy messze nem ugyanaz a hegyvidéki repülési képesítés annál aki ezt a kiképzési ágat 1000 méteren, és annál aki ezt 4000 m-en teljesíti. Papír alapján ugyanazzal a képesítéssel rendelkeznek, de mégsem. Ehhez hasonló különbségek jelentkezhetnek például az IFR, a DVE vagy éppen a kötelék képesítések tekintetében is. Ugyanígy, szabályozatlanság hiányában, nemzetenként eltérő módon egy bizonyos repülési jártasság fenntartható 30 naponkénti, vagy akár 6 havi ismétlésekkel is. Belátható, hogy nem jelent ugyanolyan szintű repülési jártasságot az, ha a helikoptervezető 30 naponta ismételi a poros terültről történő repüléseket mint az, ha azt csak 180 naponta hajtja végre.

Felismerve ezen anomáliákat, a HISWG megkezdte a képesítések egységesítésére vonatkozó kidolgozói munkát. Ezzel együtt azonban a jártasságok fenntartását továbbra is döntően nemzeti hatáskörben tervezi tartani. Nyilvánvaló az, hogy az egyes nemzetek gazdasági lehetőségei által behatárolt repülési idők mértéke negatívan befolyásolja a jártasságok fenntartásához kellő kötelező ellenőrzések sűrűségét, mégis kompromisszumos megoldást kell találni e téren is.

BEFEJEZÉS

A szövetséges keretek közötti, többnemzeti formában teljesülő forgószárnyas feladatok végrehajtása megköveteli azt, hogy a benne résztvevő nemzetek helikoptervezetői egységes repülési képzettségekkel rendelkezzenek, és ezek egységes értelmezést nyerjenek a nemzetek körében. Ezen interoperabilitási cél elérése érdekében a NATO NSA HISWG a JAPCC-vel történt együttműködése eredményeként elkészítette a vonatkozó dokumentumot, melynek véleményezését „csend eljárás” keretében tette lehetővé a nemzetek körében.

A dokumentum kidolgozása több olyan nézetkülönbséget hozott a felszínre, mely ugyan nagymértékben lassította a tevékenységet, de irányultságát nem változtatta meg. Eddig is és ezután is az NSA honlapján kialakított „munkacsoport fórum” felületen lehetőség van a nemzeti

javaslatok, észrevételek, esetlegesen módosítások megtételére interaktív módon.

A végeredmény még ez évben az lesz, hogy kiadnak egy Stanag-et, mely pontos iránymutatást ad a nemzeteknek a műveletekhez szükséges helikoptervezetői képzettségi követelményekről, a jártasságok fenntartásának rendszeréről és a képzettségek tartalmáról. Ezzel a műveleti parancsnokok erőforrás-gazdálkodása könnyebb lesz, a műveleti tempó növekszik, melynek eredményeként a kezdeményező képesség a NATO oldalán marad.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Enhancing NATO's operational helicopter capabilities, JAPCC, 2012. url: https://www.japcc.org/portfolio/enhancing-natos-operational-helicopter-capability/
[2] Standardization of qualification for NATO helicopter crews in support of land operations, JAPCC, 2015., url: https://www.japcc.org/portfolio/standardization-qualifications-nato-helicopter-crews-support-land-operations/
[3] AJP-01 Szövetséges Összhaderőnemi Doktrína (Kiadó: HM HVK Hadműveleti Csoportfőnökség, Budapest, 2003
[4] ATP-49(G) Edition G Version 1 Use of Helicopter in Land Operations, NATO Standardization Office, 2015
[5] MH Légierő Doktrína (Kiadó: MH Légierő Parancsnokság, Kiadva: Veszprém, 2004),
[6] STANAG 3204 Edition 6 Aeromedical Evacuation, NATO Military Agency for Standardization,: 1999.

There are numerous challenges while carrying out rotary wing tasks in the multinational operational environment these days. It is because of the differently used technics, tactics and procedures amongst the participating nations and distinct pilot proficiencies. Operational success requires from all the nations, that their helicopter pilots have adequate operational pilot proficiencies. That kind and level of pilot proficiencies, which provide interoperability. Naturally, NATO standardization agencies cannot ignore this task. They have started the standardization work which is the subject of my study.

Keywords: *helicopter, helicopter pilot, currencies, training, rotary wing tasks*

BALI Tamás ezredes
Bázisparancsnok helyettes
MH 86. Szolnok Helikopter Bázis
bali.tamas@hm.gov.hu
orcid.org/0000-0001-6098-8602

Col. Tamás BALI
Deputy base commander
HDF 86th Szolnok Helicopter Base
bali.tamas@hm.gov.hu
orcid.org/0000-0001-6098-8602

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-04-0368_Bali_Tamas.pdf

Ványa László

HELIKOPTEREK ELEKTRONIKAI HADVISELÉSI ALKALMAZÁSAI A 90-ES ÉVEKIG

Ez az írás azokat a helikopteres alkalmazásokat mutatja be, amelyeken elektronikai hadviselési célú berendezéseket alkalmaztak. A Varsói Szerződés országai első sorban orosz berendezésekkel rendelkeztek, de Magyarországnak saját fejlesztései is voltak: a LEFOGÓ-1A, LEFOGÓ-1B és LEFOGÓ-1C fedélzeti zavaró berendezések. A cikkben bemutatásra kerültek az orosz Mi-17PP zavaró helikopter, és a nyugati országok eszközei közül az EH-60A Quick Fix II és a SOTAS radar rendszer. Az R-040 egyszeri felhasználású zavaró adókat is helikopter segítségével dobták le a célterületre. A cikk második része foglalkozik majd az új elektronikai hadviselési helikopterekkel a világ különböző országaiból.

Kulcsszavak: *helikopter, elektronikai hadviselés, légi felderítés, zavarás, fedélzeti radar rendszer, oldalfelderítő radar*

BEVEZETÉS

Az elektronikai hadviselés – korábban rádióelektronikai harc - technikai eszközei között mindig helye volt a forgószárnyas eszközöknek is. A levegőből végrehajtott rádióelektronikai felderítés és zavarás a földi eszközökhöz képest kedvezőbb hullámterjedési viszonyok között működhetett, a hullámterjedést kevésbé zavarták a terepakadályok, a felszíni építmények és a növényzet.

A klasszikusnak mondható – 90-es évek előtti – helikopterek elsősorban az elektronikai hadviselési berendezések hordozó eszközei voltak, a biploáris világrend felbomlását követő[1] technológiai fejlődés (digitalizáció, irányított energiájú fegyverek, új rakéta eszközök, stb.) és a háborús konfliktusok tapasztalatai azonban gyökeres változást hoztak a helikopterekkel kapcsolatos elektronikai hadviselési gondolkodásban.

Ezen írás néhány példával kívánja szemléltetni a 90-es évek előtti időszak technológiai irányait, majd egy következő cikkben a megváltozott felfogásra kíván példákat, konkrét eszközöket, fejlesztési programokat bemutatni.

A MAGYAR NÉPHADSEREG ESZKÖZEI

A Varsói Szerződés működéséből adódóan az egyes tagországoknak viszonylag szűk mozgásterük volt a fegyverzet kiválasztásában, jellemzően szovjet haditechnikai eszközöket állítottak rendszerbe. Ez szinte teljes egészében igaz volt például a repülő technikai eszközökre, a légvédelmi komplexumokra, a radarokra, de a Magyar Néphadseregben csak részben volt igaz a nyolcvanas évek rádióelektronikai harc eszközeire.

[1] Az időbeni felosztás a szerző által önkényesen választott időbeli határvonal, az ezt megelőző időszakban a Varsói Szerződés és a NATO tagállamainak jellegzetes technikai berendezéseit, míg utána inkább az egyes országok eszközeit mutatja be a cikk.

Ebben az időszakban igen jelentős hazai fejlesztések folytak sok területen, a szárazföldi rádiófelderítő, rádiózavaró technikában[2], a csapatlégvédelmi zavaró technikában[3], az automatizált csapatvezetési eszközökben[4] és többek között a helikopter fedélzeti felderítő, zavaró berendezések területén. A Magyar Néphadseregben LEFOGÓ-1A, -B és -C típusú, valamint Mi-17PP típusú helikopterek voltak rendszerben. Ezek részletesebb jellemzése az alábbiakban olvasható.

A LEFOGÓ-1A, -B és -C zavaró helikopterek

A haditechnikai kutatás-fejlesztés és a rendelkezésre álló erőforrások szabta korlátok speciális műszaki megoldásokra kényszerítették a rádióelektronikai szolgálat fejlesztő mérnökeit. Arra nem volt lehetőség, hogy a szolgálat saját hordozó helikoptereket kapjon és ezeket a speciális szakmai feladatok céljaira átalakítsa, azokba fixen beépített állványokat, munkahelyeket telepítsen, antennákat építsen be. Arra azonban lehetőség nyílt, hogy mozgatható platformon „teherként" a raktérben rögzítsék a berendezéseket és a külső, amúgy is meglévő függesztő pontokon antennákat rögzítsenek a feladat végrehajtása előtt.

A szaktechnikai berendezések telepítését, majd a helikopterből való eltávolítását viszonylag rövid idő alatt kellett végrehajtani, miközben további korlátozás volt az is, hogy semmilyen berendezéssel nem csatlakozhatnak a helikopter fedélzeti áramellátó rendszerére, vagyis teljesen autonóm áramellátást kellett biztosítani minden eszközünk számára.

Ezen korlátok figyelembe vételével az a döntés született, hogy a szaktechnikai eszközöket kerekeken gördülő, a helikopter rakterébe bevontatható állványokba építik be, amelyek tartalmazták az adott hullámsávnak megfelelő rádióelektronikai felderítő vevőkészülékeket, panoráma analizátorokat, a zavaró adóberendezéseket, antennahangoló-, csatoló egységeket és a belső kommunikációs rendszer eszközeit. Az áramellátás céljából az alsó polcokon akkumulátor csoportokat helyeztek el, és ezek hálózati invertereken[5] keresztül táplálták azokat a berendezéseket, amelyek csak hálózati 220 V-os feszültségről működtek.

A gurítható állványok mellé, rögzítés után a kezelő személyzet foglalt helyet, majd repülés közben onnan kezelték az eszközöket, a készülékek nem voltak távirányíthatók, nem volt külön operátori munkahely.

Az egyes feladatcsoportoknak megfelelően háromféle típusváltozat került megépítésre. A LEFOGÓ-1A típusú „kocsi" a harcászati rövid- és ultrarövidhullámú frekvenciatartományban üzemelt, felderítési frekvenciatartománya 1,5–100 MHz volt. A zavarási képességeket a hadseregben akkor rendszerben lévő R-130 RH, és R-111 URH rádiók teljesítményerősítőkkel növelt képességei biztosították, zavaró modulációs egységekkel kiegészítve. Ehhez a változathoz a helikopter farok részénél a két oldalra rögzített 1–1 dob formájú antenna csatlakozott, amelyek konstrukciójukat tekintve kettős bekezdésű helikális sík spirálok voltak, amelyeket a Budapesti Műszaki Egyetemmel közösen fejlesztettek ki.

[2] Például a PRIZMA rövidhullámú rádiófelderítő-zavaró rendszer, az RRZ rádiórelé zavaró rendszer

[3] CSLZ – csapatlégvédelmi zavaró rendszer

[4] ORIGO – a hadsereg parancsnok automatizált vezetési rendszere, SZIGMA – a Rádióelektronikai Ellenőrző Központ automatizált vezetési rendszere

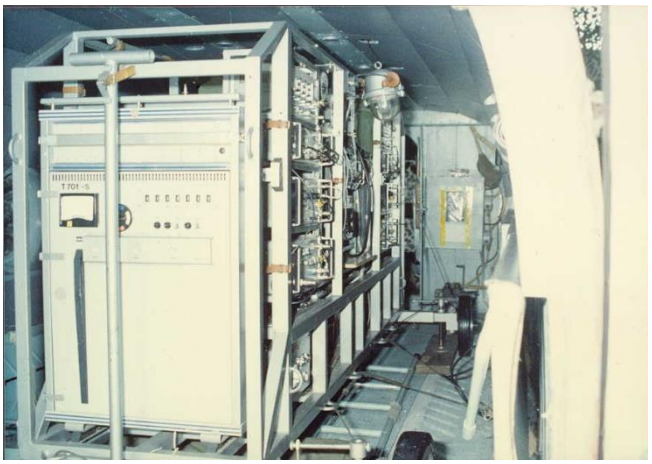
[5] A hálózati inverter olyan áramátalakító, amely az akkumulátorok 12–24 V-os egyenfeszültségéből 220 V, 50 Hz-es szinuszos feszültséget állít elő.

A LEFOGÓ-1B (1. kép) a rádiórelé zavarási feladatokra készült, a LEFOGÓ-1C (2. kép) pedig a magasabb frekvenciatartományokra, ahol a rádiólokátorok, légvédelmi rakétakomplexumok üzemeltek. Mivel a rádiórelék zavarására elsősorban kiképzési célokból volt szükség, ezért a rendszerben lévő R-405X rádiórelé méteres és deciméteres egységeiből, valamint az R-1406 rádiórelé egységeiből és teljesítményerősítőkből állt az 1B műszerparkja.



1. kép A LEFOGÓ-1B szállítási helyzetben a MI-8 helikopter rakterében [1]

A rádiólokátorok, légvédelmi komplexumok bemérésére mikrohullámú spektrum analizátorokat, zavarásukra pedig generátorokat és erősítőket használtak.



2. kép A LEFOGÓ-1C szállítási helyzetben a MI-8 helikopter rakterében [1]

Az elektronikai hadviselési szolgálat ezeken kívül rendelkezett még egy repülő eszközzel, ami egy merevszárnyas L-410 UVP repülőgép volt, abban állványokba beépített munkahelyek szolgáltak elsősorban elektronikai felderítési, elektronikai ellenőrzési és zavarkivizsgálási célokra, de rendelkezett légi fényképező kamarával is.

A rendszerváltást követő haderőcsökkentés során ezen eszközöket kivonták a hadrendből, berendezéseit szétbontották.

A LEFOGÓ-1x családon kívül volt két kimondottan elektronikai hadviselési rendeltetésű helikopterünk is, a két Mi-17PP, amit még a Varsói Szerződés fegyverexportja keretében a Szovjetuniótól kapott a hadsereg.

A Mi-17PP[6]

A Mi-17PP[7] helikopterből kettő darab érkezett hazánkba a 80-as évek végén. Az 1974-ben készült Mi-8PP zavaró helikopter komplexumból több mint ötven továbbfejlesztett változat készült, ezek egyik export változata volt a Mi-17PP. (3. kép) Rendeltetése a földi rádiólokátorok, irányadók és más, a légvédelmi rendszerben üzemelő felderítő eszközök felfedése, aktív zavarokkal való lefogása volt. A harcérintkezés vonalától biztonságos távolságban, őrjáratozási légtérben passzív felderítést is végezhetett, valamint zavarhatta a földi rádiólokátorokat és légvédelmi eszközöket.



3. kép. A magyar felségjelű Mi-17PP zavaró helikopter [2]

A helikopter két berendezésből állt, az LO-24-ből és az LO-27-ből. Az LO-24 az E és F frekvenciatartományban, míg az LO-27 a D frekvenciatartományban üzemelt[8]. A kimenő teljesítménye mintegy 250 W volt, az antenna karakterisztika oldalszögben ± 15 fok, helyszögben 4 ± 8 fok volt, az adóberendezés hűtéséről folyadékos és léghűtés gondoskodott.

Erre az időszakra tehát az volt a jellemző, hogy a rádióelektronikai harc megvívása során a helikoptereket a felderítő-zavaró eszközök hordozóiként alkalmazták, az aktív harctevékenységektől és az ellenséges légvédelmi eszközök megsemmisítési zónáitól távol, így az önvédelmükre különösebb hangsúlyt nem fektettek.

R-040

Az elektronikai zavaró berendezések között különös helyet foglalnak el az egyszeri felhasználású zavaró berendezések. A Varsói Szerződés országaiban, köztük Magyarországon is két típus volt rendszerben. Az egyik, a 152 mm-es ágyútarackból kilőhető SZTIRSEL-152 volt, a másik pedig a helikopterre függeszthető konténerből ledobható R-040 típus. Mindkettő a harcászati rádiók hullámtartományában dolgozott, a gyártáskor beállított alsávban, ahol szélessávú zajzavart állítottak elő.

A helikopteres telepítésre bármely szállító helikopter megfelelt, amelynek szabványos függesztő pontjai voltak. A zavaró adók előkészítésére egy mobil műhely szolgált, amelyben behelyezték

[6] Az orosz írásmódban: Ми-17ПП – jelentése: Постановщик Помех ~ zavar előállító
[7] Kódneve: HIP-K
[8] D sáv: 1000–2000 MHz, E sáv: 2000–3000 MHz, F sáv: 3000–4000 MHz [3]

az áramforrásokat, csatlakoztatták az antennát, rögzítették az ejtőernyőt, majd a konténer betöltése során befektették a zavaró eszközt és elfordították az elfordítható tároló dobot.

A repülés során, a meghatározott ledobási pont fölött egy motor segítségével elfordították a dobot és a szabaddá vált nyíláson át a zavaró adó kiesett a konténerből. A hegyes orrkiképzésnek köszönhetően a földet éréskor belefúródott a talajba és az ütéstől az inercia kapcsoló bekapcsolta az áramellátást. Az aktív zavaró tevékenység az energiaellátás kimerüléséig folyt.

A NYUGATI ORSZÁGOK ESZKÖZEI

Sikorsky EH-60A Quick Fix II

Ebben az időszakban az Egyesült Államok a Blackhawk helikopterek két elektronikai hadviselési változatával rendelkezett, melyek típusjele EH-60A és EH-60B volt. A Sikorsky cég 1980-ban elnyert egy tendert UH-60A továbbfejlesztésére a Quick Fix II EW programban. Ennek során előkészítették a többrendeltetésű AN/ALQ-151 harcászati elektronikai hadviselési rendszer felszerelését, négy dipól antenna rögzítését a farok két oldalán, és egy behúzható botantennát a kabin hátsó részénél. Az EH-60A-t ellátták egy AN/ALQ-144 infravörös ellentevékenységi rendszerrel, infracsapda- és dipólkivetővel, valamint egy AN/APR-39(V)1 radar besugárzásjelzővel.

A YEH-60A EW Blackhawk 1981 szeptemberében repült első alkalommal, 1984-re a hadsereg mintegy negyven UH-60A átépítését rendelte meg, 1989-ben EH-60C-re változtatták a típusjelzését. Rendeltetése az ellenséges jelek vétele, osztályozása és zavarása volt.[4]

Az AN/ALQ-151(V)2 speciális célú elektronikai ellentevékenységi rendszer, a Quickfix helikopterrendszer volt. Ennek továbbfejlesztett változata lett az Advanced Quickfix, mint a Ground Based Common Sensor (GBCS) program légi eleme. (4. kép) A GBCS Heavy nehéz páncélosba épített komplexum volt, amely a páncélos egységek, illetve a páncélos felderítő ezred állományába tartozott. A GBCS Light könnyű terepjáróra szerelt változat volt, valamint a tengerészgyalogság részére is készült egy mobil elektronikai hadviselési támogató rendszer[9].



4. kép Advanced Quickfix helikopter [5]

[9] MEWSS- Mobile Electronic Warfare Support System

A GBCS rendszer lényege az volt, hogy minden hordozóba ugyanazokat a berendezéseket építették be, azonos számítógépes program vezérelte a rádiófelderítési, adatbázis kezelési és zavarási feladatokat. Kiképzési és műszaki fenntartási szempontból is kedvezőbb volt az egységes hardver, az egységes szoftver felület. A kor akkori színvonalán is korszerűnek számító digitális adatkapcsolattal tudtak az egyes állomások együttműködni, illetve információt továbbítani az elemző értékelő központnak.

A GBCS rendszernek minden modern megoldás, a számítógép vezérlésű berendezések, digitális összeköttetés, stb. ellenére volt egy óriási hibája. Mégpedig az, hogy konzerválta az analóg rádiótechnikát, az elektronikai felderítést, zavarást csak az analóg adásmódok ellen volt képes kifejteni, az egyre jobban terjedő digitális adásokkal szemben tehetetlen volt, ezért a programot 1999 közepén a Prophet (Próféta) rendszer váltotta le.

SOTAS

A JUH-1H SOTAS (Stand-Off Target Acquisition System – stand-off célmegjelölő rendszer) helikopter egy módosított UH-1H változat volt, amely az AN/APS-94 oldalfelderítő radarrendszert[10] hordozta. (5. kép) Ez a Motorola által gyártott radar volt a világ első GMTI[11] radarja. A mozgó célokat a visszavert jelek Doppler-frekvencia eltolódásával indikálta, azonban a helikopter lassú repülése miatt ez a frekvencia eltolódás kicsi volt, ezért nagyobb sebességű hordozót kellett választani a megfelelő eredmények eléréséhez [6].



5. kép A SOTAS helikopterre épített célfelderítő rendszer [7]

A helikopter futóműveit átalakították, hogy a radar antennája repülés közben akadálytalanul foroghasson. A helikopter a peremvonallal – országhatárral – párhuzamosan repült olyan mélységben, hogy a légvédelmi eszközök pusztítási zónáján kívül legyen. Ezért hívták „Stand-off" rendszernek. A radar által szerzett adatokat egy adatvonalon keresztül továbbították a földi vezetési pontra. Németországban és Koreában is alkalmazták. A SOTAS rendszert 1975-ben állították szolgálatba és 1986-ban az EH-60 Black Hawk váltotta le [8].

[10] SLAR – Side-Looking Airborne Radar System

[11] GMTI – Ground Mowing Target Indicator – földi mozgó cél indikátor

KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben bemutatott helikopterekre épített elektronikai hadviselési, valamint célfelderítő eszközök a két világrendszer globális szembenállásának korában szolgáltak. A Varsói Szerződés országai elsősorban a Szovjetunió által gyártott zavaró helikoptereket használták, Csehszlovák felségjelű Mi-17PP képet is lehet találni az interneten. A VSZ országok közül csak Magyarországnak van ismert saját fejlesztése, ami elsősorban a saját csapatok zavarviszonyok közti gyakoroltatásának céljából készült, mivel a rendszerben lévő híradó berendezések kerültek beépítésre és nem a NATO eszközei ellen tervezték őket.

A cikk következő részében arról a szemléletbeli változásról lesz szó, amely a helikopterek elsősorban önvédelmi célú elektronikai rendszereit mutatja be, bár a mai Oroszország továbbra is kiemelt hangsúlyt fektet az aktív zavaró tevékenységet folytató forgószárnyas eszközökre, miközben az önvédelmi rendszereiket is komoly mértékben fejlesztette.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] A LEFOGÓ-1B és a LEFOGÓ-1C fényképe. Az Egyesített Fegyveres Erők rádióelektronikai főnökeinek értekezlete. Balatonkenese, Börgönd, 1989. 05. 17-19. Fényképalbum, NKE HHK EHV Tsz. archívum.
[2] A magyar felségjelű Mi-17PP zavaró helikopter. Sz.N.: Вертолети за радиосмущения Ми-8/Ми17ППА, (online) http://reb.start.bg/Вертолет%20за%20РЕП%20Ми-8,%20Ми-17ППА-2309 (2017.03.12.)
[3] Radio Spectrum. (online) https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum#EU.2C_NATO.2C_US_ECM_frequency_designations (2017.03.12.)
[4] Sikorsky EH-60A Quick Fix II. (online) http://www.aviastar.org/helicopters_eng/sik_quickfix.php (2017.03.12.)
[5] Federation of American Scientists: AN/ALQ-151A Quickfix, AN/ALQ-151(V)3 Advanced Quickfix [AQF] program. (online) https://fas.org/irp/program/collect/quickfix.htm (2017.03.12.)
[6] Motorola AN/APS-94. (online) http://wiki.scramble.nl/index.php/Motorola_AN/APS-94 (2017.03.13.)
[7] SOTAS helikopter képe. (online) http://www.arcforums.com/forums/air/index.php?/topic/192694-two-huey-questions-dh-and-fp/ (2017.03.13.)
[8] Bell UH-1 Iroquois variants. (online) https://en.wikipedia.org/wiki/Bell_UH-1_Iroquois_variants#JUH-1_SOTAS (2017.03.13.)

ELECTRONIC WARFARE APPLICATIONS OF HELICOPTERS BEFORE THE 90S

This article presents those applications of helicopters, on which were use electronic warfare equipment. The countries of the Warsaw Pact mainly had Russian equipment, but Hungary had own EW development for helicopters: LEFOGO-1A, LEFOGO-1B and LEFOGO-1C onboard jamming systems. In article were present the Russian Mi-17PP EW helicopter, EH-60A Quick-Fix and SOTAS radar system from western countries armament. The R-040 expendable jammer system was drop from helicopter above target area. In the second part of this article the reader can read about new EW helicopters from different countries of world.

Keywords: *helicopter, electronic warfare, reconnaissance from air, jamming, Side-Looking Airborne Radar System – SLAR*

VÁNYA László (PhD)
egyetemi tanár
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Üzemeltető Intézet
Elektronikai Hadviselés Tanszék
vanya.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-5472-7190

VÁNYA László (PhD)
Professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Maintenance
Department of Electronic Warfare
vanya.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-5472-7190

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-05-0371_Vanya_Laszlo.pdf

Kerekes Ferenc Attila, Nyári Péter, Szabó József Zoltán

GÖRDÜLÉSI ELLENÁLLÁS ÖSSZEHASONLÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ TESZTBERENDEZÉS FEJLESZTÉSE

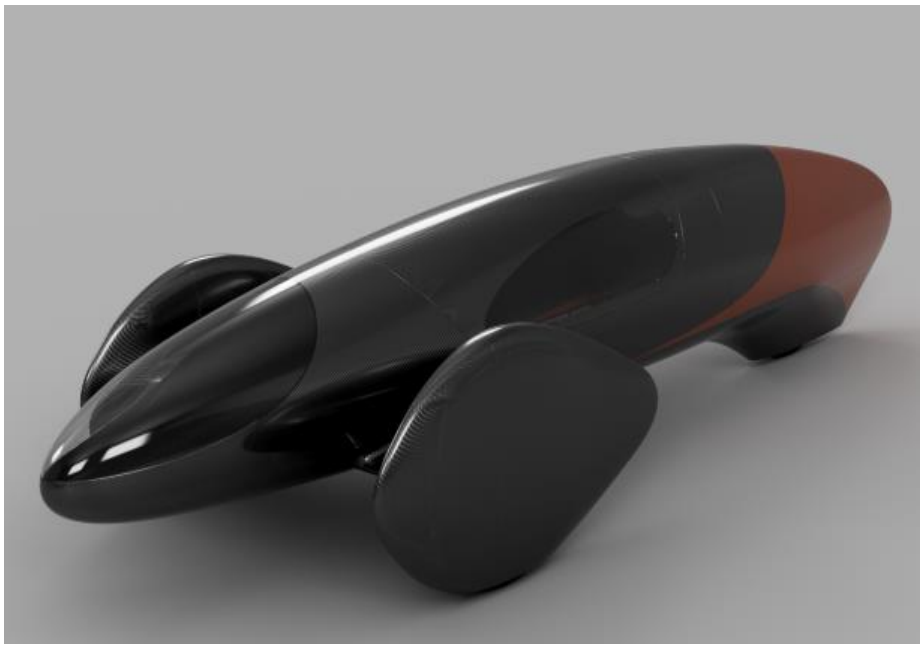
Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar OECO Shell Eco-Marathon csapata már 8. éve vesz részt a nemzetközi üzemanyag takarékossági versenyen benzines prototípus kategóriában. A versenyautó tervezése során fő szempontok a környezetbarát technológiák alkalmazása, az elérni kívánt eredményt befolyásoló energiaveszteségeket okozó hatások csökkentése és az ergonomikus elvek alapján történő belső tér kialakítása a motor- és pilótatérben egyaránt. Jelen cikkünkben a versenyautó tüzelőanyag-fogyasztását befolyásoló gördülési ellenállással foglalkozunk. Megvizsgáljuk, hogy a gumiabroncsfajták és kerékkialakítások milyen módon változtatják a gördülési ellenállásból származó veszteségeket, ezt követően e hatások mérésére, valamint összehasonlítására szolgáló vizsgálóberendezés koncepcióját mutatjuk be.

Kulcsszavak: *Shell Eco-Marathon, OECO, Óbudai Egyetem, prototípus, gördülési ellenállás, futómű, gumiabroncs, vizsgálóberendezés*

1. BEVEZETÉS

A nemzetközi Shell Eco-Marathon üzemanyag takarékos versenyen induló csapatok fő célja, egy olyan jármű fejlesztése és megépítése, majd azzal való versenyzés, amely a lehető legnagyobb távolságot képes megtenni a minél kevesebb üzemanyag felhasználásával. A versenyre középiskolák, valamint felsőfokú intézmény diák csapatai nevezhetnek és mérhetik össze tudásukat, járművüket. A versenyt már négy kontinensen, Európában, Amerikában, Ázsiában és Afrikában is megrendezik. A versenyen lehetőség van többféle kategóriában nevezni, mind energiaforrás, mind pedig jármű kialakítás tekintetében. A jármű kialakítását tekintve lehet városi vagy prototípus kategóriájú. Az energiaforrást nézve lehetséges fosszilis energia (benzin, gázolaj, gáz) vagy elektromos energia (akkumulátor, üzemanyagcella). A verseny során a csapatoknak 4 alkalom áll a rendelkezésre, hogy az 1,7 km hosszúságú pályán megtegyenek 10 kört mindössze 39 perc alatt, ami átlagosan 26 km/h sebességet jelent. Az eredményeket km/liter mértékben adják meg, melyet az alapján számolnak ki, hogy a jármű a 10 kör megtétele alatt mennyi üzemanyagot fogyasztott, majd ezt az értéket arányosítják 1 liter 95-ös oktánszámú benzin energia tartalmához. Az induló csapatok a projekt révén megtanulnak csapatban dolgozni és nem csupán a műszaki területtel, hanem a projekt-menedzsmenttel, a költségvetéssel, illetve a kommunikációval is foglalkozniuk kell [1].

Annak érdekében, hogy a lehető legnagyobb távot tegyék meg, e járműveknek minél kisebb súllyal, áramvonalas karosszériával és optimalizált hajtásláncal kell rendelkezniük. Az induló járművek 90%-a könnyű kompozit karosszériával rendelkezik, amely legnagyobb hányadban karbon- vagy üvegszövet erősítésű műgyanta kötésű. A kompozit technológia használatával a **tömeg** csökkentést hatásosan lehetett elérni a járműveknél, ezzel is növelve az elérhető hatótávot. Tervezés során másik fontos terület azon veszteségek csökkentése, melyekre a jármű tervező csoportnak lehetősége van, Ilyenek lehetnek a gördülési- és a légellenállásból származó veszteségek.



1. ábra OECO csapat 2017 évi versenyjármű koncepciója (saját szerkesztésű ábra)

Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Shell Eco-Marathon OECO nevű csapatának eddigi legjobb eredménye az 565,5 km/l, melyet benzines prototípus kategóriában értünk el. A járművünk első kerék kormányzású és összesen három kerekű. A meghajtásról egy benzines Honda GX35, 35 cm^3-es átalakított fűkasza motor gondoskodik, amely centrifugál kuplungon keresztül, lánchajtással adja át a nyomatékát a hátsó kerékre. A motort elektronikus vezérlőegységgel tudjuk vezérelni a beszerelt beavatkozók és jeladók segítségével. Az 1. ábrán a karosszéria karbon kompozit monocoque[1] kialakítása látszik [2].

Az első évtől kezdve kutatjuk azokat a jövőbe mutató technológiákat, amely hozzájárulhat a kitűzött 1000 km/liter eredmény eléréséhez. 2014-es évtől kezdődően nem csupán a kis fogyasztással szeretnénk környezetbarát lenni, hanem a jármű teljes életciklusára nézve. Ezt az elvet szem előtt tartva, célunk, hogy a tervezés első lépésétől kezdve, a kivitelezésen át, a tesztelésig és a jármű megsemmisítésig ne használjunk a szükségesnél több energiát, valamint a jármű életciklusa végén a lehető legkevesebb nem újrahasznosítható hulladék keletkezzen. Ezen felül a gördülési- és légellenállásból származó veszteségeket is szeretnénk a lehető legnagyobb mértékben csökkenteni [2].

A cikk célja a prototípus járművünk gördülési ellenállásának csökkentéséhez vezető legjobb megoldások feltérképezése és csökkentési lehetőségeinek feltárása. Továbbá a gördülési ellenállás csökkentésére szolgáló megoldások hatásainak összehasonlítására szolgáló tesztberendezés koncepciójának bemutatása.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet az előző évek tapasztalatait és a fejlesztési irány kitűzését mutatja be. A 3. fejezet a járművünk esetén fellépő gördülési ellenállás fajtáit veszi sorba. A 4. fejezet a testberendezés koncepcióját szemlélteti. Az 5. fejezetben a cikk összefoglalására kerül sor.

[1] Monocoque: Francia eredetű szó, jelentése: egy héj. Ez a fajta vázszerkezet rendkívül jól viseli a rá ható terheléseket, nagy merevség, kis tömeg jellemzi.

2. JÁRMŰVEL SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK ÉS A LEGFŐBB VESZTESÉGEK

Az útjainkon közlekedő járművek esetén sokféle veszteség lép fel, amelyekkel a tervezőknek számolni kell a tervezési folyamatban. Abban az esetben, ha a veszteségek csökkentésére nem fordítunk kellő figyelmet a jármű hatásfoka alacsony mértékű lesz. A kis hatásfokú jármű több szempontból is hátrányos, hiszen a jármű tulajdonosoknak fontos szempont az alacsony fogyasztás, a magas teljesítmény, valamint az alacsony károsanyag-kibocsátás. Ezeket csak úgy érhetjük el, ha a jármű tervezése során számításba vesszük azokat a veszteségeket, amelyekre a tervezési folyamatban hatást tudunk gyakorolni. Az OECO csapat versenyjárműve esetén sincs ez különben, mi is törekszünk már a tervezés kezdetén arra, hogy a fellépő veszteségeket és kívánalmakat körültekintően gyűjtsük össze.

Legfőbb kívánalmak a versenyjárművel szemben:

- alacsony jármű tömeg
  - kompozit karosszéria;
- a versenypályához optimalizált motor és hajtáslánc
  - pálya feltérképezése, annak megfelelő mechanikai kialakítás és vezérlés;
- stabilitás és irányíthatóság
  - állítható futómű geometria;
- járműre ható veszteséget okozó hatások minimalizálása
  - gördülési- és légellenállásból származó veszteségek csökkentés;

Amikor nincs lehetőség a veszteséget okozó hatást csökkenteni vagy kiiktatni, akkor azzal csak kalkulálni tudunk. Azoknál az okoknál, ahol a tervezői munkától függhet az elért eredmény, ott a lehetőségeinkhez mérten igyekszünk a legjobb megoldást kidolgozni. A lehetőségeink függenek a költségektől, az időtervtől és a csapatot alkotó személyek tudásától, valamint képességeitől.

A felsorolt veszteséget okozó hatások közül a versenyautó tüzelőanyag-fogyasztását befolyásoló gördülési ellenállással foglalkozunk a továbbiakban. Megvizsgáljuk, hogy a gumiabroncsfajták és a kerékkialakítások milyen módon változtatják a gördülési ellenállásból származó veszteségeket.

Az 1. táblázatban láthatóak a legfőbb hatások és veszteségek, amelyek növelik az tüzelőanyag-fogyasztást, így csökkentik a versenyjármű hatótávolságát, ezzel rontva a versenyeredményünket.

Veszteség oka	Van rá kihatásunk?	Megoldás	Példa
Jármű nagy össztömege	igen	• kis össztömegű karosszéria • könnyített tartószerkezet • könnyített hajtáslánc	• karbon kompozit karosszéria • kompozit tartószerkezet • alumínium motorblokk és karbon kompozit lánckerék
Pilóta tömege	igen	• könnyű pilóta • tömegkontroll	• női pilóta
Pilóta vezetési stílusa	igen	• folyamatos képzés és edzés	• elméleti és gyakorlati oktatás • gyakorlás a tesztpályán

Gördülési ellenállás	igen	• alacsony gördülési ellenállású gumiabroncs • merev felni • alacsony gördülési ellenállású csapágyazás a teljes járműre nézve	• verseny gumiabroncs • karbon kompozit kerekek • kerámia csapágyak
Légellenállás	igen	• áramvonalas karosszéria	• ideális cseppforma megközelítése • kerekek burkolása • kiálló részek csökkentés
Tehetetlenség	igen	• kis össztömegű jármű • könnyű pilóta • forgó alkatrészek tömegének csökkentése	• lásd: 1. és 2. sor • karbon kompozit hátsó lánckerék • optimalizált forgattyús mechanizmus
Emelkedő értéke	nem	-	-
Útburkolat minősége	nem	-	-
Futómű geometria	igen	• feltételek szerint optimalizált futómű	• 0 kerékdőlés • 1,5 kerékösszetartás

1. táblázat Tüzelőanyag-fogyasztást növelő legfőbb hatások és veszteségek (saját szerkesztésű táblázat)

3. GÖRDÜLÉSI ELLENÁLLÁS

A járművünk gördülési ellenállásának legnagyobb hányadát a forgó mozgást végző kerekek gördüléséből származó ellenerő alkotja, amely több hatásból adódik össze. Ezek a gumiabroncs és a keréktárcsa rugalmas torzulása, a csapágyak gördülési ellenállása, valamint a futómű beállítási paraméterei által okozott ellenállás. A jármű tüzelőanyag-fogyasztásának átlagosan 20%-a gördülési ellenállás legyőzésére fordítódik.

Gumiabroncs gördülési ellenállásából származó $F_{görd.}$ erő meghatározása az alábbi összefüggést használjuk.

$$F_{görd.} = f_{görd.} \cdot m \cdot g \tag{1}$$

ahol:

$f_{görd.}$ – a gördülési együttható [-]
m – jármű össztömege pilótával együtt [kg]
g – gravitációs gyorsulás

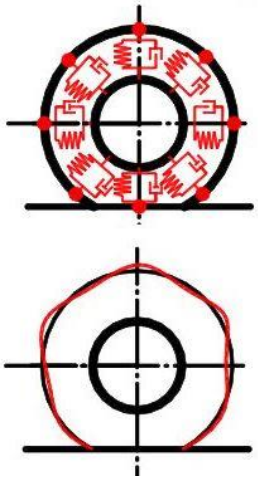
A gumiabroncs $f_{görd.}$ gördülési együtthatója függ többek közt a talaj minőségétől, a mozgás sebességtől, az alkalmazott nyomástól. A gördülési együttható a gördülési ellenállásból származó $F_{görd.}$ erő és a kerékre ható normál F_N erő hányadosa. Különböző típusú és kivitelű gumiabroncs $f_{görd.}$ gördülési együtthatójának alakulása látható a 2. táblázatban.

Gumiabroncs típus	$f_{görd.}$ *(aszfaltra származtatva)*
Személygépjármű abroncs	0,013
Hagyományos, kereskedelmi forgalomban kapható kerékpárabroncs	0,006
Speciális Michelin 44-406 diagonál kialakítású kerékpárabroncs	0.0024
Speciális Michelin 45-75R16 radiál kialakítású kerékpárabroncs	0,00081

2. táblázat Gördülési együttható beállított, egységes paraméterek mellett [3]

3.1 Gumiabroncs

Gumiabroncs által keltett veszteséget több hatás is okozza. A futófelület a gumiabroncs forgás közben deformálódik miközben kapcsolatba lép az útburkolattal, ezáltal az alakváltozás közben a gumi felmelegszik, amely a belső-, illetve a talaj és a gumi közti súrlódásból tevődik össze. Ez az energia hő formájában távozik, ez teszi ki a gumiabroncs gördülési ellenállásának 90%-át [4].



2. ábra A gumiabroncs deformációja [6]

Minél nagyobb a gumiabroncs gördülési ellenállása, annál nagyobb erőre van szükség a gépkocsi haladásához. Ha a motornak többet kell dolgoznia csupán a gumiabroncs gördülési ellenállásának legyőzése érdekében, több üzemanyagot fogyaszt. Gondoljunk úgy a gördülési ellenállásra, mintha a gépkocsinak állandóan egy 1%-os emelkedőn kellene felmennie. A gördülési ellenállás nem szüntethető meg teljesen, de a lehető legnagyobb mértékű csökkenése azt jelenti, hogy kevesebb tüzelőanyagra lesz szükség [4].

Gördülés közben a kerék, illetve a talaj is deformálódik, hiszen a kerék és a talaj sem rugalmatlan, így a befektetett munka nem térül meg teljesen, a forgás mindig teljesítmény veszteséggel, azaz hő keletkezésével jár. A 3. táblázat a gumiabroncs különböző talajra viszonyított gördülési együttható alakulását tartalmazza.

A gumiabroncs deformációjának mértéke a gumiabroncsot a talajhoz nyomó erőtől, valamint az út és a gumiabroncs jellemzőitől függ, amelyeket a gördülési együtthatóval veszünk figyelembe.

A gumiabroncs jellemzői:

- a maximális nyomás;
- a gumiabroncs profilja;

- anyagösszetétel;
- mintázat;
- oldalfal és futófelület szövetszerkezete;
- futófelület és oldalfal méret;
- keménység;
- tömlős vagy tömlő nélküli.

Úttípus	Gördülési együttható
Aszfaltbeton	0,01-0,02
Kockakő	0,023-0,030
Száraz kötött talaj	0,025-0,035
Nedves kötött talaj	0,050-0,15
Homok	0,10-0,3

3. táblázat A gumiabroncs különböző talajra viszonyított gördülési együtthatója [4]

A radiális gumiabroncs kialakítás alacsonyabb gördülési ellenállási együtthatót eredményez a diagonál abroncsnál. Radial kialakításnál a kordszálak 90°-ban metszik a korona vonalat és a futófelület szélességében öv helyezkedik el 15–20°-os korona szöggel, így kevesebb betéttel ugyanolyan igénybevételt képesek elviselni a gumiabroncs, mint a diagonál esetén. A kevesebb betét hatására a gumiabroncs tömege csökken, amely nekünk jelentős szereppel bír, hiszen a kerék tehetetlensége ezáltal ugyancsak csökken. A kevesebb betét nem csak a tömegre, hanem a belső súrlódás csökkenésre is jótékony hatással van.

A gumiabroncs összetételében manapság a kén a vulkanizálás legfőbb kelléke. A vulkanizálás során alakul át a plasztikus képlékeny kaucsuk elasztikus, vagyis rugalmas gumivá. Az abroncskeverék mintegy harmadát a korom alkotja; a koromtól lesz fekete a gumi. A szintetikus gumi keveréknek köszönhetően csökken a gumi gördülési ellenállása [5].

Számunkra előnyös a gumiabroncs tömlő nélküli használata, mert azzal csökkenteni tudjuk a kerék tömegét, illetve a tömlő és a külső gumiabroncs közti súrlódás megszűnik, ezzel megszüntetve a befektetett energia egy részének a hővé alakulását. Ami hátrányt jelent abban az esetben, ha nincs belső tömlő, hogy a levegő és ezzel a nyomás veszteség esélye megnövekszik. A tömlő nélküli gumiabroncs használatához különleges és egyben drágább felni kialakítás szükséges.

Az oldalfal és a futófelület keménysége nagyban befolyásolja gördülési ellenállás csökkenését, ezáltal növelve a hatótávolsága. A keményen oldalfalak és futófelületnek köszönhetően a gumi torzulása csekélyebb, így a hő termelődés is kisebb. A hátránya, hogy az útburkolat egyenetlenségeit kevésbé tudja csillapítani, ezzel megnövekszik a járműre ható csillapítatlan erőhatás, amely káros rezgéseket kelthet a járműben, ami tönkremenetelhez vezethet és egyben a pilótának is rontja a komfortérzetét.

A magasabb nyomáson használható gumiabroncs jótékony hatást fejt ki gördülési ellenállás csökkentése, mert ugyanazt az eredményt valósítja meg, mint amit a keményebb oldalfal és futófelület esetén tapasztalunk. A nagy nyomás veszélyeket is hordoz magával, mert a nagyobb nyomáshoz erősebb és precízen kialakított felni szükséges, amely növeli a költségeket, legyen az hagyományos kialakítású vagy karbon kompozit felni. Ha a felni nem képes elviselni a nagy nyomást könnyen balesethez vezethet, menet közben szétnyílhat a felni, ezzel veszélyeztetve más csapat járműveinek és a mi pilótánk biztonságát.

3.2 Kerékcsapágyazás

A kerék gördülési ellenállásának része a kerékcsapágyak gördüléséből származó ellenállás $F_{csá}$. Ez az érték alacsony, a teljes gördülési ellenállás kevesebb, mint 1%-át adja, az átlagos ellenállás értéke körülbelül 0,0015.

$$F_{csá.} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \frac{d}{D} \tag{2}$$

ahol:

- μ - a csapágy súrlódási együttható [-]
- d - csapágy gyűrű átmérő [m]
- D - kerékátmérő [m]
- m - jármű össztömege pilótával együtt [kg]
- g - gravitációs gyorsulás

Természetesen ez az érték függ csapágy típusától, de a különbség csekély mértékű. Számos csapágygyártó termékeit vizsgáltuk meg, amelyből le tudjuk vonni azt a következtetést, miszerint a mi esetünkben, ahol a csapágyak messze nem érik el az élettartamuk 10%-át sem, jelentősen nem számít, hogy a csapágy energiatakarékos-e vagy sem. Az SKF specifikációjából is kiderül, hogy a várható energia-megtakarítás energiatakarékos csapágyak esetén csak jóval magasabb fordulatszám tartományban és a teljes életciklust követően mérhető, amely 5 % körüli megtakarítás jelentene. Ami már észrevehetően befolyásolja a kerék gördülését, az a csapágyak tömítésére szolgáló záró gyűrű súrlódása, a kenés milyensége és a szerelés pontossága.

3.3 Felni

A felni fajtája és kialakítása is hatást gyakorol a gördülési ellenállás értékére. A felni sem tekinthető teljesen rugalmatlannak, forgás során a felnit rugalmas deformáció éri, és úgy, mint a gumiabroncsnál, itt sem adódik vissza teljesen az energia, egy része hővé alakul, de a felni esetében ez nem számottevő.

Számos csapat használt karbon kompozit technológiával kialakított felnit, amely lehet egyedi gyártású vagy kereskedelmi forgalomban kapható. Azok a csapatok, akik karbon kompozit felni használatát választják, az esetek 90%-ban egyedi gyártás mellett döntenek. Ez a mi esetünkben sincs másképp, mert a felnivel szemben támasztott elvárásoknak, csak az egyedi gyártású felni képes teljes mértékben megfelelni.
Felnivel szemben támasztott követelmények:

- megfelelő szilárdság;
- kis tömeg → ezáltal a forgó tehetetlenség csökken;
- magas nyomás elviselése (5 bar);
- tömítettség;
- könnyű szerelhetőség.

A karbon kompozit felni használat esetén, a kialakítás előtt komoly tervezési munka szükséges, hogy valóban jobb eredményt érjük el a hagyományos kialakítású küllőzött alumínium abroncscsal rendelkező felninél.

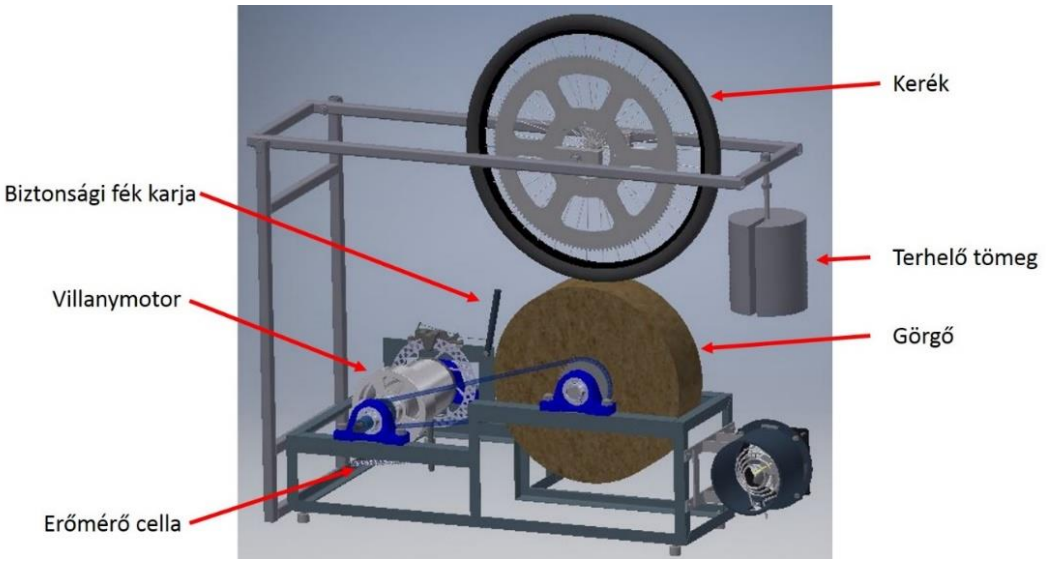


3. ábra Karbon kompozit felni (saját felvétel)

4. GÖRDÜLÉSI ELLENÁLLÁS MÉRÉSÉRE SZOLGÁLÓ TESZTBERENDEZÉS KONCEPCIÓJA

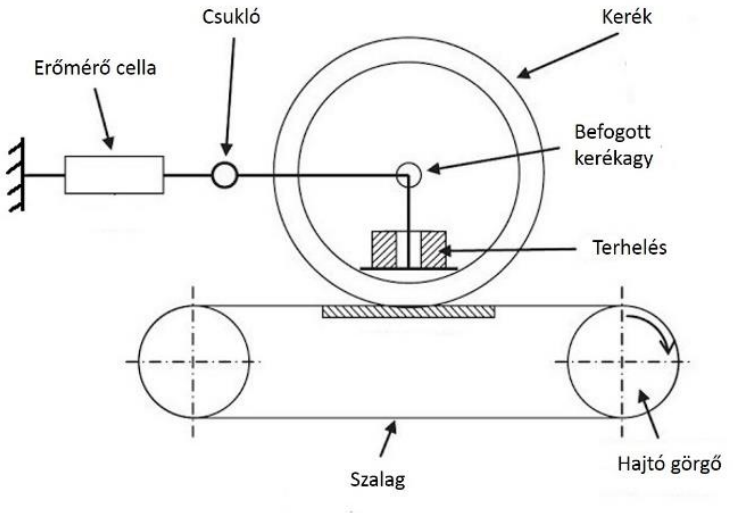
Az évek során a gördülési ellenállás csökkentésére sokféle megoldást dolgoztunk ki és a versenyek alkalmával is többi csapat által alkalmazott megoldásokat gyűjtöttünk össze. Vannak csapatok, akik a gumiabroncs nagyobb fokú terpesztésében, vagy nagyon drága, de kis gördülési ellenállású csapágyban, vagy a könnyű felniben, vagy a gumiabroncs típusában és annak nyomásértékében látják a hatótáv növelésének legnagyobb mértékét. Ha minden egyes hatótáv növelésére szolgáló megoldást szeretnénk megvalósítani, akkor hatalmas költségekkel számolhatunk. Mi abban hiszünk, hogy azokra a fejlesztési területek célszerű fokuszálni, amelyek nagyobb mértékben járulnak hozzá az elérni kívánt eredményhez. Annak érdekében, hogy a különböző megoldásokat rangsorolhassuk, szükségesnek éreztük egy tesztberendezés koncepciójának kidolgozását.

Kétféle koncepciót határoztunk meg, amellyel számunkra kellő pontossággal tudjuk mérni és összehasonlítani a különböző megoldások hatótávra gyakorolt mértékét. Az első fázisban a meglévő görgős fékpadunkat fejlesztjük tovább úgy, hogy alkalmas legyen a feladatra (4.ábra).



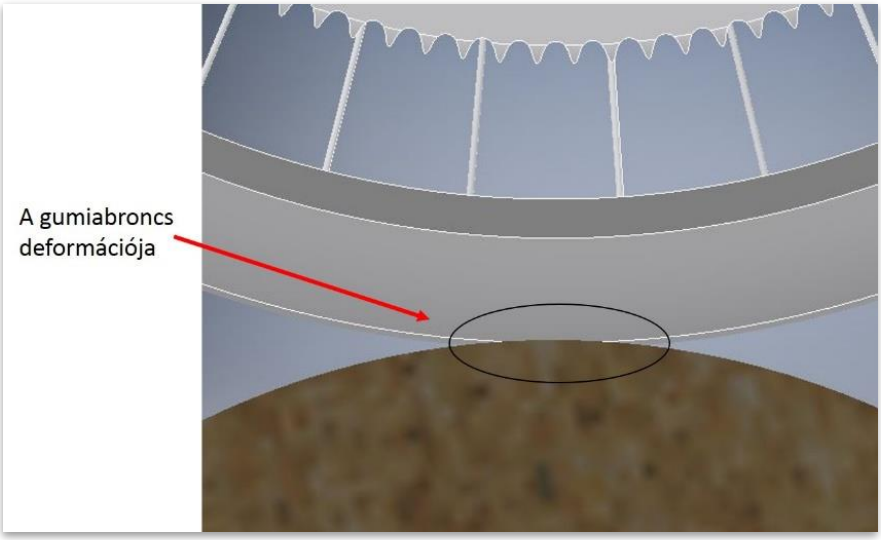
4. ábra Görgős kivitelű tesztberendezés (saját szerkesztésű ábra)

A második fázisban egy olyan futószalagos tesztberendezést hozzunk létre, amely a valósághoz közelebbi értékeket képes szolgáltatni. Az első fázisban megvalósuló berendezés kisebb munkával jár, és kevesebb időt és költséget emészt fel. A második fázisban létrehozandó berendezés felépítéséből adódóan több munkával, idővel és magasabb költséggel párosul.



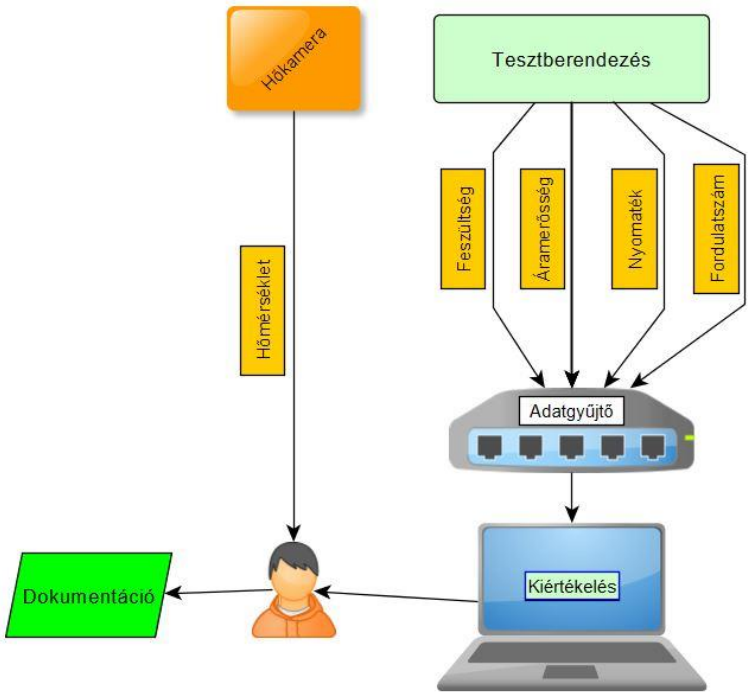
5. ábra Futószalagos kivitelű tesztberendezés (saját szerkesztésű ábra)

Futószalagos kialakítású berendezéssel a valósághoz jobban közelítő értéket mérhetünk, mert ennél a kialakításnál a gumiabroncs a valóságnak megfelelően deformálódik. Görgős kivitelnél a 7. ábrán a gumiabroncs deformációja figyelhető meg, amely nagyobb mértékű, mert a görgő átmérője nem közelíti meg a kerék háromszorosát, ahogy azt az ilyen felépítésű berendezéseknél alkalmazzák. Annak ellenére, hogy a görgős mérés eredményei kevésbé közelíti meg valóságot, különböző gumiabroncsok, felni kialakítások, valamint csapágyak gördülési ellenállás értékek összehasonlíthatóak. Az összehasonlítás alapján dönteni tudunk, hogy melyik megoldás hordozza magában a legjobb eredmény eléréséhez vezető hatást.



6. ábra A gumiabroncs deformációja a görgős tesztpadon (saját szerkesztésű ábra)

A két tesztberendezés ugyanazon elv alapján működik, tehát egy villanymotor segítségével forgásba hozzuk a hajtó görgőt, amely közvetlenül (görgős kialakítás) vagy közvetetten (futószalagos kialakítás) forgatja a járműkereket. Adatgyűjtő segítségével összegyűjtjük a tesztberendezésen elhelyezett jeladók jeleit, majd ezt követően egy kiértékelő rendszerrel meghatározzuk a mérési eredményeket, melyet ledokumentálunk. Működés közben hőkamera segítségével hőképet készítünk, hogy megállapítsuk a gördülési ellenállásból származó hőmennyiséget (7. ábra).



7. ábra Mérési blokkvázlata (saját szerkesztésű ábra)

Tesztberendezésre felhelyezett jeladók:

- fordulatszám jeladók (kerék és görgő);
- áram és feszültség mérő szenzor;
- erőmérő cella;

5. ÖSSZEFOGLALÓ

Igyekeztünk láthatóvá és érezhetővé tenni, hogy számos hatás okozhat tüzelőanyag-fogyasztás növekedést. Az tüzelőanyag-fogyasztás csökkentése nem csupán anyagi, hanem környezetvédelmi okokból is jelentős. Azoknál a járműveknél, melyek csak kis távolságú utakat tesznek meg kevésbé érezhető, de egy olyan járművek esetén, amelyeknek évente több mint 5000 kilométeres a futásteljesítményük, ott már erőteljesen érezhető a fentebb felsorolt megoldások jótékony hatása. A projekt során végzett munka nem csak azt a célt szolgálja, hogy a fejlesztetés során a jármű a versenyen minél jobb eredményt érjen el hanem, hogy a fejlesztésben dolgozó hallgatók már most olyan tudásra és tapasztalatra tegyenek szert, amelyet a későbbi munkájukban hatékonyan tudnak hasznosítani, ezáltal segítve a környezettudatos tervezési elvek bennünk való kialakulását.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Nyári Péter, Kerekes Ferenc Attila, Szabó József Zoltán: Additív gyártástechnológiák alkalmazása a környezettudatos prototípus gyártásban, IFFK 2016. augusztus 29-31, pp. 3-4.

[2] Kerekes Ferenc Attila, Nyári Péter, Szabó József Zoltán: Ökológiai lábnyomunk csökkentése a járműgyártásban környezettudatos technológiák alkalmazásával, IFFK 2016. augusztus 29-31, pp. 1-5.

[3] J. J. Santin, Christopher H. Onder, J. Bernard, D. Isler, P. Kobler, F. Kolb, N. Weidmann, L. Guzzella: The World's Most Fuel Efficient Vehicle: Design and Development of Pac Car II. vdf Hochschulverlag AG, an der ETH Zurich, 2007.

[4] www.michelin.hu, (online) url: http://www.michelin.hu/autogumi/hasznos-informaciok/alapveto-tudnivalok-az-abroncsrol/gordulesi-ellenallas2 (2017.02.01.)

[5] Szabó József Zoltán: Szerviztechnika és üzemfenntartás. tansegédlet. (online) url: http://siva.bgk.uni-obuda.hu/jegyztek/Szerviztecnika/ELOADASOK_2013_PDF/SZTU_9EA_2013_Gumi.pdf (2017.02.01.)

ROLLING RESISTANCE COMPARISON TEST EQUIPMENT

The Óbuda University Bánki Donát Faculty of Mechanical Engineering and Safety Engineering OECO Shell Eco-Marathon team take participant for 8 year of international competition fuel economy in prototype category. The main aspects of race car design of the application, causing the reduction of energy losses affecting the results desired effects and design interiors based on ergonomic principles of environmentally technologies in both engine and driver place. It will take this rolling resistance affect fuel consumption racing deal. We will examine that type of tire and wheel types alter the way in which losses of rolling resistance, then presented the concept of testing equipment to measure and comparise these effects.

Keywords: *Shell Eco-Marathon, OECO, Óbuda University, prototyping, rolling resistance, chassis, tires, test equipment*

Nyári Péter BSc hallgató, OECO csapatvezető Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet nyari.peter@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8437-7117	Nyári Péter BSc student, OECO team leader Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute nyari.peter@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8437-7117
Kerekes Ferenc Attila intézeti mérnök Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet kerekes.attila@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-5103-1742	Kerekes Ferenc Attila institute engineer Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute kerekes.attila@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-5103-1742
Dr. Szabó József Zoltán (PhD) intézetigazgató helyettes, egyetemi docens Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-9129-9049	Dr. Szabó József Zoltán (PhD) Deputy Director of Institute, associate professor Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-9129-9049

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-06-0384_Kerekes_F_A-Nyari_P_Szabo_J_Z.pdf

Varga Béla, Kavas László

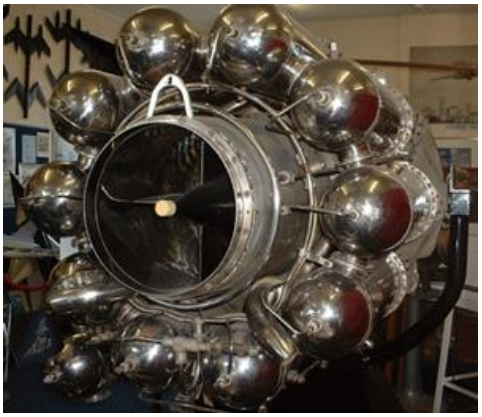
GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK ÉGŐTEREI ÉS NYOMÁSVESZTESÉGÜK BECSLÉSE

Az égőterek feladata az égés során a tüzelőanyag kémiai energiájának átalakítása termikus energiává. Mindezt a legkisebb nyomásveszteség és legjobb hatásfok mellett, úgy, hogy a környezetbe kibocsátott károsanyag, illetve az égőtérben lévő lerakódás minimális legyen. Mindez az égőtérben rendkívül bonyolult turbulens áramlási viszonyokat feltételez, amelynek numerikus leírása még manapság is problémát okoz. Ennek megfelelően az égőterek tervezése még ma is nagyban függ az eddig felhalmozott tapasztalatok megfelelő alkalmazásától. Ebben a cikkben az égőterekben fellépő nyomásveszteséggel foglalkoztunk megvizsgálva milyen módszerek, vagy tapasztalati képletek vannak, amelyekkel a nyomásveszteség értéke becsülhető. A Fanno és a Rayleigh áramlások alkalmazásával elvégezzük a TV2-117A hajtómű égőterének vizsgálatát.

Kulcsszavak: *gázturbinás hajtómű, égőtér, nyomás veszteség, Fanno áramlás, súrlódásos irreverzibilis áramlás, Rayleigh áramlás, hőellenállás*

TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A II. világháború végére a dugattyús légcsavaros repülőgépek elérték fejlődésük csúcspontját. Ez azt jelentette, hogy a sebességük valamivel meghaladta a 700 km/h-t. A repülési magasságuk egy vadászrepülőgép esetében elérte a 12 km-t, speciális felderítő változatok esetében pedig a 14–15 km-t. Ezek a korlátok ismertek voltak már a II. világháború előtt is, bár a világháborúba bekapcsolódó országok repülőgépei ekkor még nem közelítették meg ezeket a határértékeket. Ennek megfelelően több kutató is új irányokba indult a hajtómű fejlesztések tekintetében. Nemzetközi színtéren az angol Whittle munkássága kiemelendő, akinek az 1930-as években elkészített gázturbinás hajtóműve (1. ábra) minden olyan gépegységgel rendelkezett, amivel egy mai modern gázturbina.

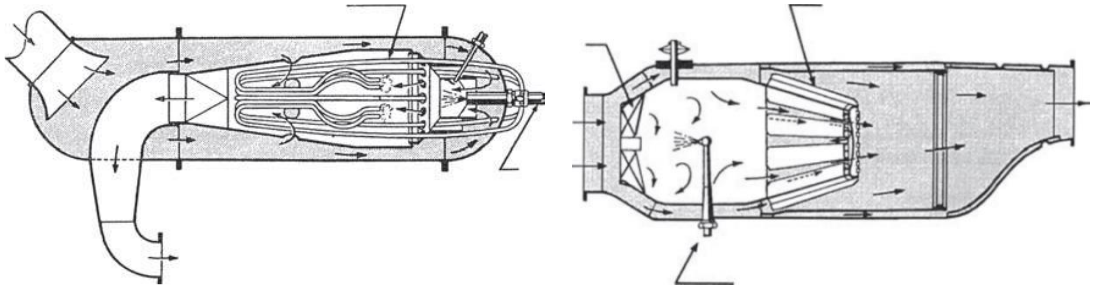


1. ábra Frank Whittle hajtóműve [1]

Az első működőképes repülőgépbe épített gázturbinás sugárhajtómű azonban a Hans von Ohain által tervezett *Heinkel HE S3* volt. A hajtóművet egy Heinkel HE 178 repülőgépbe építve, 1939. augusztus 27-én hajtották végre az első sugárhajtású géppel történő repülést. A 40-es években

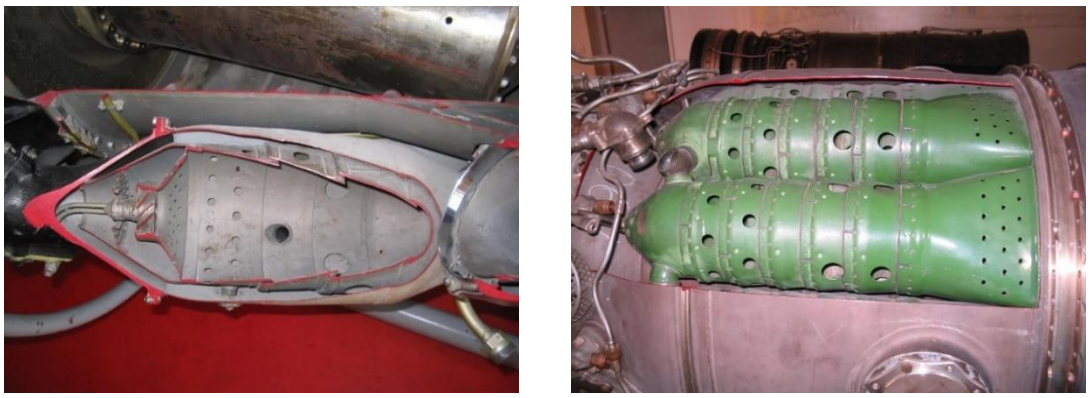
a sorozatban gyártott repülőgépekben is megjelentek is a gázturbinás hajtóművek, így például a Messerschmitt Me 262, Arado 234, vagy a szövetségesek részéről a Gloster Meteor repülőgépekben (habár ez utóbbi nem kapott még harctéri szerepet). Az 50-es években pedig végképp és visszavonhatatlanul berobbant a repülésbe a gázturbinás korszak.

A gázturbinás hajtóművek rengeteg gyermekbetegséggel rendelkeztek a kezdeti időszakban. Hiányoztak a megfelelő anyagok és technológiák. A kutatók sötétben tapogatództak. A II. világháború előtt, illetve a háború alatt kizárt volt minden együttműködés. Ilyen tekintetben még a szövetségi rendszereken belül sem valósult meg a tapasztalatok cseréje. Minden gépegységgel volt probléma, alacsony kompresszor nyomásviszony (2–3), alacsony turbina előtti gázhőmérséklet a turbina lapátok gyenge hőállósága miatt, alacsony gépegység hatásfokok. Mindezzel együtt a legnagyobb problémát a megfelelő égőterek megszerkesztése okozta. Tekintve az izolált fejlesztéseket, nem csoda, hogy az első generációs gázturbinás hajtóművek égésterei mind méretben mind kialakítás, mind pedig a tüzelőanyag porlasztása szempontjából nagy szórást mutattak, lásd az 1. ábrát.



2. ábra Bal oldalon Frank Whittle párologtatós égőtere, jobb oldalon a JUMO 004 hajtómű égőtere [5]

1950-re az információk cseréjének hatására egységesedett az égőterek tervezési filozófiája és megjelentek azok az égőtér formák, amelyekkel ma is találkozhatunk. Azóta a fejlesztés folyamatos, de hirtelen áttörésektől mentes. Jellemzőek a hasonló felépítések, amit az indokol, hogy az alapvető követelmények, kis nyomásveszteség, stabil működés széles üzemmód tartományban és tüzelőagyag-levegő keverék arány mellett, valamint maga a hajtómű geometriája meghatározóak az égőterek kialakítására is.



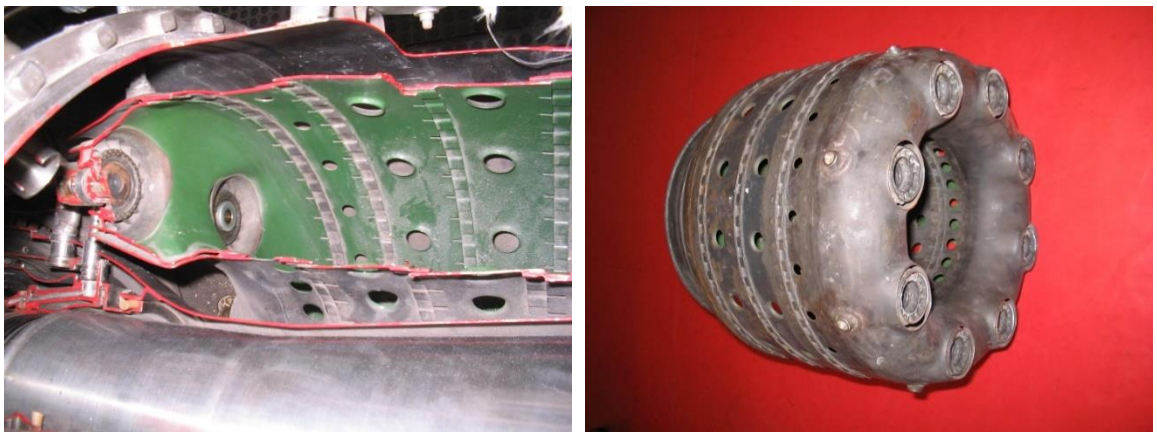
3. ábra Bal oldalon csöves, jobb oldalon csöves gyűrűs égőtér (saját kép)

Az elmúlt 70 évben három különböző égőtér elrendezés terjedt el, amelyből a csöves és a csöves gyűrűs elrendezést a 3. ábra szemlélteti. Hátrányai miatt manapság már mindkét fajta elrendezés kiszorult gyakorlati alkalmazásból.

A hatvanas évektől megjelentek és elterjedtek a gyűrűs égőterek, 4. ábra. Ezek jelentősen könnyebbek, kompaktabbak, nyomásveszteségi tényezőjük alacsonyabb (< 5%), jó keveredést és magas hatásfokot biztosítanak, illetve ami legfőbb előnyük, hogy a turbina belépő keresztmetszetén egyenletes gázhőmérsékletet biztosítanak. Nagy hátrányuk, hogy cseréjük csak a hajtómű teljes megbontásával lehetséges.

Elmondható, az égőtereknek is alkalmazkodniuk kellett a többi gépegység teljesítmény növekedéséhez. A belépő levegő hőmérséklete 450-ről 900 K-re, a nyomása 5 bar-ról 50 bar-ra, a kilépő hőmérséklet pedig 1100 K-ről egyes esetekben több mint 1800 K-re növekedett.

Szerkezeti anyagaik a nikkel alapú ötvözetek, illetve perspektivikusan a kerámia kompozitok jöhetnek szóba. Köszönhetően a szerkezeti anyagok tökéletesedésének az üzemi hőmérséklet jelentős növekedése ellenére az égőterek a korai néhány száz órás üzemideje mára több tízezer órára növekedett. Az égés hatásfoka csaknem száz százalékos, drasztikusan csökkentve ezzel a hajtóművek károsanyag kibocsátását.



4. ábra Bal oldalon gyűrűs égőtér, jobb oldalon a tűzcső maga (saját kép)

AZ ÉGŐTEREKKEL SZEMBEN TÁMASZTOTT FŐBB KÖVETELMÉNYEK

A gázturbinás hajtómű jó hatásfokú működéséhez szükséges, hogy minden egyes gépegység jó hatásfokkal működjön Mindazonáltal az égőterek esetében a hatásfokon kívül is számos egyéb tervezési megfontolást kell figyelembe venni. Hozzá kell tenni, hogy az égőterek tervezése, ellentétben a kompresszorokkal és turbinákkal, még manapság is döntően tapasztalati tényekre és mérésekre támaszkodik.

A hajtómű gyárak által felállított követelmények:

- tökéletes égés, csökkentve ezáltal a károsanyag kibocsátást, illetve a tüzelőanyag veszteséget;
- törekedni kell az égőtérben a minimális nyomásveszteségre (ennek részletezése és becslése a cikk fő kérdése);
- az égés teljes mértékben az égőtérben valósuljon meg, ha az égés a turbinában fejeződik be az jelentősen csökkenti annak élettartamát;
- lerakódások (kokszosodás) elkerülése. Ez részben jelzi a tökéletlen égést, valamint növeli az égőtér nyomásveszteségét és helyi extra magas hőmérsékletű pontokat hozhat létre az égőtérben, ami az égőtér átégéséhez vezethet;

- biztosítani a tüzelőanyag könnyű gyújtásának és lángkialvás esetén újra gyújtásának lehetőségét;
- hosszú élettartam és meghibásodás mentes működés;
- az égőtér kilépő hőmérsékletének mind időben, mind a teljes keresztmetszet mentén egységesnek kell lennie;
- a lángnak stabilnak kell maradnia a munkaközeg tömegáramának, sebességének és az egyéb üzemeltetési körülmények jelentős változása mellett is;
- nem lehet hajlamos a lángkialvásra, mert ez a tolóerő teljes elvesztését okozza;
- minimális méret és tömeg.

Az égés feltételei az égőterekben:

- az alkalmazott tüzelőanyagok sztöchiometrikus[1] égéséhez tartozó tüzelőanyag levegő keverési arány 0,06–0,07 között van. Az égésterekben a jellemző tüzelőanyag-levegő keverési aránnyal 0,015–0,03. Ugyanakkor az ún. elsődleges égési zónában a tüzelőanyag-levegő enyhén dús, 0,08 a magasabb égési sebesség miatt;
- az égésben résztvevő összetevőket gyulladási hőmérséklet fölé kell hevíteni mielőtt az égőtérbe lépnének;
- az égőtérben megfelelő hőmérséklet szükséges a folyamatos égés fenntartásához;
- turbulens áramlás szükséges a megfelelő keveredés biztosításához, ugyanakkor ez növeli az égőtér nyomásveszteségét. Ennek megfelelően okos kompromisszumot kell kötni annak érdekében, hogy a keveredés is megfelelő legyen, de ez még ne okozzon szükségtelenül nagy veszteséget;
- a tökéletes égéshez idő szükséges. Ha a gáz áramlási sebessége magasabb, mint az égés sebessége, lángkialvás következhet be. Égési sebességnek nevezzük a sebességet, amellyel a láng terjed nyugvó homogén eloszlású tüzelőanyag-levegő keverékben. A lamináris égési sebesség értéke tipikusan 0,5–2 m/s, míg a turbulens égési sebesség 20–30 m/s. Ennek megfelelően az égőtérnek egyrészt elegendően nagynak kell lennie, hogy az áramlási sebesség lecsökkenjen, másrészt az égőtér kialakítással visszaáramlási zónát kell kialakítani a megfelelő égéshez. Mindazonáltal, ahogyan korábban említésre került, ez növeli az égőtér nyomásveszteségét.

Az égőterek nyomásvesztesége

Az égőterekben a nyomásveszteség két fő okra vezethető vissza:

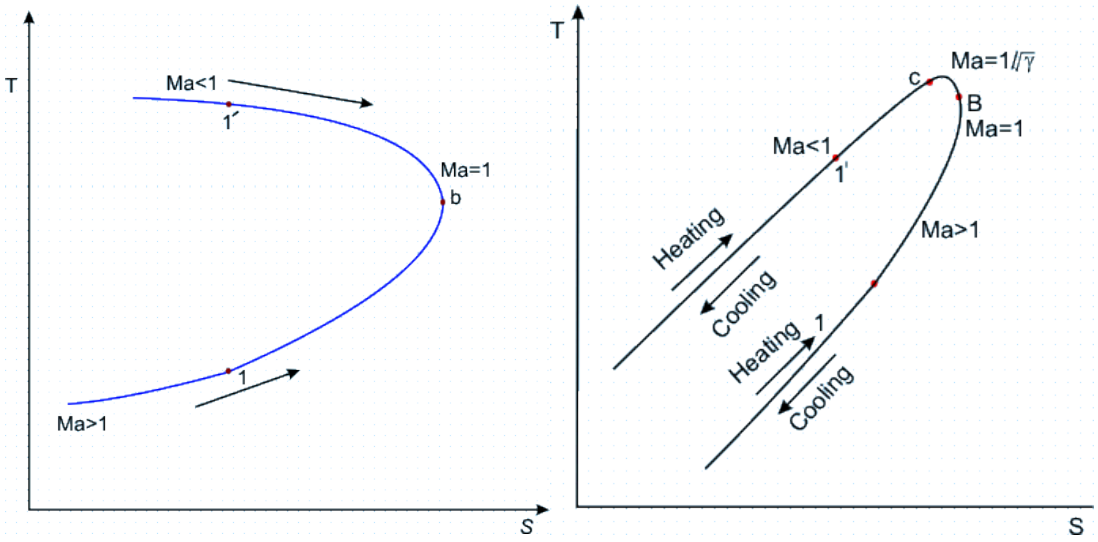
- az áramlás következtében az áramló közeg és a tűzcső fala között keletkező súrlódás;
- az égőtérben lejátszódó égési folyamat nem izentrópikus, irreverzibilis folyamat, amelynek következménye egy a hőmérséklet növekedéssel arányos hőellenállás;

A nyomásveszteség hozzávetőleges értékének meghatározásához a két veszteségforrásnak megfelelően két módszert kell alkalmazni. A súrlódás figyelembe vételére az ún. Fanno áramlás alkalmazható (ez a módszer a folyamat közbeni hőcserét nem veszi figyelembe). A második esetre a Rayleigh áramlás alkalmazható, ami pedig kifejezetten olyan áramlások esetében használható, ahol az áramlás közben hőcsere (jelen esetben hőközlés) van a rendszer és környezete között.

[1] Amikor az égéshez, mint kémiai reakcióhoz minden alkotó elem csak a szükséges mértékben van jelen.

Fanno áramlás

A Fanno görbe az áramló közeg fajlagos entrópiájának és hőmérsékletének összefüggését s = s(T) ábrázolja, amikor az entrópia megváltozását a mozgásmennyiség irreverzibilis vesztesége okozza. Feltételezzük ideális gáz adiabatikus (időben állandó) állandó, vagy közel állandó keresztmetszetű (nincs leválás az áramcsőben) áramlását. Az anyag-megmaradási tételből, az energia-megmaradási tételből és az ideális gáz állapotegyenletéből, az entrópia változása leírható. A súrlódás figyelembevételéhez további egyenletként az impulzus-megmaradás egyenlete használható fel. Ennek megfelelően a kezdeti gáz állapotjelzők, áramlási sebesség, áramcső geometriai adatai, a súrlódási tényező ismeretében meghatározhatóak az áramcső bármely pontjára az aktuális adatok. A hossz mentén ezeket az adatokat meghatározva és T-s diagramban ábrázolva megkapjuk az ún. Fanno görbét [2][3].



5. ábra Bal oldalon az ún. Fanno görbe, a jobb oldalon a Rayleigh görbe [3]

Ennek a felső szára szubszónikus, alsó szára pedig szuperszónikus áramlásra vonatkozik. Szubszónikus áramlásnál a súrlódás hatására az M szám nő, szuperszónikus áramlásnál pedig csökken. Mindkét esetben a cső hosszának növelése azt jelenti, hogy egy adott csőhossz után a cső lezár (a Fanno görbén a „b” pont) az áramlás M (az ábrán a Mach szám jele Ma) száma egyenlő lesz eggyel. Az égőtér vizsgálatánál a szubszónikus görbén (pl. 1’ pontnál) vagyunk a belépő keresztmetszetben, a kilépő keresztmetszet állapotát jellemző pont pedig a Fanno görbén elmozdul a „b” pont felé. Bármely kiinduló állapotra, csőgeometriára és súrlódási tényezőre a végállapot (kilépő keresztmetszet) állapotjelzői könnyen meghatározhatóak az interneten elérhető online számító programmal (*Compressible Aerodynamics Calculator*) [4], vagy a (*Compressible Flow Calculator*) androidos applikáció segítségével. A kiválasztott égőtér vizsgálatánál ezeket a szoftvereket használtam.

Rayleigh áramlás

A Rayleigh görbe (5. ábra jobb oldala) hasonlóan a Fanno görbéhez az áramló közeg fajlagos entrópiájának és hőmérsékletének összefüggését s = s(T) ábrázolja arra az esetre, ha az áramlás közben a rendszer (cső) és a környezete között hőcsere van, de az áramlás maga súrlódásmentes. Ebben az esetben is a görbe felső ága a szubszónikus, az alsó ága pedig a szuperszónikus áramlást jellemzi. Szubszónikus áramlásnál a hőközlés hatására az M szám nő, szuperszónikus áramlásnál

pedig csökken. A maximális statikus hőmérséklet értéke a „c” pontnál lesz, ahol $M=1/\kappa^{1/2}$. A „B” pont ebben az esetben is M=1 értékhez tartozik, ahol a csatorna lezár. Az égőtér vizsgálatánál a szubszónikus görbén (pl. 1’ pontnál) vagyunk a belépő keresztmetszetben, a kilépő keresztmetszet állapotát jellemző pont pedig a Rayleigh görbén elmozdul a „c” pont felé hasonlóan a Fanno görbéhez. A fenti program [4], illetve applikáció tartalmazza erre az esetre is.

Fanno áramlás alkalmazása a TV2-117A hajtómű égőterére

A vizsgálatot egy ún. „Felszálló” üzemmódon működő erőforráson végeztem el. A hajtóműre korábban elvégeztem a hajtómű körfolyamat számítást és a kompresszor fokozatok elemzését. Ennek megfelelően a kiinduló adatok. A belépő keresztmetszet fékezett nyomása, hőmérséklete, Mach száma sorrendben és adiabatikus kitevője: 662070 Pa, 523 K, 0,1744, 1,384 [6]. A kilépő keresztmetszet fékezett hőmérséklete 1148 K [6]. Az égőtér hossza és efektív átmérője mérések alapján: 0,34 m és 0,086 m. Az égőtér becsült súrlódási tényezője 0,04 [8].

Fanno Flow Perfect Gas, Gamma = 1.383

INPUT: Mach number ▾ = 0.1744 Calculate

M=	0.1744	**T/T*=**	1.18460024	**P/P*=**	6.24078798
P_o/P_o*=	3.38512015	**U/U*=**	0.18981581	**4fL*/D=**	20.1867614

6. ábra Az égőtér belépő keresztmetszetében a Fanno paraméterek [4]

Az adatokat beírva megkapjuk a viszonyított paramétereket jelen esetben a belépési keresztmetszetre.
ahol:

T, P, U – sorrendben hőmérséklet, nyomás és sebesség;

T_0 – az adott paraméterek fékezett értéke;

P^* – az adott paraméterek értéke a hangsebesség elérésekor (Fanno görbe jobb szélső pontja;

P_0^* – az adott paraméterek fékezett értéke a hangsebesség elérésekor (Fanno görbe jobb szélső pontja;

$4fL^*/D$ – dimenziótlan keresztmetszet-átmérő viszonyszám;

f – Fanno súrlódási tényező (1/4*Darcy súrlódási tényező);

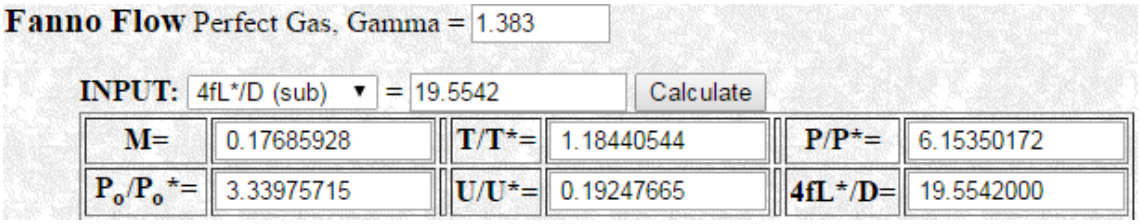
L – égőtér hossza;

D – Égőtér effektív átmérője;

σ_{sur} – az égőtér súrlódából származó nyomásveszteségi tényezője (a kilépő és belépő keresztmetszetek fékezett nyomásainak viszonyszáma.

Következő lépésként a belépési keresztmetsztre megkapott $\left[\frac{4fL^*}{D}\right]_1$ tényezőt módosítjuk a vizsgált áramcső (égőtér) adataival, majd ezt input adatként beillesztve megkapjuk a kilépő keresztmetszetre is a viszonyított paramétereket.

$$\left[\frac{4fL^*}{D}\right]_1 = 20{,}1867 \qquad \left[\frac{4fL^*}{D}\right]_{1-2} = \frac{4\cdot 0{,}04\cdot 0.34}{0{,}086} = 0{,}6325 \qquad \left[\frac{4fL^*}{D}\right]_2 = 20{,}1867 - 0{,}6325 = 19{,}5542 \tag{1}$$



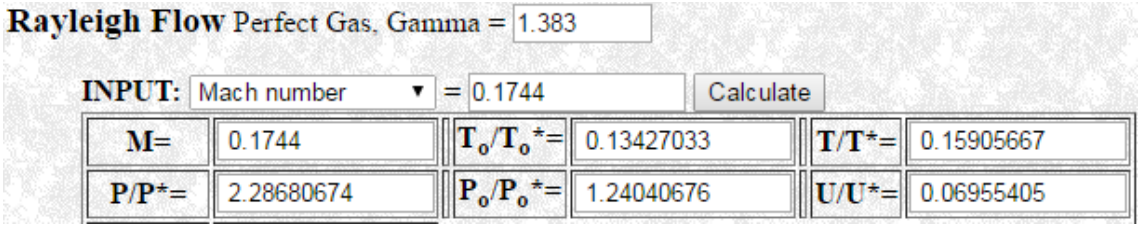
7. ábra Az égőtér kilépő keresztmetszetében a Fanno paraméterek [4]

Mivel T_0^* és P_0^* ugyanaz mindkét esetben, így a két viszonyszámot elosztva egymással megkapjuk a súrlódásból származó nyomásveszteségi tényezőt (σ_{sur}) a kilépő és belépő keresztmetszetek P_0/P_0^* értékeinek hányadosaként.

$$\sigma_{sur} = \frac{p_0 / p_0^*(kilépő)}{p_0 / p_0^*(belépő)} = \frac{3{,}3397}{3{,}3851} \approx 0.9865 \tag{2}$$

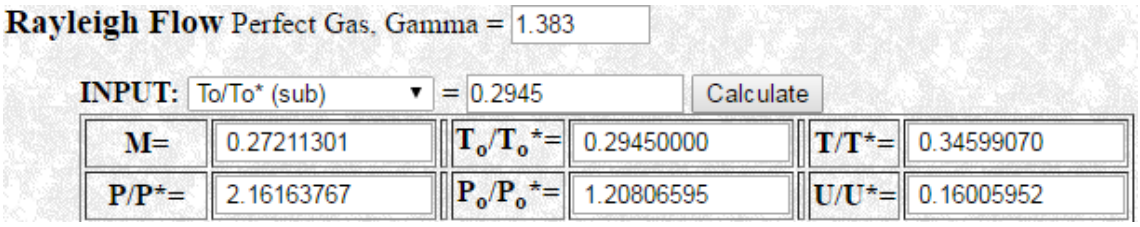
Reyleigh áramlás alkalmazása a TV2-117A hajtómű égőterére

Ebben az esetben a közölt hőből származó hőmérséklet emelkedés okozta nyomásveszteséget vizsgáljuk.



8. ábra Az égőtér belépő keresztmetszetében a Rayleigh paraméterek [4]

$$T_0^* = \frac{523K}{0{,}1342} = 3897K \qquad p_0^* = \frac{662070Pa}{1{,}2404} = 533755Pa \qquad \frac{T_{0u}}{T_0^*} = \frac{1148K}{3897K} = 0{,}2945 \tag{3}$$



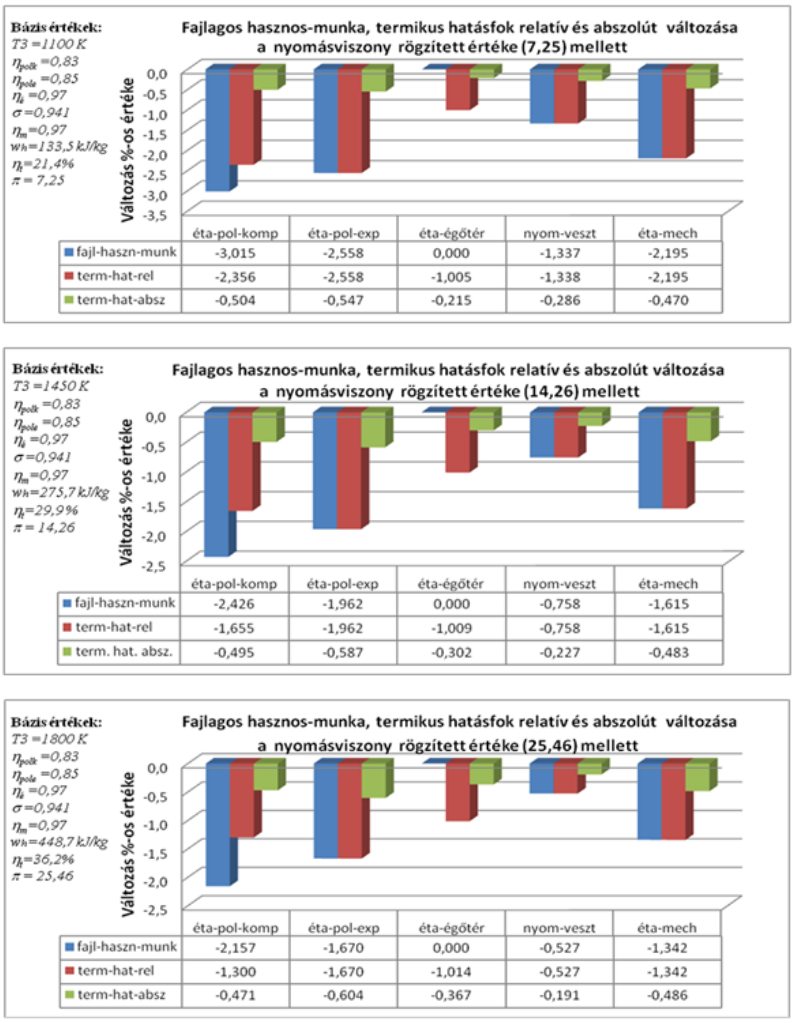
9. ábra Az égőtér kilépő keresztmetszetében a Rayleigh paraméterek [4]

$$p_{0u} = 1{,}2080 \cdot 533755Pa = 644776Pa \qquad \sigma_{hő} = \frac{644776Pa}{662070Pa} \approx 0{,}9738 \qquad \sigma_{\Sigma} \approx 0{,}9865 \cdot 0{,}9738 = 0{,}9607 \tag{4}$$

A számítás során négy tizedesig jelöltem az értékeket. Természetesen egyéb pontatlanságok miatt ez nem indokolt, de az eredményként kapott 4% körüli nyomásveszteség reálisnak tekinthető. Általában termikus körfolyamat számításakor is 3–5%-os nyomásveszteséget szoktunk feltételezni az égőterekben.

A NYOMÁSVESZTESÉG HATÁSA A HAJTÓMŰ FAJLAGOS HASZNOS MUNKÁJÁRA ÉS TERMIKUS HATÁSFOKÁRA

A gázturbinás hajtóművek gépegység hatásfokainak és veszteségeinek jelentős, de nem azonos mértékű hatásuk van a hajtómű fajlagos-hasznos munkájára és termikus hatásfokára (mindkettő fontos jellemzője a hajtómű jóságának), illetve maximumukhoz tartozó optimális kompresszor-nyomásviszony értékekre.



9. ábra A gépegység veszteségek hatása a fajlagos hasznos munkára és a termikus hatásfokra változatlan turbina előtti gázhőmérséklet és nyomásviszony mellett [7]

A szerzők egyikének PhD értekezésében létrehozott modell segítségével ábrázolásra kerültek ezek a paraméterérzékenységi adatok, az ábrák bal felső sarkában feltüntetett gépegység veszteségeket feltételezve (9. ábra) [7]. Az ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a gépegység nyomásveszteségek (benne az égőtér nyomásvesztesége, balról a negyedik oszlop) növekedésének hatására mind a fajlagos hasznos munka, mind a termikus hatásfok viszonylag mérsékelten csökken, de a turbina előtti hőmérséklet növekedésével a romlás csökkenő jelleget mutat.

Konklúzióként levonható, hogy a hajtómű legérzékenyebben a kompresszor politrópikus hatásfokára reagál, ezt követi az expanzió politrópikus hatásfoka, a mechanikai veszteségek, az összegzett nyomásveszteségek (amibe beletartozik az égőtér nyomásvesztesége is) és végül az égőtér hatásfok.

ÖSSZEFOGLALÁS

A gázturbinás hajtóművek égőtereinél alapvetően kétféle veszteséget definiálhatunk. Az egyik az égés tökéletlenségéből adódó veszteség, amit az égési hatásfokkal jellemezhetünk. A másik a nyomásveszteségi tényező, amelynek vizsgálata a jelenlegi cikkünk témája. Az égőtér nyomásveszteség két részből áll. Ennek egyike az áramlás surlódásosságából származó nyomásveszteség. Sajátossága az égőtereknek, hogy az előbb említett égési hatásfok csak ennek a súrlódásból származó nyomásveszteségnek a rovására javítható. Ennek megfelelően a tervezőknek kompromisszumos megoldást kell találniuk olyan szempontból, hogy a legjobb égési hatásfokhoz a turbulencia még elégséges, de csak a szükséges mértékű legyen. További nyomásveszteség származik a hőközlés okozta ún. hőellenállásból. Jelen vizsgálat alapján a teljes veszteség kb. 2/3 része származik ez utóbbiból, míg a maradék 1/3 a súrlódásból. Megvizsgálva a hajtóművek paraméterérzékenységi mutatóit egy átlagos hajtómű esetében az égőtér nyomásveszteségi tényező romlása viszonylag mérsékelten rontja a hajtómű teljesítmény adatait, ellentétben a kompresszor, vagy a turbina hatásfokok romlásával, amelyek igen intenzív [7].

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] url: http://it.wikipedia.org/wiki/File: Whittle_Jet_Engine_W2-700.JPG, (2013.07.15.)
[2] url: http://www.ara.bme.hu/oktatas/letolt/lljegyzet/GD_05p.htm, (2017.01.01.)
[3] url: http://nptel.ac.in/courses/112104118/ui/Course_home-12.htm, (2017.01.01.)
[4] url: http://www.dept.aoe.vt.edu/~devenpor/aoe3114/calc.html, (2017.01.01.)
[5] Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal, Gas Turbine Combustion, Alternative Fuels and Emissions, Taylor and Francis Group, 2010
[6] Varga Béla: A TV2-117A hajtómű termikus matematikai modellje, Diploma munka, Budapesti Műszaki Egyetem, 1990.
[7] Varga Béla: Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatásfok növelésének műszaki technológiai háttere, és ezek hatása a katonai helikopterek korszerűsítésére, PhD értekezés, Budapest, 2013, http://uninke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2013/varga_bela.pdf, p. 47-81
[8] Ronald D Flack, Fundamentals of Jet Propulsion with Applications, Cambridge University Press, Cambridge, 2005.

GAS TURBINE ENGINE COMBUSTORS AND THE ESTIMATION OF THEIR PRESSURE LOSS

Combustor is a crucial component of the gas turbine engine through which the chemical energy of the fuel is converted into thermal energy with minimal pressure loss and maximal efficiency meanwhile the emitted harmful pollutants and the deposit must be minimised. That condition can be achieved through highly turbulent flow which description with numerical methods is difficult even today. In accordance with it the design of combustor is based more empiricism collected from the previous experiences and tests. In this paper we deal with the pressure loss in the combustors examining what kind of methods, empirical equations can be used to predict the estimated value of pressure loss. Using the Fanno and Rayleigh line flow we tried to determine the pressure loss in the combustor of TV2-117A turboshaft engine.

Keywords: *gas turbine engine, combustor, pressure loss, Fanno line flow, nonisentropic irreversible flow, Rayleigh line flow, heat drag.*

Varga Béla (PhD) Egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Sárkány-hajtómű Tanszék varga.bela@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825	Varga Béla (PhD) Associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine varga.bela@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825
Kavas László (PhD) Egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Sárkány-hajtómű Tanszék kavas.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527	Kavas László (PhD) Associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine kavas.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „AVIATION_FUEL” nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-07-0380-Varga_Bela-Kavas_Laszlo.pdf

Nyári Péter, Kerekes Attila, Szabó József Zoltán

KÖNNYŰSZERKEZETŰ JÁRMŰ HÁTSÓ FUTÓMŰ OPTIMALIZÁLÁSA

Kutatómunkánk célkitűzése egy nemzetközi, egyetemek közötti üzemanyag takarékossági versenyen résztvevő könnyűszerkezetű prototípus jármű hátsó futóművének tervezési peremfeltételeinek, tervezés menetének, kivitelezése, majd az elkészült alkatrész tesztelésének megvalósítása. A jármű karbon-kompozit héjszerkezettel rendelkezik, futóműve moduláris felépítésű, csőszerkezetű a szerelhetőség, későbbi fejlesztési potenciál kihasználásának érdekében. A tervezés során figyelembe vettük az előző évek során szerzett tapasztalatainkat, verseny követelményeket, a megvalósíthatóságot, és fenntarthatóságot. Az elkészült alkatrészt valós terhelések között tesztelve mérjük a szerkezet torzulását, melyet összevetünk a szimulációk eredményével.

Kulcsszavak: *Shell Eco-marathon, OECO, prototípus, könnyűszerkezetű, karbon-kompozit, futómű, tervezés, fenntarthatóság,*

1. BEVEZETŐ

Az OECO az Óbudai Egyetem járműépítő csapata, mely minden évben részt vesz Európa legnagyobb, egyetemek közötti üzemanyag takarékossági versenyén, a Shell Eco-marathonon saját építésű benzines prototípus járművével.

A verseny célja, hogy 1 liter 95-ös oktánszámú benzin energiatartalmával minél nagyobb távolságot tegyenek meg a járművek. Csapatunk eddigi legjobb eredménye 565,5 km, aminek megtételéhez mindössze 1 liter benzinre volt szükségünk. Ahhoz, hogy ilyen kedvező fogyasztást érjünk el, a lehető legkisebb tömegre törekszünk modern anyagok, és technológiák felhasználásával, többek között önhordó karbon-kompozit karosszéria, és belső elemek, additív gyártással [1] készült, egyedi polimer elemek [2] és nagy szilárdságú fémek felhasználásával. Jelenlegi járművünk karosszériája alig haladja meg a 10 kg-ot, míg a komplett, menetkész jármű tömege 45 kg alatt marad.

Bár a verseny eredeti koncepciója szerint belsőégésű motorokkal hajtott járművek versenyéről lenne szó, a verseny szervezői követik a technológiai fejlődését a járműiparnak, így különböző alternatív, vagy megújuló energiaforrásokkal hajtott járművek is részt vehetnek a versenyben. Csapatunk OTTO ciklus szerint üzemelő belsőégésű motorral hajtja a járművet, mivel napjainkig még mindig ez a leginkább elterjedt erőforrás a járműiparban. Motorunk egy átalakított 35 cm^3-es Honda univerzális motor, melyet saját felhasználási igényeinkhez alakítottunk, többek között megváltoztattuk az üzemanyag ellátását, szívó, és kipufogó csatornáját, szelepvezérlését, és megfelelő bevonatokkal láttuk el a nagy terhelésnek kitett felületeket. Ezeknek a változtatásoknak, és a fejlett motorvezérlő elektronikának köszönhetően a motor gyári teljesítmény értékei lényegesen alacsonyabb, ~3500 1/min fordulatszámon rendelkezésünkre áll. Ezzel csökkentettük a munkaütemek számát, amivel arányosan csökkent a motor üzemanyag fogyasztása is.

A cikk célja a prototípus járművünk hátsó futómű konstrukciójának bemutatása, és a jövőbeni célkitűzéseink leírása.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet az előző évek tapasztalatait és a fejlesztési

irány kitűzését mutatja be. A 3. fejezet az anyagválasztás, valamint a jármű konstrukcióját mutatja be. A 4. fejezet a kivitelezés során felhasznált gyártástechnológiákat mutatja be. Az 5. fejezetben a cikk összefoglalására kerül sor.

2. AZ ELŐZŐ ÉVEK TAPASZTALATAI, FEJLESZTÉSI IRÁNY KITŰZÉSE

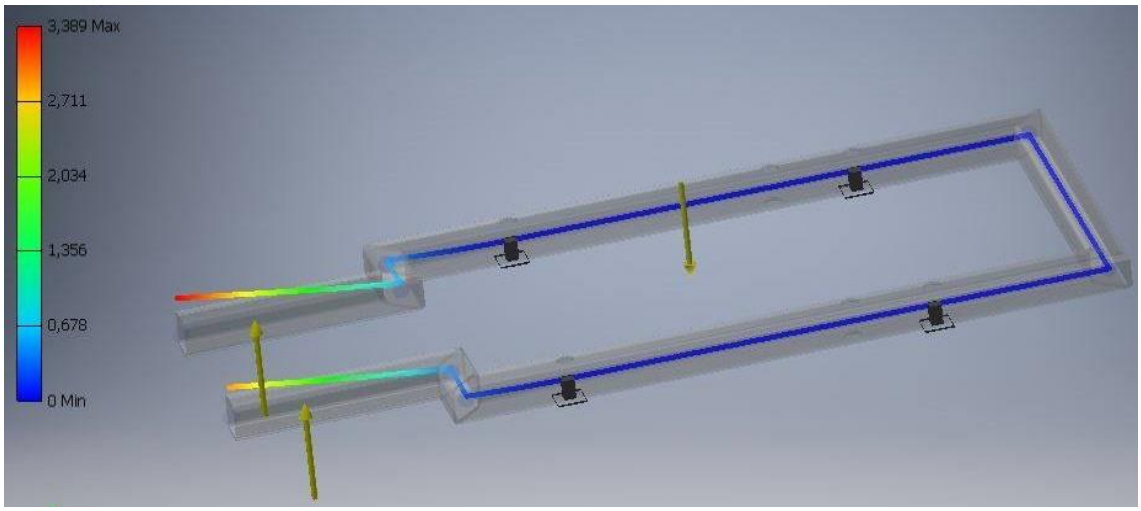
Új fejlesztésű járművünk tervezése során nagy hangsúlyt fektettünk az előző versenyek során szerzett tapasztalatok hasznosítására. A verseny során a futamok között viszonylag rövid időkeretünk van a jármű átnézésre, esetleges hibák javítására, emiatt a szerelhetőség, és hozzáférhetőség az egyik legfontosabb szempont, amit szem előtt tartottunk. Jelenlegi hátsó futóművünk (lásd 1. ábra) felépítését úgy alakítottuk ki, hogy a hátsó kerék, annak fékező mechanizmusa, a hajtás, és az erőforrás is egy közös vázon helyezkedik el. Így egy esetleges szerelési művelet során könnyen hozzáférhetővé tehetjük a komplett váz járműből történő kiemelésével. Ennél a konstrukciónál a váz 20x20 mm keresztmetszetű 1,5 mm falvastagságú zártszelvényből készült, amit 6 darab csavar rögzített a karbon-kompozit vázban kialakított pontokban. Ezen csavarok, és az elektromos csatlakozások szétválasztása után a komplett futómű-hajtás egység kiemelhető, majd a járművön kívül beállítható, tesztelhető. Utóbbi tulajdonságnak nagy szerepe van a motorbeállítás során, hiszen így a komplett jármű nélkül is végezhetünk teszteket, vagy módosíthatjuk az erőforrásunk beállításait, eközben pedig a járművön elvégezhetőek az egyéb karbantartások.



1. ábra Jelenlegi hátsó futómű, hajtás kiszerelt állapotban (saját felvétel)

A korábbi években igyekeztünk a jármű hajtását, és felfüggesztését fejleszteni, leginkább a tömegcsökkentés irányában. Ennek érdekében az eredeti koncepciót kissé átalakítva, az acél vázat alumínium szelvényekből hegesztett keretre cseréltük és a karosszériában kialakítottunk még két rögzítési pontot. A motortartó alumínium lemez helyett egy egyedi méhsejt maganyag mindkét oldalára 3–3 rétegben laminált karbonszövettel erősített lapot alkalmaztunk, melyet a

kritikus helyeken pottinggal[1] erősítettünk meg. A szimulációk bizakodásra adtak okot, hiszen azok alapján arra számítottunk, hogy közel 3 kg-ot nyerhetünk az új felépítésű váz alkalmazásával, közel azonos deformáció mellett.



2. ábra Alumínium villa deformációja Autodesk Inventor szimulációs környezetben (saját szerkesztésű ábra)

A tesztek során viszont kiderült, hogy sajnos az elkészített alumínium-kompozit váz merevsége lényegesen elmarad az Autodesk Invetor modellezési környezetében végzett szimulációban (lásd 2. ábra) látottakhoz képest. Nagymértékű, oldalirányú terhelés esetén (például: nagysebességű kanyarokban) a váz torzulása a vártnál lényegesen nagyobb volt, a kiegészítő rögzítések ellenére is, így a hajtó-, és hajtott tengely szögeltérése megnőtt. Ennek hatására a hátsó lánckerekünkön a lánc félrefutott, ezáltal károsítva a lánckereket, és leblokkolva a járművet. Szétszerelés közben észleltük, hogy a motortartó lap is deformálódott, a rá került olajszármazékoknak és az erőforrásból sugárzó hőnek köszönhetően.

Ezen tapasztalatokkal gazdagodva az új fejlesztésű járművünk futóművénél kerültük a könnyűfémek használatát, mivel merevségük nem kielégítő számunkra az általunk gazdaságosan alkalmazható technológiák felhasználásával. A további fejlesztések során a kompozit elemeket is csak olajszármazékoktól és sugárzó hőtől mentes helyen alkalmazunk.

3. ANYAGVÁLASZTÁS, A JÁRMŰ KONSTRUKCIÓJÁNAK BEMUTATÁSA

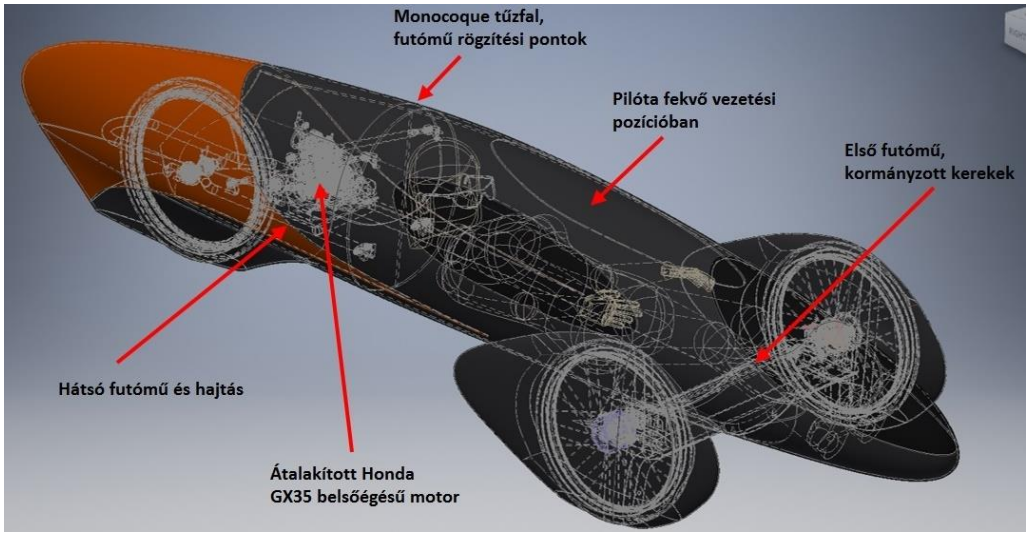
A fent leírt tapasztalatok felhasználásával a tervezés során nagy szilárdsági tulajdonságú, de könnyen megmunkálható, ugyanakkor költséghatékony anyagot kerestünk a váz alapjának. Végül vékonyfalú, kis átmérőjű króm-molibdén ötvözetű acélcsőre esett a választásunk, ami az acélnál könnyebb, azonban igen tartós és ellenálló, rugalmas ötvözet. Könnyen hegeszthető, ezáltal a króm-molibdén ötvözetű vázak jóval tartósabbak és ellenállóbbak, mint a hagyományos acél vázak [3]. Anyagtulajdonságai, és beszerezhetősége miatt a 25CrMo4 ötvözetre esett a választásunk, melynek összetételét az 1. táblázatban tüntettük fel.

[1] Potting: Kitöltő mátrixanyag, kis tömegű, és sűrűségű, de nagy szilárdságú, két komponensű kitöltőgyanta

Ötvöző	Ötvöző tartalom
C	0,25%
Si	0,25%
Mn	0,7%
Cr	1,05%
Mo	0,25%

1. táblázat 25CrMo4 ötvözet adatai **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**

Mivel az új jármű karosszériájánál is a lehető legalacsonyabb tömegre törekedtünk, így csak az úgynevezett monocoque[2] készül teherviselő elemként, a karosszéria egyéb burkoló elemei nem képesek nagy terhelések felvételére. Ezzel jelentős súlyt takarítunk meg, viszont a felfüggesztés rögzítését csak a monocoque tűzfalán tudjuk megoldani. (lásd 4. ábra) Erre kitámasztó rudakat helyeztünk a koncepcióba, melynek anyagát szénszálas műanyag rúdnak választottunk, melynek kihajlási tulajdonságai kedvezőek a konstrukció szempontjából. Ezzel minimális tömeg hozzáadásával tudjuk megtámasztani a hátsó villát.



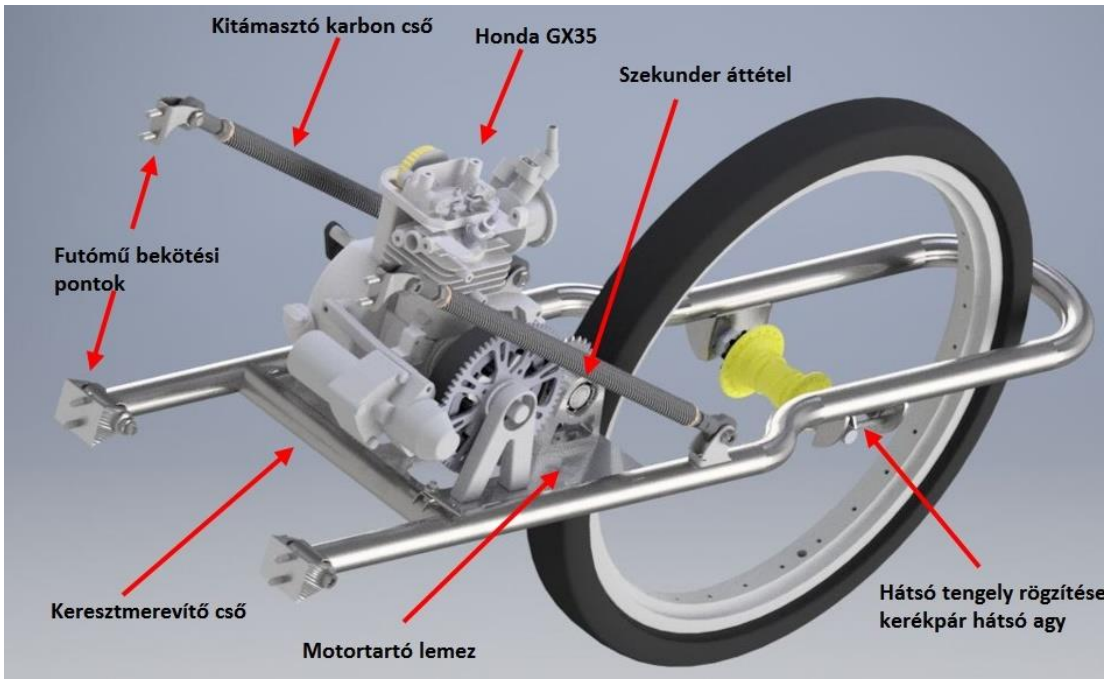
3. ábra Jármű részegységei (saját ábra)

A motorfejlesztés és tesztelés során arra a következtetésre jutottunk, hogy az erőforrásnak használt kis lökettérfogatú, rövid löketű motorunk üzemi fordulatszámát tovább csökkenteni nem tudjuk teljesítménycsökkenés nélkül. A megújult versenypálya domborzata miatt pedig egy erőteljesebb, nagyobb forgatónyomatékkal rendelkező hajtásra van szükségünk, ami csak fordulatszám emeléssel valósítható meg. Ezzel az elméleti végsebességünk is növekedne, amit a verseny során nem tudunk kihasználni, így a motor nem tud a számára optimális fordulatszám tartományban üzemelni, ezzel a hatásfokunk csökkenne. Az áttétel módosítás elkerülhetetlenné vált, viszont a megvalósítani kívánt áttételt egy lépcsőben megvalósítani nem lehet, a lánckerék mérete miatt, így egy szekunder áttételre van szükségünk, amivel az üzemi fordulatszámot a megfelelő tartományok közé tudjuk szorítani.

[2] Monocoque: Francia eredetű szó, jelentése: egy héj. Ez a fajta vázszerkezet rendkívül jól viseli a rá ható terheléseket, nagy merevség, kis tömeg jellemzi.

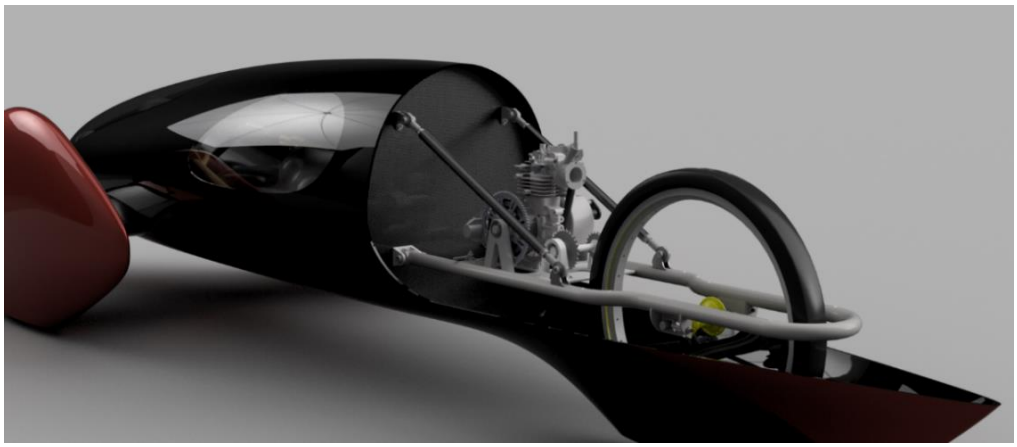
3.1 A hátsó felfüggesztés konstrukciójának kialakítása

A koncepció kialakítása után, a karosszéria kialakítását is figyelembe véve, megkezdődött a hátsó futómű 3D modellének kialakítása. A csővázat 25 mm átmérőjű, 1 mm falvastagságú csőből alakítottuk ki, U alakhoz közelítve, olyan módon, hogy a motor, és szekunder hajtás egy lemezen került elhelyezésre az egyszerű rögzítés, és állíthatóság érdekében (lásd 5. ábra). Az oldalirányú, csavaró igénybevételből származó torzulás mérséklésére egy keresztirányú összekötő csövet építettünk be a motortartó lemez elé.



4. ábra Hátsó futómű, és hajtás összeállított modellje (saját szerkesztésű ábra)

Az erőforrás rezonanciáinak izolálása érdekében az alsó bekötési pontban gumi rezgéscsillapító bakokon keresztül kapcsolódik a váz a tűzfalhoz, ezzel a pilóta komfortérzetének növekedését, illetve az elektronikus berendezések vibráció terhelés csökkenését értük el.



5. ábra Hátsó futómű elhelyezkedése a járműben (saját szerkesztésű ábra)

A kitámasztó rúd 17×3 mm keresztmetszetű, egyedileg tekercselt karboncsőből készül, végein textilbakelit illesztékkel, amibe a rögzítésre szolgáló gömbcsuklót illeszteni tudjuk.

Az elkészült modell négy csavarkötés oldásával könnyedén kiemelhető a járműből, így gyorsan, és jól hozzáférhetően szerelhető, ugyanakkor biztonságosan és reprodukálhatóan rögzíthető a jármű tűzfalán. Összességében az egység tömege minimálisan növekedett az előző megoldáshoz képest, viszont az áttervezett rögzítésnek köszönhetően a karosszéria tömege tovább csökkenthető. A moduláris felépítésből adódóan ugyanazon karosszériába többféle futómű változat beépíthető, ezzel a későbbi fejlesztések során nem kell egyéb rögzítési pontokhoz alkalmazkodni.

4. KIVITELEZÉS SORÁN FELHASZNÁLT GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁK

Tervezés során szem előtt tartottuk, hogy az elkészített modell elterjedt, megfizethető technológiákkal legyártható legyen. A csőváz kialakításához CNC vezérelt csőhajlítást választottunk, mivel így garantálható hogy az elkészült váz pontos, és szimmetrikus lesz, valamint könnyedén reprodukálható amennyiben szükséges. A rögzítő, és összekötő elemeket lemezalkatrésznek terveztük, amit vízsugaras vágással, majd élhajlítással könnyedén, kis költséggel előállíthatunk. Az elkészült alkatrészeket AWI hegesztéssel, saját anyagával hegeszthetjük, így lényegi anyagtulajdonság változás nélkül, esztétikus, és pontos alkatrészt tudunk előállítani [5].

A projekt során szem előtt tartjuk, hogy az elkészített modellek fejlesztése fenntartható, és folyamatos legyen. Ennek érdekében az elkészült villát az új járműben, valós körülmények között tesztelve, annak alakváltozását rögzítve következtethetünk a szimulációnk pontatlanságaira. Ezen adatokat felhasználva optimalizálhatjuk a vázszerkezetet, ahol szükséges ott merevítéssel erősíthetjük, ahol viszont a váz terhelése kicsi, lehetőségünk van optimalizálni a konstrukciót az egyenszilárdságra törekedve. Így tömeg- vagy méretcsökkenést érhetünk el, ami segíti a versenyen elért eredményünk javítását.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jövőbeli céljaink között szerepel, hogy járművünk tömegét még tovább csökkentsük, erre leginkább a futóművek területén lesz lehetőségünk. A váz üzem közbeni torzulásainak mérésére nyúlásmérő bélyeges technológiát tervezünk alkalmazni, melynek segítségével nyomon követhetjük a szerkezet alakváltozását, és az azt érő terheléseket. Mivel nem egyszerű húzó, vagy nyomó igénybevételről van szó, rozetta bélyegrácsot kell alkalmazni, amellyel bármilyen irányú alakváltozást nyomon tudunk követni [6]. Ezzel az elemzéssel a jövőben tervezett fejlesztések irányát meg tudjuk határozni, és segíteni a folyamatos fejlődést.

A már megismert valós terhelések alapján lehetőségünk van más keresztmetszetű szelvényeket alkalmazni, vagy akár más anyagjellemzőkkel bíró, kisebb fajsúlyú anyagot választani. További céljaink között szerepel a jármű rezonanciájának csökkentése, amit sajátfrekvencia méréssel tudunk vizsgálni, ki-, illetve felfutás méréssel. Ezek alapján ODS mozgás animációs méréseket tudunk készíteni.

Mivel a csapatunk egyetemünk hallgatóiból áll, ezért egy csapattag maximum 2–3 évig tud aktívan részt venni a fejlesztésben, utána át kell adnia a megszerzett tudást és tapasztalatokat a helyébe lépő új csapattagnak. Emiatt nagy hangsúlyt fektetünk a projekt és a feladatok dokumentációjára, ezzel fenntartható a folyamatos fejlesztés, fejlődés.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Nyári Péter, Kerekes Ferenc Attila, Szabó József Zoltán: Additív gyártástechnológiák alkalmazása a környezettudatos prototípus gyártásban, Budapest, IFFK 2016. augusztus 29-31, pp. 3-4.
[2] Kerekes Ferenc Attila, Nyári Péter, Szabó József Zoltán: Ökológiai lábnyomunk csökkentése a járműgyártásban környezettudatos technológiák alkalmazásával, Budapest, IFFK 2016. augusztus 29-31, pp. 2-4.
[3] Kisfaludy Antal, Réger Mihály, Tóth László: Szerkezeti anyagok I. ÓE BL 299, Budapest 2010
[4] 25crmo4 adatlap, (online) url: www.saarstahl.com/sag/downloads/download/11836 (2017.03.04)
[5] Kisfaludy Antal, Réger Mihály, Tóth László: Szerkezeti anyagok II. BMF-BGK, Budapest, 1995.
[6] Bevezetés a nyúlásmérő bélyeges méréstechnikába, (online) url: http://www.hbmiroda.hu/save/uplpdf/34-hbm_nyulasmero_belyeg_tanfolyam_pk_ea.pdf (2017.03.06)

LEIGHTWEIGT VEHICLE REAR SUSPENSION OPTIMIZATION

Our research aims are an international competition designed for fuel-saving vehicles, lightweight race prototype vehicle rear suspension design, design process, execution, and then the manufactured component testing, measurement and evaluation. The vehicle's carbon-composite monocoque-sub has a chassis of modular construction, pipe structure in order to assemble, use of future development potential. We took into account the experience gained from the previous year, followed up by a recements, feasibility and sustainability. After execution of the completed parts we want to measure the distortion between actual charges and compare the results of the simulations.

Keywords: *Shell Eco-marathon, OECO, lightweight prototype, carbon-composite chassis, design, sustainability*

Nyári Péter BSC hallgató, OECO csapatvezető Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet nyari.peter@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8437-7117	Nyári Péter BSC student, OECO team leader Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute nyari.peter@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8437-7117
Kerekes Ferenc Attila intézeti mérnök Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet kerekes.attila@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-5103-1742	Kerekes Ferenc Attila institute engineer Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute kerekes.attila@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-5103-1742
Dr. Szabó József Zoltán (PhD) intézetigazgató helyettes, egyetemi docens Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-9129-9049	Dr. Szabó József Zoltán (PhD) Deputy Director of Institute, associate professor Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Mechatronics and Vehicle Technical Institute szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-9129-9049

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-08-0385-Nyari_P-Kerekes_A-Szabo_J_Z.pdf

Fricke Cathy, Kardos Péter

NEURÁLIS HÁLÓZATOK ALKALMAZÁSA A LÁTÁSTÁVOLSÁG ULTRARÖVIDTÁVÚ ELŐREJELZÉSÉBEN

A látástávolság, mint repülésmeteorológiai szempontból kiemelkedő fontossággal bíró időjárási paraméter előrejelzése máig kihívást jelent az előrejelzők számára. A feladat megoldásához a tapasztalatok szerint a statisztikai alapú modellek nyújtanak leginkább segítséget. A neurális hálózatok (Neural Nets) is egy ilyen nemlineáris statisztikai modell, amely a látástávolságot befolyásoló meteorológiai paraméterek és a látástávolság között egy múltbeli (tanuló) adatsor alapján feltárja a legalapvetőbb összefüggéseket és ez alapján becsüli a látástávolság várható értékét. Vizsgálatink során különböző szerkezetű és formában eltérő adatokon tanuló hálózatokat teszteltünk, amelynek eredményeként egyes hálózatok előrejelzései meghaladták az ultrarövid távon kifejezetten jól teljesítő perzisztencia prognózist, így többletinformációval szolgált a látástávolság előrejelzése során.

Kulcsszavak: *neurális hálózatok, ultrarövid távú előrejelzés, látástávolság, repülésmeteorológia*

LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZÉSE

Az elmúlt évtizedekben több ezer ködderl kapcsolatos publikáció született, amely azt mutatja, hogy fontos kutatási terület, és sok munkát fektettek a jelenség megismerésére. Ennek ellenére a látástávolság ultrarövid távú előrejelzésének (nowcasting) pontosítása máig további kutatásokra szorul, mivel e repülésmeteorológia szempontjából releváns időjárási paramétert olyan térben és időben változó folyamatok kölcsönhatásai határozzák meg, amelyekre hatással van a mikrofizika, a sugárzás, a turbulencia és a felszíni sajátosságok, és ezek explicit ismerete hiányos [1].

A látástávolság azon időjárási változók közé tartozik, amely nem áll elő numerikus előrejelzési modellek output-jaiként. Más nedvességhez kapcsolódó paraméterhez hasonlóan a nagyskálájú numerikus modellek a felszínközeli magas páratartalom kialakulásának komplexebb folyamatait nem képesek elegendően nagy pontossággal rekonstruálni. Finomabb felbontású 3D-s modellek segítségével javítható az előrejelzés, de ezek operatív gyakorlatban történő alkalmazása nem terjedt el a magas számítási költség miatt. Az 1D-s modellek költséghatékonyabbak, de alkalmazhatóságuk korlátozott az összetett felszínborítottságú területeken.

A repülésmeteorológiai gyakorlatban a látástávolság ultrarövidtávú előrejelzése a következő két órára terjedő időszakra történik, amelyre numerikus előrejelzést a nagy számítási igény és a fenti okok miatt sem szoktak a gyakorlatban készíteni. A látástávolság rövidtávú előrejelzésében ezért a statisztikai módszerek terjedtek el és több hazai eredmény is bizonyítja, hogy alkalmasak a gyakorlatba történő adaptálásra [2]. Az analógiás módszerrel történő előrejelzés is ilyen statisztikai alapon működő modell, amely során fuzzy logikán alapuló hasonlósági metrika segítségével megkeresik a jelen időjárási állapotot jellemző paraméterekhez leginkább hasonlót a rendelkezésre álló adatbázisban [3]. A meteorológiai helyzet szempontjából kiemelkedően fontos paraméterek nagyobb súlyokat kapnak, aminek következtében növelhető a látástávolság előrejelzésének pontossága. Mivel a prognózis múltbeli adatok alapján készül, ezért minél nagyobb a különbség a paraméterek között, annál nagyobb az előrejelzés bizonytalansága. Wantuch [4] a látástávolság és az időjárási változók

közötti kapcsolat feltárására a Perfekt Prognosztikán (PP) alapuló döntési fa módszerét alkalmazta, amelyet a látástávolság operatív előrejelzési gyakorlatába is adaptált. A döntési fát egy elemzések eredményeként kapott indexen (FOGSI) alkalmazta, amely a látástávolság és modell kimeneti paraméterek között teremt fizikai kapcsolatot. A FOGSI és a látástávolság között lineáris regressziós kapcsolat létesíthető, amelyet két éves adatbázis alapján határoztak meg. Az indexet Nagy Roland [5] diplomamunkája során tovább finomította (módosított FOGSI), ennek eredményeként a látástávolsággal szorosabb lineáris kapcsolat volt kimutatható. Nagy Roland emellett a látástávolság neurális hálózatokkal történő előrejelzésével is foglalkozott és megmutatta, hogy a neurális hálózatok által készített ultrarövidtávú előrejelzésekre vonatkozóan a perzisztencia prognózisnál kedvezőbb eredmények születettek. Hazánkban emellett még jelenleg is folyik neurális hálózattokal kapcsolatos kutatás, amely a repülésmeteorológiában hatékony eljárások kidolgozását célozza meg [6].

NEURÁLIS HÁLÓZATOK (NN)

A neurális hálózatok (Artificial Neural Network) egy olyan komplexebb összefüggések feltárására tervezett nemlineáris statisztikai modell, amelynek alkalmazása széles körben elterjedt a természettudományokban, így az időjárási paraméterek előrejelzésében is jól alkalmazható. Az NN reprezentatív szituációk sorozatán keresztül képes kapcsolatot létesíteni a független változók (időjárási paraméterek) és a függő változók (látástávolság) között. Információ a prediktorok (függő változók) és a prediktanduszok (független változó) közötti kapcsolatról az egymással kölcsönható neuronok hálójában lelhető fel. A neurális hálózatoknak többféle típusa létezik, a meteorológiában a leggyakrabban alkalmazott típus az előrecsatolt többrétegű perceptron, ezért mi is ezzel dolgoztunk. A többrétegű perceptron neuronokból felépített bemeneti és kimeneti rétegekből áll, amelyek között egy vagy több ún. rejtett réteg helyezkedik el. A hálózatot alkotó neuronok súlyokon és transzferfüggvényeken keresztül kapcsolódnak egymáshoz. A súlyok egy időszakra vonatkozó adatbázis tanulása során folyamatosan illeszkednek annak érdekében, hogy a hálózat minél jobb kapcsolatot teremtsen a bemeneti és az kimeneti adatok között. A neurális hálózatokat az teszi izgalmassá, hogy múltbeli helyzetekből tanul meg alapvető összefüggéseket és nem előre meghatározott szabályok alapján hajtja végre a műveletet, mint például egy numerikus modell.

A tanulás folyamata az elérni kívánt érték és a becsült érték közötti négyzetes hibaminimumkereső algoritmuson alapul, amely arra törekszik, hogy az iterációs lépések során megtalálja a súlyok azon kombinációját, amelyekhez a legkisebb négyzetes hibaérték tartozik.

A hálózat topológiájának tervezése során figyelembe kell venni, hogy a nem megfelelően konstruált hálózat hajlamos a túlilleszkedésre (over-fit), ami alatt azt értjük, hogy az NN a tanuló adatbázisra kellően illeszkedik, viszont korábban nem látott adatokkal téves eredményeket generál. Az over-fit többnyire akkor következhet be, ha a hálózatot a tanuló adatsor méretéhez képest túl sok neuron alkotja, illetve ha a tanuló adatsor túl rövid. A neurális hálózat eredményei akkor tekinthetőek megbízhatónak, ha új adatokon végezve a számítást jól tud általánosítani. Kevés neuronból álló hálózat esetén túl kevés a struktúra szabadsági foka ahhoz, hogy felismerje az alapvető összefüggéseket, ennek következtében előfordulhat, hogy nem csökken le a négyzetes hiba értéke. Az NN topológiájának szempontjából fontos tényező még a rejtett rétegek száma: minél összetettebb egy folyamat, annál több rejtett réteg beillesztése szükséges [7]. A rejtett ré-

tegbeli neuronok számáról több álláspont van jelen a szakirodalomban. Kaastra és Boyd egy háromrétegű neurális hálózat esetén a bemeneti és a kimeneti neuronszámok szorzatának gyökét ajánlja a rejtett réteg neuronszámának megválasztására [8]. Katz állítása szerint a rejtett rétegbeli neuronok száma a bemeneti neuronok számának a fele és háromnegyede között változtatható [8]. A neurális hálózatokkal kapcsolatos kutatásokban a rejtett rétegek neuronszáma nem haladta meg a bemeneti adatok kétszeresét, így vizsgálataink során mi sem alkalmaztunk ennél többet.

Kezdetben a neurális hálózatok tanulási folyamatához Multiple Back-Propagation (with CUDA) version 2.2.4) szoftvert használtuk fel. A kutatás során Fast Artificial Neural Network (FANN) – PHP programkönyvtár használatára tértünk át, mivel az számos előnnyel bírt a neurális hálózatok tanítása szempontjából. A FANN olyan C programnyelven írt függvénykönyvtár, amely a C, C++, Python, PHP, Delphi nyelvekkel is egyaránt használható. A FANN függvénykönyvtáron belül ötféle tanulási algoritmus és tizennyolcféle aktivációs függvény közül választhatunk, ezek közül az alapvetőbbeket (Gauss, szigmoid) alkalmaztuk a tanítás során. Továbbá ötféle tanulási algoritmussal tanulhat a hálózat a FANN keretein belül: soros (incremental), kötegelt (batch), RPOP, QuickRPOP és a SARPOP. A soros és a kötegelt algoritmus közötti különbség, hogy a súlyok frissítése különböző szakaszon történik. Ennek megértéséhez először definiálnunk kell az epoch jelentését: a tanító halmaz egyszeri végigfutása a hálózaton. A soros algoritmussal történő tanítás során a súlyok módosítása minden egyes tanító pont után megtörténik, míg a kötegelt tanulás során ez csak egy-egy teljes epoch után történik meg. Az RPOP, QuickRPOP és SARPORP továbbfejlesztett algoritmusok, amelyekhez további tanulás javítását szolgáló paraméterek is tartoznak.

A FANN további előnye, hogy programnyelv felépítése lévén egy időben különböző felépítésű, hálózatok eltérő struktúrájú adatokkal történő tanítására is alkalmas, így lehetőség van a kiterjedtebb és hatékonyabb elemzésre is.

CÉLKITŰZÉS ÉS FELHASZNÁLT ADATOK

A kutatás során az volt a célkitűzésünk, hogy a neurális hálózatokat felhasználva készítsünk olyan ultrarövid távú, két órás látástávolság-előrejelzési módszereket, amelyek az operatív előrejelzői gyakorlatba is könnyen integrálhatók lesznek. Vizsgálataink során a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren telepített ALMOS mérőrendszer 13R, 31L, 13L és 31R pályaküszöbökhöz tartozó transzmisszométer méréseit használtuk fel. A műszerek az egyes pályák melletti a futópályamenti látótávolságot jól jellemző mért optikai mélységet (MOR) mérik. A mérési adatok 2005. januártól 2016 decemberéig terjedő időszakra álltak rendelkezésre, ebből jelöltük ki a tanuló, teszt, illetve referencia adatsort. Annak érdekében, hogy az NN reprezentatív adatokkal végezze a tanulást, a tanuló adatsor leválasztása során a feltétel az volt, hogy a 13R vagy a 31R és a 31L mérési ponton mért MOR egyike 3000 m alatt legyen. Tehát a futópályák egyik pontjában 3000 méter feletti MOR is előfordulhatott, ezáltal nem csak az alacsony látástávolsággal jellemezhető ködös napok kerültek az adatbázisba.

A korábban említett analógiás módszer példáján hipotézisünk az volt, hogy a hálózat tanulását segítheti, ha az egyes időjárási paraméter aktuális időpontra vonatkozó értéke mellett a korábbi mérések is a tanuló adatbázis részét képezik. A múltbeli időlépéseket az előrejelzési időlépcsőknek megfelelően határoztuk meg, azaz a 30, 60, 90 és 120 perccel korábbi mérések is a

bemeneti adatok elemei. A neurális hálózatok bemeneti adataiként a látástávolság alakulását erősen befolyásoló paramétereket választottuk ki, amelyek a következők: év napja, óra, hőmérséklet, harmatpont, szélerősség, szélirány és MOR.

EREDMÉNYEK

Neurális hálózatok olyan variációit készítettük el, amelyekhez különböző tanulási algoritmusok, aktivációs függvények tartoznak és az egyes hálózatok rejtett rétegeinek számai és a rejtett rétegbeli neuronok számai is elérőek. Emellett minden hálózatnak elkészítettük azt a változatát, amely nem csak a sorban következő rétegbeli neuronokhoz kapcsolódik, hanem azt kihagyva a következő rétegbeli neuronnal is kapcsolatot létesít. A továbbiakban látni fogjuk, hogy ugyanazon tanuló adatsor több formájával is tanultak a hálózatok, amelyek szintén jelentősen befolyásolták a neurális hálózat teljesítményét, működését.

Vizsgálataink során a tanuló adatsorban az outputot többféle módon adtuk meg az NN számára, így tesztelni tudtuk, hogyan teljesít a hálózat ugyanazon adatok módosított változataival. Meg kell említenünk, hogy a tanuló adatsorok változtatása során a bemeneti adatok formája nem változott. Elsőként maga a látástávolság négy időlépcsőben mért méterben kifejezett értékeiből álló outputok-kal tanultak a különböző hálózatok, amelyek várt kimeneteit is a látástávolság konkrét, méterben kifejezett számértékei adják. Ezen hálózatokat (továbbiakban decimális hálók) prognosztikai minőségét úgy ellenőriztük, hogy a teljes 2016-os év referencia adatbázisával hajtottuk meg. Ehhez a látástávolság verifikációja során széles körben alkalmazott Heidke Skill Score (HSS) verifikációs indexet használtuk fel. Az index kiszámításához (1) az alábbi 2×2-es kontingencia táblázatot kell felhasználnunk.

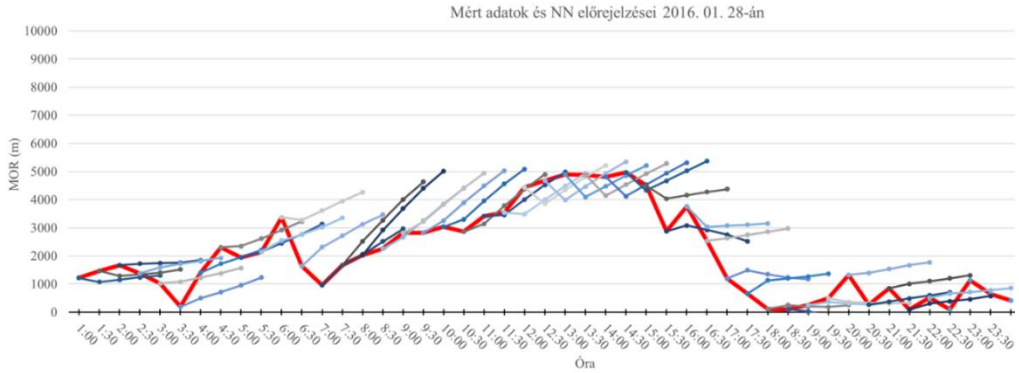
	Megfigyelt esemény	Nem megfigyelt esemény
Előrejelzett esemény	a (találat)	b (téves riasztás)
Nem előrejelzett esemény	c (elmulasztott esemény)	d (helyes elvetés)

1. táblázat Az előrejelzés verifikálásához szükséges 2×2-es kontingencia táblázat

$$HSS = \frac{2(ad-bc)}{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)} \quad (1)$$

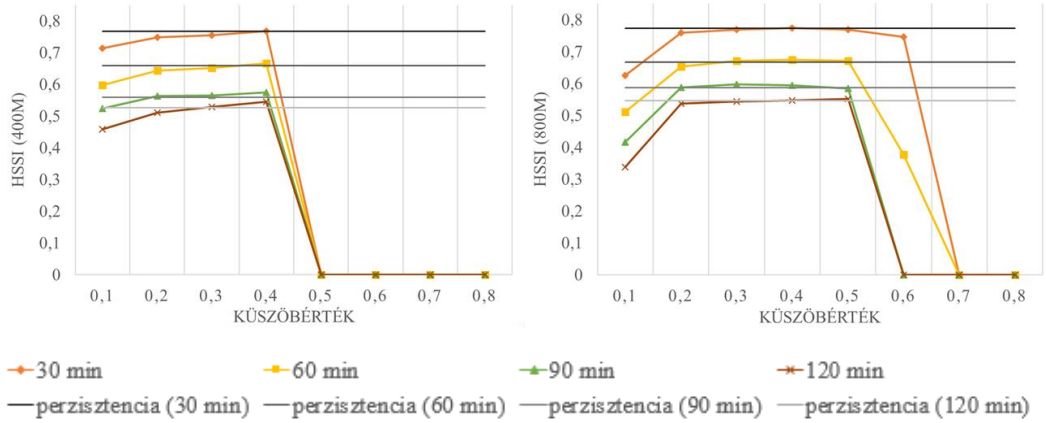
A decimális hálózatok verifikációja során a táblázat kitöltéséhez az előrejelzett és a mért MOR értékeit hat különböző intervallumra osztottuk (0–400 m, 400–600 m, 600–1000 m, 1000–1500 m, 1500–10 000 m) és a HSSI értékét az egyes csoportokra számítottuk ki. A HSSI értéke mínusz végtelentől egyig terjed és az előrejelzés akkor ideális, ha az index értéke 1. Az ultrarövid távú előrejelzésnek akkor van információ értéke, ha jobb prognózist képes adni a perzisztencia prognózisnál, amely ilyen időtávon kifejezetten jól teljesít. A repülésmeteorológia szempontjából viszont fontos tudni, hogy mikor várható változás a látástávolságot illetően, a neurális hálózatokkal éppen ezen változások előrejelzésére törekszünk. A decimális hálózatok verifikációját a teljes 2016-os év adatbázisával végeztük el. A hálózatok becsléseire számított HSS indexek a 1500 m feletti kategóriában haladták meg a perzisztencia prognózis HSS indexeit, azaz a decimális hálózatok képesek volt arra, hogy az esetek nagy részében előrejelezze, hogy a MOR 1500 m alatt vagy felett alakul a következő két óra egyes időlépcsőiben.

Az 1. ábrán példának egy olyan decimális hálózat előrejelzése látható egy kiválasztott napra (2016. 01. 28.) alkalmazva, amelyben két darab tizennégy neuronból álló rejtett réteg található a bemeneti és a kimeneti réteg között. A hálózat Gauss aktivációs függvényt alkalmazott a rétegek között és RPOP algoritmussal tanult. Az ábrán az egyes időpontokban mért MOR értékek és az időponthoz tartozó NN által négy időlépcsőre előrejelzett értékei vannak bemutatva. Az ábra alapján megállapítható, hogy a neurális hálózat az esetek jelentős részében képes volt a MOR változás irányáról információt szolgáltatni.



1. ábra A mért látástávolság (piros) és a kiválasztott decimális hálózat 30, 60, 90 és 120 percre előrejelzett értékei 2016. 01. 28-ára vonatkozóan

A további vizsgálataink során ugyanezen tanuló adatsoron egy átalakítást végeztünk el: az egyes időlépcsőkben mért látástávolságokhoz kategóriaváltozókat rendeltünk, annak megfelelően, hogy 400 m, illetve 800 m fölött vagy alatt alakult a látástávolság értéke. A hozzárendelés a következő módon történt: ha 400 m vagy 800 m alatti a MOR értéke, akkor 1-et rendeltünk hozzá, ellenkező esetben 0-t. Ebben az esetben a kimeneti neuronok száma nyolc darab volt, mivel mind a négy időlépcsőhöz tartozó MOR értéket a két feltétel szerint egyenként vizsgálta.

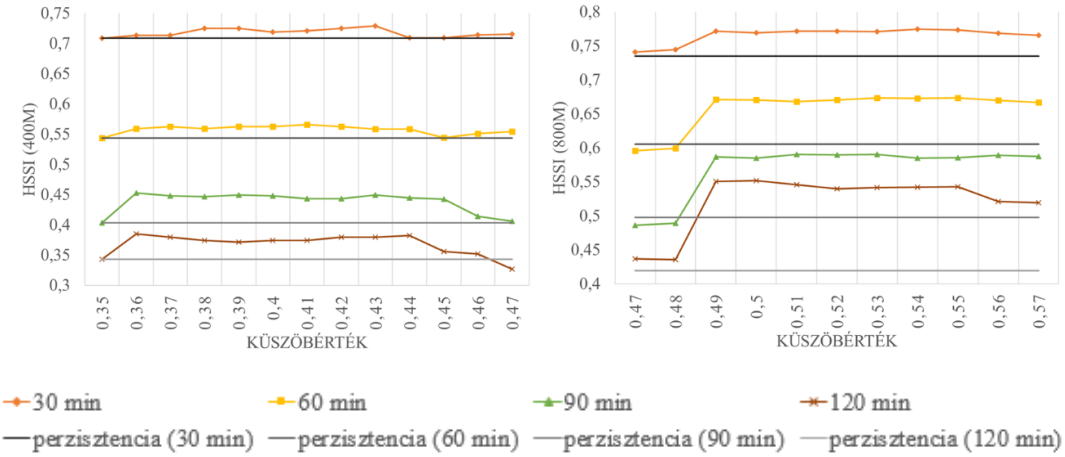


2. ábra A kiválasztott kategóriás hálózat 400 és 800 m-re vonatkozó HSS indexei a 30, 60, 90 és 120 perces időlépcsőre vonatkozóan

A teljes 2016-os évre egy 27 bemeneti, 14 rejtett és 8 kimeneti neuronból álló kategóriás hálózaton végeztük el a verifikációt. E hálózat szigmoid aktivációs függvényt és batch algoritmust használt a tanulás során. A hálózat előrejelzési minősége attól függően is változott, hogy a tesztelése során milyen küszöbértékeket határoztunk meg a 0 és az 1 kimenet szétválasztásához. A 2. ábrán a perzisztencia prognózisra és a különböző küszöbindexekkel ellátott NN becsléseire

vonatkozó HSS indexek láthatók 400 m, illetve 800 m-es csoportosítás szerint. Megállapíthatjuk, hogy a küszöbérték megválasztása előteljesen befolyásolja a neurális hálózat működését, így képes javítani a becslés pontosságát.

Annak érdekében, hogy ezt a hatást jobban szemléltessük, külön ábrázoltuk a hálózat azon becsléseinek HSS indexeit, amelyek meghaladták a perzisztencia prognózis HSS indexeit az egyes időlépcsőkben. Látható, hogy több maximum is tartozik a küszöbértékek sorozatához és szembetűnő az is, hogy az NN HSS indexei minden időlépcsőben jóval meghaladták a perzisztencia HSSI értékeit. Megállapítható még, hogy hálózattól függően a 800 méterre vonatkozó HSS indexek magasabb értékei a 400 méteres HSS indexeitől eltérő tartományban jelentkezhetnek.

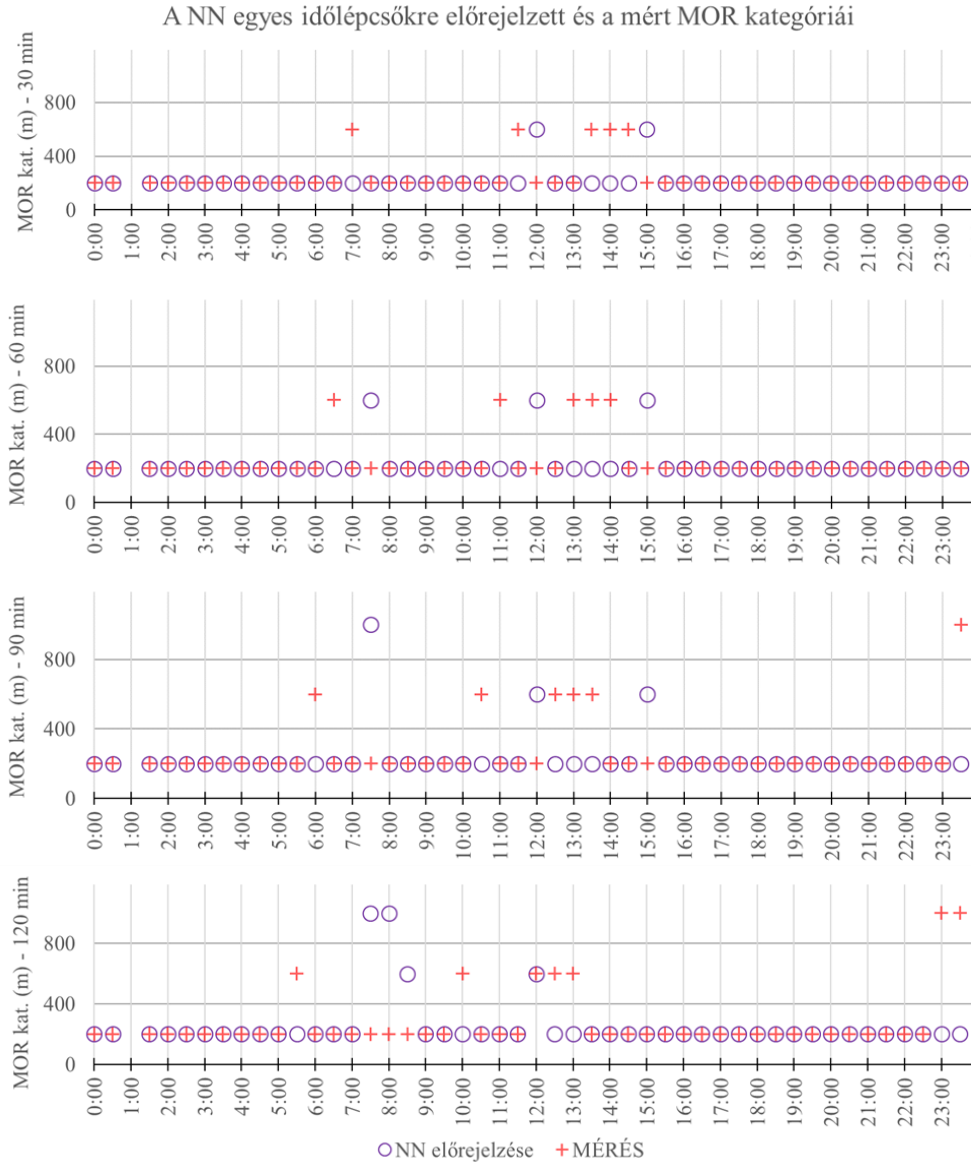


3. ábra A kiválasztott kategóriás hálózat 400 és 800 m-re vonatkozó HSS indexei a perzisztencia prognózist meghaladó tartományban a 30, 60, 90 és 120 perces időlépcsőre vonatkozóan

A továbbiakban bemutatunk egy jól teljesítő kategóriás hálózatot egy kiválasztott téli, ködös napon (2016. 01. 27) alkalmazva. A hálózatban a bemeneti és a kimeneti rétegeket két – egy 28 és egy 14 neuronból álló – rejtett réteg köti össze. A tanulás során RPOP algoritmust és Gauss aktivációs függvényt használt. A 400 méterhez tartozó küszöbindexet 0.34-nek, a 800 méterhez tartozó küszöbindexet 0.41-nek választottuk meg, mivel a hálózat a teljes 2016-os évre vonatkozóan ezekre az értékekre produkált jó eredményeket. Ez azt mutatja, hogy minden hálózat másképpen függ a küszöbindexek értékétől. Míg a 2-es, 3-as ábrán bemutatott hálózat maximális 400 méterre, illetve 800 méterre vonatkozó HSS értékei rendre 0,43 és 0,49 küszöbértékek körül alakultak, e hálózat más küszöbértékeknél teljesít jól. A 4. ábra az NN által az egyes időlépcsőkre előrejelzett és a mért MOR kategóriáit mutatja be 2016. 01. 27-ére vonatkozóan. A MOR előrejelzése egy ilyen változóan ködös napon kihívást jelent az előrejelzők számára. Az ábra alapján láthatjuk, hogy az NN több esetben és képes volt MOR változásának előrejelzésére, így információtöbblettel szolgál a perzisztencia prognózissal összehasonlítva. A 30 perces időlépcsőt tekintve a 47-ből 40-szer, a 60 perces időlépcsőt tekintve 39-szer, a 90 perces és 120 perces időlépcsőt tekintve pedig 38 esetben volt sikeres a hálózat becslése, így ebben az esetben nőtt a bizonytalanság mértéke az időlépcső növekedésével.

Az eredmények alapján levonhatjuk azt a következtetést, hogy az NN számára sokkal tanulhatóbb formának bizonyult a kategóriás besorolást tartalmazó adatbázis és mivel előrejelzései több esetben információtöbbletet hordoznak a perzisztencia prognózishoz képest, érdemes ebben az irányban tovább vizsgálódni. Ha sikerül tovább pontosítani a becsléseket, akkor akár a

repülésmeteorológiában – ahol a MOR jövőbeli változásának iránya is fontos információ – operatív gyakorlatban is alkalmazhatóvá válik.



4. ábra A kiválaszott kategóriás hálózat egyes időlépcsőkre előrejelzett értékei és a mért látástávolság (m) 2016. 01. 27-én

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] I. Gultepe, R. Tardif, S. C. Michaelides, J. Cermak, A. Bott, J. Bendix, M. D. Müller, M. Pagowski, B. Hansen, G. Ellrod, W. Jacobs, G. Toth, S. G. Cober, 2007: Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. Pure and Applied Geophysics, 164/6, pp. 1121–1159.

[2] Bottyán Zs., Deák B., Wantuch F.,2010.: A látástávolság és a köd rövid távú előrejelzésének lehetőségei. Repüléstudományi Konferencia 2010 Szolnok, 2010. április 16. Repüléstudományi közlemények 2010/2 különszám, Szolnok, 2010 április 16.

[3] Tuba Z., Bottyán Zs., 2015.: Analógiás elven alapuló repülésmeteorológiai előrejelzések és a makroszinoptikus időjárási szituációk kapcsolatának vizsgálata. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok , 2015/2, pp. 162–168.

[4] Wantuch F., 2001: Visibility and fog forecasting based on decision tree method. Időjárás 105, 29-38.

[5] Nagy R., 2014: Új módszerek vizsgálata a légiforgalmi irányításban használatos, látástávolságra vonatkozó döntéstámogató célprognózisok készítésében Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren. Diplomamunka. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (témavezető: Kardos Péter). 69 p.

[6] Hadobács K., Bottyán Zs., 2015: Neurális hálózatok és alkalmazásuk a repülésmeteorológiában. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2015/2, pp. 36–48.
[7] Jain A. K., Mao J., Mohiuddin K. M., 1996: Artificial neural networks – a tutorial. Computer, 31–44.
[8] Kaastra I., Boyd M., 1996: Designing a neural network for forecasting financial and economic time series. Neurocomputing 10, 215−236.
[9] Katz J. O., 1992: Developing neural network forecasters for trading. Technical Analysis of Stocks and Commodities 8, 58−70.

APPLYING NEURAL NETWORKS IN ULTRA-SHORT TERM FORECASTING OF VISIBILTY

Visibility is a relevant meteorological variable in aviation meteorology and until nowadays forecasting of this parameter has been a complicated task. Statistical models are the most applied methods for forecasters to solve this problem. Neural networks are also nonlinear statistical models, which can produce connections between the determined meteorological variables and the visibility by learning data of measures of a previous term. After the learning process neural nets are able to estimate the visibility in the short term future. In this research numerous neural networks were tested with various topology and different form of learning data base. As a result some of these forecasts of neurals networks produced better estimates, than persistent prognosis, which are known for their relatively good evaluation in ultra-short term.

Keywords: *neural nets, ultra-short term forecasting, visibility, aviation meteorology*

Fricke Cathy (MSc) hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Meteorológiai Tanszék frcsaat@gmail.com orcid.org/0000-0001-5737-4618	Fricke Cathy (MSc) Student Eötvös Lorand University Faculty of Science Department of Meteorology frcsaat @gmail.com orcid.org/0000-0001-5737-4618
Kardos Péter részlegvezető Hungarocontrol Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. Repülőtéri Meteorológiai Részleg Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102	Kardos Péter head of unit Hungarocontrol Hungarian Air Navigation Services Ltd. Aerodrome Meteorological Unit Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „UAS ENVIRON” nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.





http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-09-0392-Fricke_Cathy-Kardos_Peter.pdf

Bódi Antal, Szabó Tivadar, Wührl Tibor

DRÓNOK KÖVETÉSE KÖZHITELES MÓDON

Napjainkban a pilóta nélküli repülő eszközök és azok használata rohamos módon elszaporodott. A továbbiakban újabb robbanásszerű növekedés várható az új eszközök megjelenésében és az azokat használók terén. Mint minden technikai vívmány, így a pilóta nélkül közlekedő légi járművek is sok jó célra felhasználhatók, de akár rossz kezekbe is kerülhet, ugyanakkor egy figyelmetlen felhasználó is számos gondot, akár súlyos balesetet okozhat. Jelenleg a drónok felhasználásának és használhatóságának körülményei, az ezzel kapcsolatos jogszabályi hátterek még hiányosak illetve kialakítás alatt vannak. Nagy előrelépést jelente, ha a pilóta nélküli légi jármű felelős felhasználója egyértelműen azonosítható lenne, valamint az általa felügyelt eszköz nyomkövetése közhiteles módon történne. Erre minden technikai feltétel elvileg rendelkezésre áll.

Kulcsszavak: *UAV, drón, követés, repülésbiztonság, közhitelesség, ellenőrizhetőség*

BEVEZETÉS

Napjainkban egyre fontosabb kérdésként merül fel, ha egy autonóm módon mozgó eszköz „hibázik” és kárt okoz, akkor a kár okozásáért ki a felelős. Az UAV-k elterjedése és felhasználása egyre szélesebb körű [1]. Az ember vezette, ultrakönnyű kategória méret alatti UAV-k egyre alacsonyabb áron elérhetők. Ezen eszközök hobby célból is használhatók, de akár egy profitorientált vállalkozás is használhatja azt. Az UAV-k közcélú- és katonai felhasználásáról is egyre több szó esik, ha a határvédelemre, erdőtűz felderítésre, árvízvédelemre, vadgazdálkodásra, katasztrófavédelemre, terrorizmus elleni harcra [2] stb. gondolunk. Az UAV-k közcélú feladatokra történő rendszerbe állítását nagymértékben akadályozza és hátráltatja a jogszabályi hiányosság és szabályozatlanság, ugyanakkor a hobby szintű felhasználásnak teret ad. A felelőtlenül használt UAK-k potenciális veszélyt jelentenek a vagyontárgyakra és veszélyeztethetik az ember életét is (például tömegrendezvényeket vagy sporteseményeket közvetítő drónok). Az autonóm módon küldetést végrehajtó drón esetében is elvárt, hogy az ilyen eszköz által okozott kár emberi felelősséghez köthető legyen.

A kontrollálatlanul a levegőben „kószáló” drónok akár az ember által vezetett repülőkre is közvetlen veszélyt jelenthetnek, illetve egyéb biztonsági kockázatok forrásai is lehetnek. Szélsőséges esetben szabálysértésen túl komolyabb bűncselekmények elkövetésére is fel lehet őket használni.

A KVANTITATÍV ITS

Fontos és jövőbe mutató kihívásokat rejtenek az intelligens közlekedési rendszerek kialakulása. Az ITS (Intelligens Közlekedési Rendszer) alatt értjük a közlekedésben alkalmazott infokommunikációs technológiák alkotta egységes rendszert, amelyek segítségével optimalizálhatók a közlekedési módok, javítható a költséghatékonyság, csökkenthető a környezeti terhelés, javítható a közlekedés biztonsága, informáltsága és komfortja mind társadalmi, mind egyéni

szempontból[1]. *A közúti*[2] *közlekedési* rendszer kívánatosnak elképzelt jövőbeli állapotát, a jövő harmonizált alkalmazásait az alábbi átfogó „ITS vízió"[3] mutatja be az alábbiak szerint:
„A fenntartható közlekedési rendszer lehetővé teszi az európai közúti személy- és áruforgalomban részt vevők számára a:

- biztonságos (balesetmentesség),
- hatékony (késések elkerülése) és
- tiszta (környezetbarát) utazást.

A felhasználókat mindenhol és mindenkor segítik az összehangolt és akadálymentes ITS szolgáltatások az utazás valamennyi fázisában (utazás előtt, utazás közben)."
A fenti „ITS vízió" elemei:

- a „jól informált utas" (utazási információs szolgáltatások) víziója,
- a „jól üzemeltetett úthálózat" (forgalmi menedzsment rendszerek) víziója,
- a „hatékony és biztonságos áruszállítás", valamint
- a „kapcsolódó kiváló minőségű infokommunikációs infrastruktúra" víziója.

Az „ITS vízió" alapját adja a közlekedésben résztvevő eszközök menetadatai és azok kölcsönhatása, illetve a közlekedési eszközöket vezetők (objektív felelősség elve alapján az üzembentartók) tudatába beépülő várakozás és ennek következtében a közlekedési szabályok betartása/ betartatása. A tachográfok[4] már több flottába szervezett járművön belüli közlekedésbiztonságot támogató, kötelezően használandó megfigyelő rendszerként már napjainkban is elterjedtek. Az ITS kvantitatív alapját jelentheti, ha a tachográfokhoz hasonló kötelezően működtetett egyéni megfigyelő rendszerként kerülne egységesítése minden járműben úgy, hogy közben a személyes adatok[5] védelme is teljesülne.

A cél, egy online smart mobilitás rendszer teljes körű megvalósulása, amely során a vezetési tevékenység releváns menetadatai egy fedélzeti eszközben és/vagy informatikai felhőben, utólag megmásíthatatlan módon kerül naplózásra és tárolása.

A jármű periodikus időközönként tájékoztatja környezetében levő járműveket a saját egyedi azonosítójáról (ID-jéről) – ami például megegyezhet a rendszámmal –, a GPS/GNNS pozíciójáról valamint a pillanatnyi sebességéről a CAM[6] üzenetekhez hasonlóan.

[1] Az intelligens közlekedési rendszerek és szolgáltatások (Intelligent Transport systems and Services, ITS) feladata az információs technológiák integrálásával a közlekedési rendszerek hatékonyságának - kapacitás-kiaknázás, energiahatékonyság, közlekedésbiztonság és védelem – növelése (Van De Ven, T. -Long, J. -Wedlock, M. [2013]: ITS ACTION PLA N. Free Road Safety Traffic Information, (January). Retrieved from http://ec.europa.eu/transport/themes/its/studies/its_en.htm). A cikkben szereplő defenició újraértelmezése alapján megfogalmazott új definíció.
[2] A közútra korlátozott vízió helyett kisebb módosításokkal minden közlekedési módra értelmezhető, kiterjeszthető.
[3] Európai tendenciák és együttműködés az ITS rendszerek területén – hazai eredmények és kihívások Szerző(k) Dr.-habil. Lindenbach Ágnes http://utugyilapok.hu/cikkek/europai-tendenciak-es-egyuttmukodes-az-its-rendszerek-teruleten-hazai-eredmenyek-es-kihivasok/
[4] A közlekedésbiztonságot javító intelligens közlekedési rendszerek és szolgáltatások fejlődési lehetőségeinek, stratégiai célkitűzéseinek meghatározása Szerző(k) Dr. Török Árpád http://epa.oszk.hu/02300/02390/00007/pdf/EPA02390_utugyi_lapok_2016_7_04.pdf
[5] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2016/679 RENDELETE (2016. április 27.) a természetes személyeknek a személyes adatok kezelése tekintetében történő védelméről és az ilyen adatok szabad áramlásáról, valamint a 95/46/EK rendelet hatályon kívül helyezéséről (általános adatvédelmi rendelet)
[6] Cooperative Avareness Message – CAM

További externáliaként az útmenti mérőpontok[7] folyamatosan gyűjthetnek adatokat az elhaladó járművekről és ezzel az automatikus ellenőrzésen túl a közlekedés dinamikájáról is teljeskörű valós idejű mérésen alapuló dinamikus képet lehetne kapni.

Ez a rendszer balesetek esetén „feketedoboz" funkciót láthat el, mivel rögzíti a saját és a környezetében levő járművek menetadatait, speciális körülmények között pedig alkalmas lehet a védelmi kockázatot jelentő közúthasználók nyomon követésére.

Ezek adják azt a többletet, amivel a vezetők részéről a közlekedési szabályok betartása kikényszeríthető, valamint akár az olyan esetekben is egyértelműsíthetők a felelősségi viszonyok, amikor a balesetet nem gyorshajtás, hanem pl. a lassúhajtás okozza.

A fedélzeti smart eszköz társítható a tulajdonos-felhasználó okostelefonjával, így folyamatos távfelügyeletként is használható.

Maga a rendszer az e-CALL rendszertől függetlenül kerülne kialakításra. Az e-CALL rendszer vészhelyzetben kerül csak alapvetően felhasználásra, illetve ennek beépülése a járműparkban már EU szinten eldöntésre kerül. A járműadatok rögzítésére és felhasználásra még nincs egységesen elfogadott elképzelés, Magyarországon lehetne egy országos pilotot indítani, amihez fel lehetne használni az e-SZIG kialakításakor gyűjtött tapasztalatokat, feltérképezni azokat az érdekcsoportokat, akiknek érdeke lehetne egy ilyen rendszer kialakítása.

A drónok veszélyeztethetik a földi közlekedést is, így a kvantitatív ITS elképzeléseket ennek megfelelően tovább kell gondolni.

DRÓN, MELY ELŐTT PIROS ZÁSZLÓS EMBER FUT?

A légtérben „kószáló" drónok problémájára igen hamar megoldást kell találni. A közlekedés történetében számos átmeneti megoldásra láthattunk példát, melyet manapság már megmosolygunk. Londonban, 1865-től 1896-ig érvényben volt a „vörös zászló törvénye", melyet a világ első közúti szabályának tekinthetünk, miszerint a gőzgépjárművek előtt 50 méterrel nappal egy vörös zászlót lengető embernek kellett haladni, este pedig vörös lámpával kellett felvezetni egy személynek a gőzautót.

A szabályozásnak, ami majd 31 évig hatályos volt, nyilván az volt a célja, hogy a gőzhajtású eszköz jól látható és nyomon követhető legyen, illetve esetleges baleset esetén így az emberi felelősség is megállapítható. A drónok esetében is cél, hogy az „látható" legyen és minden eszközhöz egyértelműen egy emberi felelős személy legyen rendelhető. Nyilván senki sem várja el napjainkban a piros zászlós ember jelenlétét a drónok esetében, szerencsére napjaink technológiai fejlettsége és a közlekedési tapasztalatok alapján egészen más megoldásokkal is elérhetjük ezt a célt.

A cél tehát az, hogy az UAV-k egyértelműen azonosíthatók legyenek, minden UAV-hez humán felelős legyen rendelhető, és jól „látszódjanak" a légtérben, miközben a küldetést teljesítik.

[7] http://computerworld.hu/computerworld/infoter-2016-deutsch-szerint-brusszel-idiota-dontest-hozott.html

KÖZHITELES MÓDON LÁTSZANI

Ahhoz, hogy egy drón jól beazonosítható legyen, egyedi azonosítóval kell rendelkezzen. Egy járművet a többitől egyértelműen megkülönböztető egyedi azonosító a közlekedési eszközök esetében már megszokott (rendszám, lajstromszám). Jelen esetben nem közlekedési eszközről beszélünk, mivel kisméretű UAV-k ember szállítására nem alkalmas, hanem egy távirányított eszközről, vagy autonóm működésű robotról. Ez esetben az eszköz beazonosításán túl, annak felügyeletét ellátó személyt is be kell azonosítani. A megfogalmazott cél elérése érdekében az UAV-nek egy intelligens azonosítóval kell rendelkeznie, mely jól érzékelhető és így „látható" a légteret használó többi résztvevő számára is. A „láthatóság" technikai megoldása az lehet, hogy a légteret használó drón meghatározott időközönként kisugározza az azonosítóját és az aktuális koordinátáit. Ennek módjáról, formátumáról és tartalmáról jogszabálynak kell rendelkeznie. A kisugárzott és rögzített tartalomnak utólag megmásíthatatlannak és hamisíthatatlannak kell lennie.

A fent, röviden vázolt elgondolás úgy valósulhat meg, ha a drón, illetve az azt felügyelő humán felügyelő, vagy irányító a repülés megkezdése előtt egy rendszerbe regisztrál, mintegy megkéri a „felszállási engedélyt". Sikeres regisztrációt követően a drón a saját koordinátáit a küldetés ideje alatt folyamatosan (meghatározott időközönként) küldi fel egy rádiós csatornán a nyilvántartó rendszernek. A nyilvántartó rendszer a felküldött adatok hitelességét ellenőrzi és eltárolja, illetve egy dedikált csatornán egy adott koordináta környezetében a többi „közeli" szereplő számára hozzáférhetővé teszi azokat.

Egy ilyen rendszer tehát kettő alap komponensből épül fel:

- égi szegmens (drón által cipelt azonosító és kommunikációs egység);
- földi szegmens (beregisztrált drónok által küldött adatok tárolása és valós idejű közzététele, a befutott trajektória szükség szerinti tanúsítása).

RENDSZERMODELL

A rendszermodellünk felállítása során törekedtünk a technikai megoldásoktól és platformoktól való függetlenséget megőrizni. Az első alfejezeti pontban az „égi szegmens" funkcióit foglaltuk össze, a második alfejezetben pedig a „földi szegmenssel" kapcsolatos elvárásokat adtuk meg.

Égi szegmens

Az „égi szegmenset" megtestesítő eszköz, valójában egy nyomkövető, egy jeladó és adatrögzítő egyben, melynek a speciális felhasználás miatt speciális elvárásoknak kell megfelelniük. A nyomkövetőt tipikusan néhány kilógramm felszálló tömegű UAV-nek kell szállítania a küldetése teljesítése közben, ezért a nyomkövetőnek a tömegét jogszabályi szinten maximalizálni, illetve optimalizálni kell. A maximalizált tömeg lehetőséget biztosít figyelembe venni azt az UAV tervezésénél, illetve a hasznos teher elhelyezésénél.

További speciális elvárások:

- méri megfelelő időpillanatonként a GPS/GNNS koordinátákat és az időt;
- tárolja a megmásíthatatlan kummulált repülési időt és repülési távot;
- a mérési adatokat – a saját trajektóriát titkosítva, időbélyeggel ellátva letárolja;

- képes saját jeladásra, amely az egyedi lajstromszámot, mint egyedi ID-t folyamatosan szórja a külvilág felé is vészhelyzet esetén;
- veszi a közeli eszközökről érkező jeleket és azt betárolja (fekete doboz funkció);
- fekete doboz szolgáltatás központi titkosított csatornán történő kiolvasását lehetővé teszi a szerveroldali alkalmazásnak a megfelelő jogosultság esetén és megfelelő hálózati kapcsolat esetén;
- BALE chipben tárolja a privát kulcsát;
- összerendelésre kerül a repülő eszköz egyedi lajstromszámával;
- egyedi azonosító;
- eIDAS, GDPR megfelelősség;
- Common Criteria minimum EAL 4+

Földi szegmens

A „földi szegmens” egy kvázi valós időben adatokat fogadó és közvetítő rendszer, ami telekommunikációs tekintetben nyilvános hálózathoz kapcsolódik. A kommunikáció célszerűen titkosított csatornán történik. Kommunikációra (koordináta adatok feltöltése és a közeli eszközök koordináta adatainak letöltése) a beregisztrált eszközöknek van jogosultsága. Elgondolkoztató lehet egy nyilvános kommunikációs csatorna, melyen a küldetést teljesítő drónok adatai érhetők el folyamatosan, és a drónok aktuális helyzete egy térképre vetített formában web-es böngészővel megtekinthető, ugyan úgy mint például a „flightradar” [8] esetében.



1. ábra Flightradar képernyő mentés

További speciális elvárások:

- egyedi szenzor rendelhetőség;
- lajstromszám kiadás és nyilvántartás;
- repülési engedély kiadása;
- repülési korlátozások kijelölési lehetősége;
- a repülésért felelős eSZIG-jén levő eID-val NFC-n keresztüli felelősségi hozzárendelés;
- kapcsolat az eID szerver és a KAÜ felé;

[8] A www.flightradar.hu címen elérhető online repülőgép-követő alkalmazás.

- mérési frekvencia egyedi meghatározása;
- start és cél koordináták és a közben lerepült trajektória időbélyeggel együttes egyedi központi tanúsítása;
- adatarchiválás;
- eIDAS, GDPR megfelelősség;
- Common Criteria minimum EAL 4+;
- deanonimizált adatok előállítása és a trajektóriák ábrázolása;
- az aktív repülés engedélyezettség állapotának szolgáltatása;
- közhiteles adatszolgáltatás rögzített trajektóriából illetve fekete dobozból;
- területi kereshetőség.

RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ TECHNOLÓGIÁK ÉS AZOK ALKALMAZHATÓSÁGA

Az előző fejezetekben a cél a közhiteles drónkövető rendszer egyedi funkcióspecifikációját kívántuk megadni a technikai megvalósításoktól független módon. Ebben a fejezetben áttekintjük a rendelkezésre álló technikákat és technológiákat, melyek alkalmasak lehetnek a megfogalmazott célok elérésében.

Drón koordinátáinak meghatározása, navigációs rendszerek

A drón koordinátáinak meghatározására több műholdas navigációs rendszer is rendelkezésre áll. A GPS és Glonas rendszer kiszolgáltatottságot jelent, a Galileo pedig még nem készült el.
A navigációs vevő (GPS, Glonas vagy Galileo) által meghatározott koordináták sok esetben bizonytalanságot, mérési pontatlanságot mutatnak, az egyes számított eredmények hibával terheltek [3]. A hiba okai a következők lehetnek:

- több utas jel terjedés a vevő bemenetére;
- órapontatlanságok;
- jel terjedési sebességének időjárás függése (8–12 km magasságban a terjedési sebesség változhat az időjárástól például páratartalom, hőmérséklet);

Rádió hullámok terjedési sebességének változása, inhomogenitása az Ionoszférában. Az Ionoszféra futásidő torzítása viszonylag állandó, ezért a korrekciós számításokkal viszonylag jól kiküszöbölhető. A fenti vételi problémák közül talán a legnehezebben a Troposzféra, mint időjárásfüggő torzítás jelentkezik. Az időjárásfüggő hiba nehezen korrigálható, gyakran az erősen felhős időben teljes, vagy részleges vétel kiesés is előfordulhat.

A fix, ismert koordinátájú pontba telepített vevő és az általa detektált pozícióból számított aktuális hiba meghatározható, így korrekciós adat nyerhető. A korrekciós adatok UAV fedélzetre küldésének akkor van jelentősége, ha a fix telepítésű navigációs vevő és az UAV közti távolság nem számottevő, vagyis mindkét vevő ugyanazon közegen keresztül „látja” a műholdakat.

Égi szegmens és földi szegmens kapcsolata

Az égi- és a földi szegmens között, nagy megbízhatóságú rádiós összeköttetést kell használni. Figyelembe kell venni azt, hogy az UAV fedélzetén rendelkezésre álló energia véges, ezért az

égi szegmens kommunikációs egységének alacsony teljesítmény igényű kialakítása fontos kritérium. Kommunikációra a földi mobil hálózatok (PLMN) is alkalmazhatók, kis magasságú repülések esetén, továbbá szóba jöhet a LoRa illetve az OGN hálózat.

A kommunikációs csatorna kialakítása szempontjából nagy előrelépés és potenciál rejlik a földi optikai szálak telepítésében. A jó földi lefedettséget biztosító optikai szálból kialakított hálózat lehetőséget jelent a földi rádiós interfészek viszonylag sűrű telepítésére, ezzel a rádiós interfésszel áthidalt távolságok pedig csökkenthetők [4].

A SZIP projekt és annak eredményei jó alap infrastruktúrája lehet a drónkövető rendszereknek[9]. Rádiós megoldások szempontjából pedig a mobilhálózatok fejlődése jelenthet igazi áttörést[10].

KÖVETKEZTETÉSEK, ÖSSZEGZÉS

A feladat nagyon összetett, a felelősség pedig nagyon nagy. Az előre látható problémákra időben megoldást kell találni. Cikkünkben vízionáltuk és összegeztük a problémák sokaságát és komplexitását.

A témában különösen komoly a döntéshozók felelőssége, mert ha nem alaposan megfontolt kontrollrendszerrel megtámogatott környezetben engedik ki a „palackból a szellemet”, akkor a több ezer vagy akár több tízezer drón nagyon sok problémát (akár nemzetbiztonsági problémát) is okozhat.

Az a drón, amely nem a játék kategóriába tartozik, annak legyen feltétlen „rádiós láthatósága” ellenkező esetben a drónvadász a legnagyobb lelki nyugalommal vadászhassa le. Előzzük meg a vadnyugati kaotikus viszonyok kialakulását!

A drónkövető rendszer sok probléma megoldását jelentheti, de a rendszer kialakításánál figyelembe kell venni a GPS rendszer kiszolgáltatottságát, illetve a GNNS (Galileo) még nem teljeskörű elérhetőségét.

A rendszer kialakításánál fontos a költséghatékonyság és az EU szintű átjárhatóság.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Dr. Békési Bertold, Dr. Bottyán Zsolt, Dr. Dunai Pál, Halászné dr. Tóth Alexandra, Prof. Dr. Makkay Imre, Dr. Palik Mátyás, Dr. Restás Ágoston, Dr. Wührl Tibor: Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek ISBN 978-615-5057-64-9 Kiadó: Nemzeti Közszolgálati Egyetem

[2] Dr. Kovács László, Dr. Ványa László: Pilóta nélküli repülőgépek a terrorizmus elleni harcban, Pilóta nélküli és szállító repülőeszközök katonai alkalmazhatósága konferencia kiadványa, Szolnok, 2007. április 20.

[3] Wührl Tibor: GPS navigációs problémák UAV alkalmazásokban Hadmérnök különszám –Robothadviselés 6. Tudományos Szakmai Konferencia 2006. nov. 22.

[4] Sallai Gyula, Horváth Pál, Abos Imre, Bartolits István, Bódi Antal, Huszti Gábor: A hazai szélessávú infokommunikációs infrastruktúra fejlesztése, url: http://www.hiradastechnika.hu/data/upload/file/2009/2009_1_2/HT09_1_2a3.pdf

[9] http://kifu.gov.hu/kifu/hu/projektek/projektekleirasa/szip

[10] https://5g-ppp.eu/

AUTHENTIC TRACKING OF UAVS

Nowadays the UAVs and their use proliferated in dramatic fashion. Further growth is expected in another explosive appearance of new users and their devices. As all technical achievements, such as UAVs can be used for many good purposes, but if it fall into the wrong hands that causes many problems and the careless use lead to serious injuries. Currently, the use and usability of the drones circumstances, the legal background on the matter are still incomplete or under construction. Great progress means that if a user is responsible for the unmanned aircraft would be clearly identified, and that it supervises asset tracking happens authentic way. For now, all technical conditions are available.

Keywords: *UAV, Drone, tracking, safety of flying, authenticity, controllability*

Bódi Antal ITS tanúsítási irodavezető Tanúsítási Igazgatóság KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. bodi.antal@kti.hu orcid.org/0000-0002-6199-8025	Bódi Antal Head of ITS Certification Office Directorate of Transport Systems Certification KTI Institute for Transport Sciences Non Profit Ltd. bodi.antal@kti.hu orcid.org/0000-0002-6199-8025
Dr. habil Wührl Tibor Ph.D egyetemi docens, GSM-R szakértő Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Híradástechnika Intézet wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-7522-3511	Dr. habil Wührl Tibor Ph.D associate professor, GSM-R expert Óbuda University Telecommunication Department wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-7522-3511
Szabó Tivadar tanúsítási igazgató, ERTMS szakértő Tanúsítási Igazgatóság NoBo /DeBo KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. szabo.tivadar@kti.hu orcid.org/0000-0003-3759-6605	Szabó Tivadar Director, ERTMS expert Directorate of Transport Systems Certification NoBo / DeBo KTI Institute for Transport Sciences Non Profit Ltd. szabo.tivadar@kti.hu orcid.org/0000-0003-3759-6605

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-10-0374_Bodi_A-Szabo_T-Wuhrl_T.pdf

Fehér Krisztina, Óvári Gyula

A MIKROALGÁK FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI A BIODÍZEL ÜZEMANYAGOK ELŐÁLLÍTÁSÁBAN

A szárazföldi, légi és tengeri közlekedés az összes energiafelhasználás egyharmadát tudhatja magáénak, így több olyan fontos szempontot is figyelembe kell venni, amelyeket a fosszilis üzemanyagok használata befolyásol. Alkalmazásuk növekvő környezetszennyezést okoz, és emellett az üzemeltetési költségek is folyamatosan nőnek a nyersolaj árával együtt. E két tényező miatt is érdemes olyan alternatív lehetőségeket felkutatni, amelyek képesek teljes mértékben kiváltani a jelenleg használt üzemanyagokat, továbbá megújulóak, szén-dioxid semlegesek és környezetbarátok. Erre megoldást nyújthatnak az alternatív tüzelőanyagokon belül a bioüzemanyagok, melyek változatos fajtájú biomasszákból állíthatók elő. Ezek közé tartoznak a fotoszintetizáló mikroorganizmusok, az algák is. Az általuk megtermelt olaj megfelelő alapanyag lehet a biodízel előállításához, ráadásul mindezt úgy, hogy ennek létrehozásához a légkörben lévő szén-dioxidot használják fel.

Kulcsszavak: *alternatív üzemanyag, bioüzemanyag, biodízel, mikroalga, zöldolaj*

A Föld energiaéhsége a népesség számával együtt folyamatosan növekszik. Eddig fosszilis eredetű energiahordozókból lehetett fedezni az igényeket, de az elmúlt évtizedekben ráébredt az emberiség, hogy a hagyományosnak számító tüzelőanyagok előállítása, használata gazdasági és környezetvédelmi problémákat is felvet. A kőolajból származó üzemanyagok alkalmazása egyfelől emelkedő költségekkel jár, amely hátterében a növekvő olajárak (az elérhető mennyiség csökkenése illetve az egyre nehezedő kitermelési módszerek miatt) és nem elhanyagolható mértékben a spekuláció állnak, másfelől hozzájárul a szén-dioxid felhalmozódásához a környezetben. Ezért, szükségessé válik olyan tüzelőanyagok létrehozása, amelyek megújulóak, CO_2 semlegesek, és megfelelően működnek velük a közlekedési eszközök. Az utóbbi kritérium teljesítéséhez szabvány által meghatározott határokon belül kell teljesítenie az előírt paramétereket az új alternatív üzemanyagnak, - példaként néhány fontosabb - megfelelő savtartalommal, kinematikai viszkozitással, sűrűséggel, fűtőértékkel, lobbanásponttal kell rendelkezniük. Az egyik ilyen lehetőség a megfelelő módszerekkel előállított biodízel, amellyel egyfelől kiválthatóvá válik a gázolaj illetve a kerozin, másfelől elégetésével, jóval kevesebb szennyezőanyagot (szén-dioxidot, ként, lebegő részecskéket) bocsát a környezetbe. Ennek alapjául szolgálhat egy mikroorganizmus által előállított olaj is.

A BIOÜZEMANYAGRÓL RÖVIDEN

A bioüzemanyagot biomasszából készítenek különböző technológiai eljárásokkal, attól függően, hogy milyen hagyományos tüzelőanyagot kívánnak kiváltani vele, illetve melyikkel szeretnék keverni. A biomasszát nagyrészt a mezőgazdaság állítja elő, de létrehozható különféle hulladékok (pl. kereskedelmi, ipari, kommunális) lebomlásának eredményeként is.

A bioüzemanyagok kategorizálhatóak például az alapanyag eredete és annak származása (termőterülete alapján, generációk szerint (első, második, harmadik, negyedik). Az első generációs bioüzemanyagokra jellemző, hogy olyan növényekből származik a biomassza alapjuk, amelyek

élelmezésre is megfelelőek, mint például a kukorica, burgonya vagy napraforgó. Ezekből keményítőt, növényi olajat, cukrot nyernek ki. A hasonlóság a második generációsokkal, hogy olyan termőföldeket használnak nyersanyag termesztésükhöz, melyeken kultúrnövények is megélnek. Nagy különbség kettőjük között, hogy az újabb generációs bioüzemanyag kiindulópontját olyan növények biztosítják, melyek se emberi élelmezésre, se állati takarmányozásra nem megfelelőek. Természetesen etikai kérdések merülhetnek fel a termőföld illetve az alapanyagként alkalmazott növények ilyen felhasználásáról, továbbá elgondolkodtató, milyen mélységben tolakodhat be emberek a bioszférába, csak azért, hogy túláradó energiaéhségét csillapítsa [1].

A harmadik generációs bioüzemanyag fő előállítójának a különböző alga fajok számítanak. Általánosságban elmondható, hogy génmódosításon esnek keresztül, hogy minél több - a későbbiekben belőlük kinyerhető - olajat legyenek képesek termelni, illetve ellenállóbbak legyenek az élősködőkkel szemben. Alapanyagukat tekintve az első két generációs bioüzemanyagokkal szemben előnyük, hogy fajlagosan nagyobb mennyiségű megújulónak számító energia nyerhető ki belőlük, amelynek bekerülési költsége alacsonyabb, továbbá olyan talajokra, tartályokba telepíthetőek e mikroorganizmusok, amelyek nem tekinthetőek termőföldnek, emellett termesztésükhöz nem szükséges tiszta víz. A negyedik generációs bioüzemanyagok a biomasszát már nem közvetlen termelésre használják, hanem olyan katalizátorként, amely a napsugárzást felfogva, CO_2-dal ellátva állít elő alternatív tüzelőanyaghoz alapanyagot. Ebben a csoportban is megjelennek az algák, mint termelő szervezetek, de mellettük jelen vannak még a cianobaktériumok is [1][2].

AZ ALGÁK BEMUTATÁSA

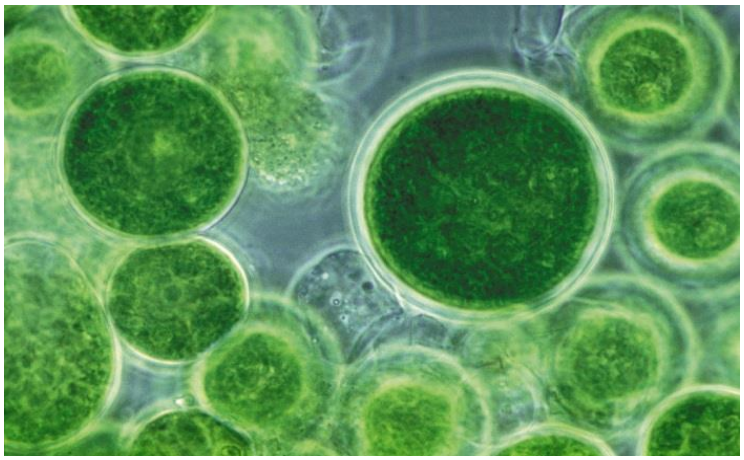
Az alga szó hallatán a legtöbb embernek egy vízfelszín jut eszébe, amelyet zöld, nyálkás réteg terít be. Pedig elképzelhető, hogy ebben a lebegő filmrétegben élő mikroorganizmusok lesznek a jövő „zöld” üzemanyag előállítói, amelyet az autóktól kezdve a repülőgépekig a közlekedésben használni fognak, és végleg lezárja azt a háborút, melyet két iparág (bioüzemanyag és az élelmiszer) vív egymással a termőföldek és a kultúrnövények felhasználásáért.



1. ábra Algaréteg [3]

A mikroalgák fotoszintetizáló mikroorganizmusok, melyek széles körben elterjedtek a Földön, hiszen az édesvizektől kezdve a tengerekig megtalálhatóak magában a vízben, illetve az iszapban és az üledékben is. Láncokba, telepekbe kapcsolódva élnek, de előfordulnak külön, egyetlen sejtből álló egyedek, ún. mikroalgák (2. ábra) is. Eddig mintegy 50 000 fajukat fedezték már fel, de a kutatók úgy vélik, hogy ennek akár a tízszerese is lehet az alfajok száma. Hiába

nem számítanak magasabb rendű biológiai életformának, jelenlétük elengedhetetlen a bioszférában, hiszen a légkör oxigén mennyiségének körülbelül a felét ők állítják elő fotoszintézis útján szén-dioxidból. Léteznek közöttük olyan egyedek is, amelyek bioüzemanyag alapanyagot képesek előállítani az utóbbi gáz felhasználásával. Ezekre irányul már néhány éve az alternatív üzemanyagokat kutatók figyelme.



2. ábra Mikroalga [4]

Algákból több különböző bioüzemanyag is előállítható:

- anaerob módon: metán;
- mikroalgák által termelt olajból: biodízel;
- fotobiológiai úton: biohidrogén [5].

Ezek közül ebben a cikkben a biodízellel foglalkozunk, mivel

- a legkiterjedtebb kutatások e téren folynak;
- a jelenleg használt gépjármű motorok nagyobb hajtómű átalakítások nélkül ezt az üzemanyagot képesek megfelelően hasznosítani;

AZ ALGÁK TERMESZTÉSE

A mikroalgák termesztéséhez szükség van megfelelő mennyiségű napfényre (költségeket tekintve a természetes napfény az ideális), szén-dioxidra, vízre és szervetlen sóra, továbbá 20–30 °C közötti környezeti hőmérsékletre. A növekedésükhöz szükséges tápoldatnak is előírt összetételűnek kell lennie, tartalmazva nitrogént, foszfor, vasat és szilíciumot optimális arányban. A tengeri fajoknál természetesen tengervizet használnak termesztésre nitrát és foszfát műtrágyákkal kiegészítve. 100 t alga biomassza 183 t széndioxidot, – a nappali órákban, pH érzékelőkkel ellenőrzik e molekula felvételét - használ fel. A napszak azért fontos, mert ilyenkor képesek megkétszerezni, akár többszörözni is tömegüket. Éjszaka viszont nem táplálkoznak, sőt a napközben elért növekedésük akár 25%-át is képesek elveszíteni. Utóbbit erőteljesen befolyásolja a hőmérséklet, illetve a tápoldat minősége, így e jellemzőket megfelelő szinten kell tartani [5].

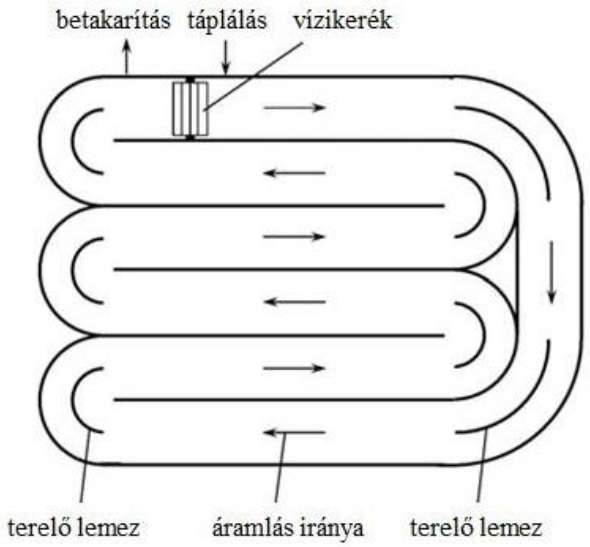
A nagyüzemi termelést kétféleképpen valósítható meg: nyíltvízi medencékben, illetve csőszerű, ún. fotobioreaktorokban. Mindkét módszernek van sajátos előnye: az előbbi egy kevésbé költ-

séges megoldás, míg az utóbbi esetében nem fertőződhet felül más algafajjal a termelési folyamat során. Mindkét változat jó teszteredményeket ért el a laboratóriumban, a kereskedelmi termelésben felmerülnek olyan problémák, amelyek a kutatási időszakban nem jelentkeztek.

Jó példa erre a GreenFuel Technologies vállalat esete is. 2007-es év elején Arizónában létrehoztak egy üvegházat, melybe fotobioreaktort telepítettek, élő algából üzemanyag előállítására. Rövid idő után már problémák merültek fel, ugyan is az algák gyorsabban növekedtek a csővezetékekben, mint ahogy a cég képes volt betakarítani az általuk megtermelt olajat, a megnövekedett mennyiségű mikroorganizmusnak viszont kevésnek bizonyult a fény, illetve a tápanyag, így azok elpusztultak [6].

Nyíltvízi medencében történő algatermesztés

Az átlagosan 30 cm mélységű, betonból vagy tömörített földből készül nyíltvízi medence zárt hurok kialakítású (3. ábra), melyben – a leülepedés elkerülésére – egy vízkerék folyamatosan keveri, cirkuláltatja a vizet. Az alját fehér műanyag fóliával vonják be. Az alga betakarítására a fent említett kerék előtt kerül sor [5].



3. ábra Nyíltvízi medence felépítése [5]



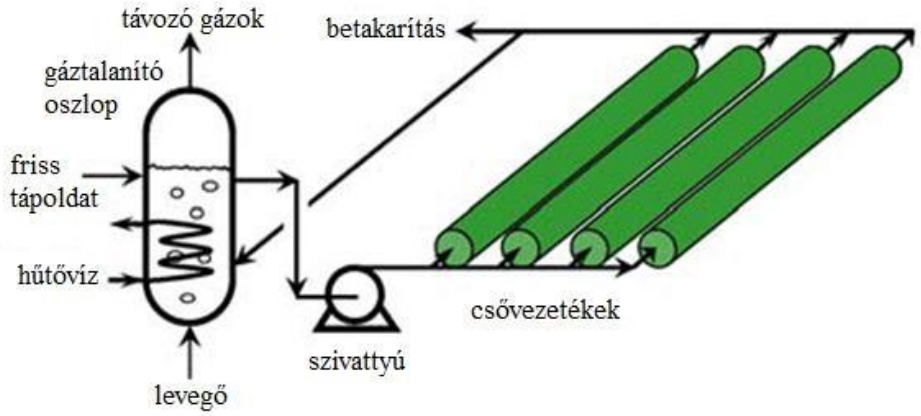
4. ábra Earthrise Nutritional vállalat algafarmja [7]

A legnagyobb medencét (felülete 440 000 m^2) az Earthrise Nutritionals (4. ábra) birtokolja (2007-es adat). Ezt a termelőhelyet már az 1950-es évek óta használják. Hátránya, hogy nagy napi illetve szezonális hőmérsékletingadozás hat rá, magas a párolgási vízveszteség nyitott teteje miatt, így kevesebb szén-dioxidot tud elnyelni, továbbá megjelenhetnek benne más, a mikroalgákon élősködő algák illetve mikroorganizmusok is [5].

Csőszerű fotobioreaktorban történő algatermesztés

A fotobioreaktor zárt rendszernek tekinthető; csővezetékein belül található meg a biomassza. A kialakítása és berendezései más, pl. a nyíltvízi medencés termelési módszerhez képest eltérőek, és az alábbi elemekből áll (5. ábra):

- ***napkollektor csővezetékek:*** műanyagból vagy üvegből készült átlátszó csősorok, átmérőjük maximalizálva van, hogy a belsejüket is átjárja a fény, így biztosítva a biomassza fejlődését;
- ***tartály:*** friss tápközeg adagolása, hűtés, levegővel történő ellátás és gáztalanítás zajlik benne;
- ***szivattyú:*** a biomassza keringtetését biztosítja.



5. ábra Fotobioreaktor berendezés részei [5]

Több fajta csővezeték elhelyezés létezik, de a legelterjedtebb a párhuzamos fektetés, ahol a csövek észak-déli irányban futnak, hogy minél több napfényt legyenek képesek elnyelni. Alattuk a talajt vagy fehérre festik vagy fehér műanyag lapokat helyeznek el azon, ezzel növelve a fényvisszaverés mennyiségét. A másik elterjedt kialakításhoz rugalmas műanyag csővezetékeket használnak, amelyeket egy tartókeretre spirálisan körbe tekerve helyeznek el (6. ábra), hátránya, hogy csak kisebb mennyiségű biomassza termelhető benne. Általában természetes megvilágítást használnak, de több termelő helyen alkalmaznak mesterséges fényt is, amely drágítja az előállítást. A víz keringtetéséhez ebben a rendszerben is igénybe vesznek szivattyút, melyek beépítési módja lehetséges: mechanikus illetve felhajtó erőn[1] alapuló, nem mechanikus szivatytyú (pl.: mamutszivattyú). Az előbbi egy olcsóbb, könnyebb telepítésű és üzemeltetésű berendezés, viszont roncsolhatja a biomasszát. Az utóbbi előnye, hogy finomabban képes cirkuláltatni a tápoldatot az algák körül [5].

[1] Működési elve, hogy a rendszerbe „nyúló béléscsőbe egy külön csövön olyan gázkeveréket juttatnak be, amelytől a felhajtóerő megnövekszik (légnyomásos vízemelő). Ugyanis a gáz és a kútban levő víz keverékének sűrűsége a víznél kisebb lesz, és a sűrűségkülönbség felhajtóerőként működik.” [16]



6. ábra Spirálisan feltekert csővezeték egy fotobioreaktorban [8]

Természetesen a csővezetékeket bizonyos időközönként tisztítani és fertőtleníteni szükséges, valamint problémaként merül fel, hogy az algák előszeretettel tapadnak meg a csővezetékek belső falán. Utóbbi azért jelent gondot, mert a fényt kizárják a cső belsejéből, csökkentve ezzel a termelékenységet. A tisztítás lehetséges módszerei lehetnek:

- levegődugó bejuttatása a csővezeték belsejébe;
- csővezeték átmérőjével éppen megegyező nagyságú gördülő golyók alkalmazása;
- nagy turbulens áramlás létrehozása;
- lebegő homok vagy hasonló tulajdonságokkal bíró részecskék felhasználása a belső felület lecsiszolására;
- olyan enzimek bejuttatása, amelyek feloldják a kapcsolatot a cső fala és a rajta megtapadó algatelep között [5].

Termelést befolyásoló tényezők

A mikroalgák napfény hatására CO_2 felhasználásával fotoszintetizálnak, miközben oxigént állítanak elő, így feldúsítva oldott O_2-vel a tápoldatot. Ha ez az érték magasabb, mint a légkör telítettségi szintje, akkor a fotoszintézis lelassul, továbbá a napsugárzás már nem hasznos, hanem épp ellenkezőleg fotooxidatív[2] kárt okoz az algáknak. Ezt elkerülendő nem lehet a rendszeren belül az oldott oxigén szintjét 400%-kal magasabb, mint a légkörben található. Tovább nehezíti ezeket a problémákat a fotobioreaktor kialakítása, hiszen zárt csővezetékekben termesztik a mikroalgákat, ezért ennek ellensúlyozására gáztalanító zónát hoznak létre a rendszerben, és ott levegővel kezelve a tápoldatos biomasszát eltávolítják belőle a felesleges oxigént. Emiatt illetve további tényezők miatt (pl.: biomassza és oxigén koncentrációja, fény intenzitása, áramlási sebesség, stb.) tervezik ezeket a csöveket maximum 80 m hosszúra. A gáztalanító zóna pH szabályzóként is működik (az elnyelt CO_2 befolyásolja a tápoldat pH értékét).

[2] Magas fényintenzitás hatására bekövetkező oxidáció, mely során a pigmentek kifehérednek, a növény elpusztul. (http://ttmk.nyme.hu/blgi/Lapok/N%C3%96V%C3%89NY%C3%89LETTANITUDOM%C3%81NYOSM%C5%B0HELY.aspx)

A mikroalgák érzékenyek hőmérsékletre, ezért ennek fontos a szabályozása. Nappal, 30 °C fölé, míg éjszaka nem 20 °C alá nem mehet a biomassza hőmérséklete. Több megoldás is létezik e feladat kezelésére, attól függően, hogy milyen kialakítású a termelő rendszer:

- ✈ kültéri fotobioreaktoroknál hőcserélőt helyeznek el a tartályba vagy a gáztalanító oszlopba, ami költséghatékony megoldásnak számít;
- ✈ szintén külső elhelyezésnél, száraz klímán közvetlenül a csővezetékekre permeteznek hűtővizet;
- ✈ a legköltségesebb kivitel az összes közül, ha olyan üvegházba telepítik az egész berendezést, amelyben a hőmérsékletet folyamatosan szabályozható. [5]

A két termelési rendszer rövid összehasonlítása

A két módszert összehasonlítva megállapítható, hogy a nyíltvízi medencékben történő mikroalga termesztés egyszerűbb és alacsonyabb költségek jellemzik. Az 1. táblázatból jól látható, hogy mindkét rendszer azonos mennyiségű szén-dioxidot használ fel a levegőből, ugyanakkora mennyiségű éves biomassza termelés mellett, az olajhozam azonban mégis magasabb a fotobioreaktorban történő termesztésnél.

Szempontok	**Fotobioreaktor**	**Nyíltvízi medence**
Éves biomassza termelés [kg]	100 000	100 000
Termelőképesség térfogatra vonatkoztatva [kg/m^{3}d]	1,535	0,117
Termelőképesség területre vonatkoztatva [kg/m^{2}d]	0,048[a] 0,072[c]	0,035[b]
Biomassza koncentráció a fermentlében [kg/m^3]	4,00	0,14
Hígitási arány [1/d]	0,384	0,250
Szükséges terület [m^2]	5681	7828
Olaj hozam [m^3/ha]	136,9[d] 58,7[e]	99,4[d] 42,6[e]
Éves CO_2 fogyasztás [kg]	183,333	183,333
Rendszer geometriája	132 párhuzamos cső/egység, 80 m hosszú és 0,06 m átmérőjű csővezetékek	978 m^2/medence, 12 m széles, 82 m hosszú, 0,3 m mély
Egységek száma	6	8

a: létesítmény területére vonatkoztatva,
b: tényleges medence területére vonatkoztatva,
c: fotobioreaktor csövek tervezett területére vonatkoztatva,
d: 70 tömeg% olajtartalmú biomasszára vonatkoztatva,
e: 30 tömeg% olajtartalmú biomasszára vonatkoztatva

1. táblázat A fotobioreaktoros és a nyíltvízi medencés algatermesztés összehasonlítása 100 t tömegre vetítve [2]

A biomasszából történő olaj kinyerésnek technikai és gazdasági vonzata is jelentős, mivel a fotobioreaktorokban a fermentlében a biomassza koncentrációja közel 30-szorosa a medencés kialakításénak, így ennek helyreállítási költségei töredéke az utóbbi rendszerben lévőhöz képest. Lényeges, hogy a fotobioreaktorokban a medencés eljáráshoz képest elérhető, hogy csak egy fajta mikroalga tenyésszen egy struktúrán belül. A két termelési rendszer teljes és pontos összehasonlításához sok szempontot kellene figyelembe venni. Jelen esetben az algatermesztés paraméterei közül a biodízel alapanyag előállításához köthető adatok kaptak prioritást, amelyek szerint a fotobioreaktorban történő termelés kiemelkedőbb eredményeket hoz, mint a nyíltvízi medencés módszer.

BIODÍZEL ELŐÁLLÍTÁSA

Az Amerikai Egyesült Államokban 1978-ban az Energiaügyi Minisztérium a Nemzeti Megújuló Energia Laboratóriummal közösen elindítottak egy komplex, un. Vízi Fajok Programot, melynek keretein belül:

- tanulmányozták az algák fejlődését medencékben, melyeket szénerőműből távozó szén-dioxiddal tápláltak;
- elemezték a mikroorganizmusok anyagcseréjét, olaj-előállító képességeit továbbá az általuk létrehozott olajat;
- megoldást kerestek arra, hogy lehetne növelni az olajhozamot [6].

A programot 1996-ban leállították, az eredményeit összefoglaló jelentés szerint: az algák felesleges szén-dioxidból nagy sűrűségű, természetes olajat képesek előállítani, hozzátéve, hogy a technológia ígéretes, de nem látható benne a jövőbeni potenciál (a kőolaj akkori ára alacsony volt).

Mikroalga fajok	**Olajtartalom [tömeg %]**
Botryococcus braunii	25–75
Chlorella sp.	28–32
Crypthecodinium cohnii	20
Cylindrotheca sp.	16–37
Dunaliella primolecta	23
Isochrysis sp.	25–33
Monallanthus salina	>20
Nannochloris sp.	20–35
Nannochloropsis sp.	31–68
Neochloris oleoabundans	35–54
Nitzschia sp.	45–47
Phaeodactylum tricornutum	20–30
Schizochytrium sp.	50–77
Tetraselmis sueica	15–23

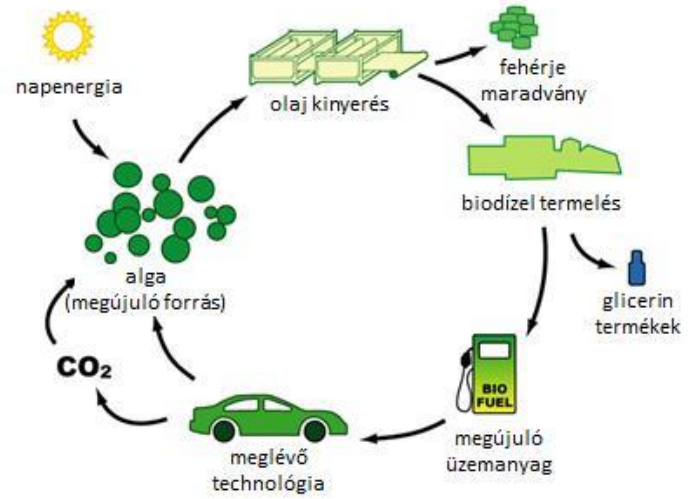
2. táblázat Néhány mikroalga fajta olajtartalma [2]

Mára ez megváltozott, nemcsak a nyersolaj ára fokozatosan emelkedése miatt, hanem mert igények merültek fel a szénsemleges eljárások, a biotechnológia fejlesztése iránt, illetve termőföldek megtartására élelmezési növények számára [6]. Fajtájuktól függően a mikroalgák fotoszintézis útján szén-dioxidból cukrot állítanak elő, majd ezt tovább alakítják lipidekké, amelyekben tárolják az olajat (2. táblázat). Kinyerésük többféleképpen lehetséges betakarításkor. A legegyszerűbb eljárás, mikor a kipréselik belőlük az olajat. Egy másik technológia szerint a lipideket sűrített szén-dioxid segítségével elpárologtatják, kivonják, majd kondenzálják őket, esetleg különböző oldószereket használva nyerik ki a fent említett kémiai anyagot [6].

Több szempontot figyelembe véve előnyösebb algákat termeszteni, mint olajos magvakat, hiszen a termelő egységeket jóformán bárhol el lehet helyezni, nincs szükség termőföldre, 24 órán belül meg tudják többszörözni saját mennyiségüket, illetve olajhozamuk kiemelkedően magasabb, mint azt a 3. táblázat is bemutatja az Amerikai Egyesült Államokra vetítve.

Termények	Olajhozam [l/ha]	Szükséges termőföld nagysága [Mha][3]	A létező termőföldek százalékos aránya az USA-ban[4]
kukorica	172	1540	846
szójabab	446	594	326
repce	1190	223	122
jatropha	1892	140	77
kókuszdió	2689	99	54
olajpálma	5950	45	24
mikroalga[5]	136 900	2	1,1
mikroalga[6]	58 700	4,5	2,5

3. táblázat Biodízel előállításához szolgáló források összehasonlítása. (2007-es adatok) [2]

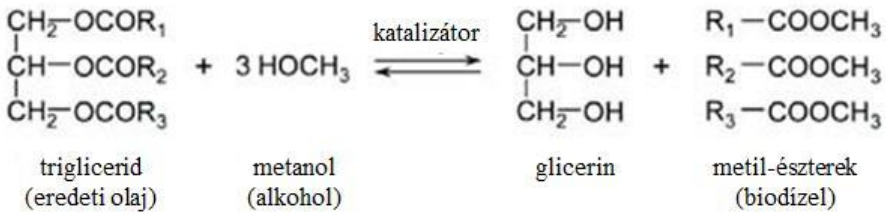


7. ábra Biodízel előállításának folyamata [9]

A mikroalgákból kinyert olajat különböző eljárásokkal alakítják biodízel üzemanyaggá (pl. 7. ábra). Első lépésként el kell távolítani belőle a foszfort és a benne lévő vizet, mely gátolja a transzészterezést, illetve a pigmenteket, szabad zsírsavakat, valamint a nyomokban előforduló fémeket, hogy készen álljon a vegyület a további feldolgozásra.

Az e célból végzett transzészterezés egy katalitikus egyensúlyi folyamat, mely során 1 mol nyersolajat 3 mol alkohollal reagáltatva a reakció végén kicsapódik a glicerin, és létrejön 3 mol biodízel (8. ábra). Ipari előállítás esetén 6 mol metanolt adagolnak a rendszerbe, hogy az átalakulás csak egy irányba történjen. Természetesen más fajta alkoholok is használhatóak a reakció során, de egyelőre gazdaságosság szempontjából a metanol a legkifizetődőbb. Katalizátorként lúgokat (előnyben részesítik gyors reagálása miatt), savakat vagy lipáz enzimeket használnak. A bázis katalizált folyamatokat légköri nyomáson 60 °C-on végzik, melynek időtartama körülbelül 90 perc. Ezen művelet végeztével a létrejött biodízel üzemanyagot többször átmossák vízzel, hogy a folyadékban maradt glicerint illetve metanolt eltávolítsák belőle [5].

[3] A közlekedési eszközökhöz ellátásához szükséges üzemanyag mennyiség 50%-ának biztosítása az USA-ban. (Feltételezve, hogy a szükséges üzemanyag mennyiség felét biztosítják biodízelből.)
[4] A közlekedési eszközökhöz ellátásához szükséges üzemanyag mennyiség 50%-ának biztosítása az USA-ban. (Feltételezve, hogy a szükséges üzemanyag mennyiség felét biztosítják biodízelből.)
[5] 70% (tömegszázalék) olajtartalom a biomasszában
[6] 30% (tömegszázalék) olajtartalom a biomasszában



8. ábra Transzészterezés folyamata[7] [5]

A mikroalgákból származó olaj biodízelként történő felhasználását különböző fizikai, kémiai tulajdonságokat előíró rendeletek határozzák meg. Ilyen szabványok léteznek az Európai Unióban (EN 14214 – járművekben üzemanyagként használva) illetve az Amerikai Egyesült Államokban is (ASTM D6751), melyek segítségével az (is) megállapítható, hogy a létrehozott biodízel közvetlenül felhasználható-e gépjárművekben vagy szükséges az átalakításuk a különböző hajtóművekben történő felhasználáshoz.

A 4. táblázat segítségével a különböző üzemanyagok néhány fontosabb jellemzője vethető összsze, de nem tartalmazza teljes terjedelmében a fent hivatkozott szabványokban rögzített valamennyi tulajdonságot, mint például víz-, kén-, sav- és észter tartalom, oxidációs stabilitás, kenhetőség stb.

	Sűrűség [kg/l]	Viszkozitás [mm^2/s]	Gyulladás-pont [°C]	Fajlagos energiaérték [20 °C-on MJ/kg]	Fajlagos energiaérték [20 °C-on MJ/l]	Cetánszám	Üzemanyag ekvivalencia
Dízel	0,84	5	8	42,7	35,87	50	1
Repce olaj	0,92	74	317	37,6	34,59	40	0,96
Biodízel	0,88	7,5	120	37,1	32,65	56	0,91
BtL	0,76	4	88	43,9	33,45	>70	0,97

4. táblázat A fosszilis eredetű dízel és a különböző biodízelek fizikai tulajdonságai [2]

A biodízel üzemanyag előnyei közé sorolható, hogy használatával kevesebb szén-dioxid és korom kerül a levegőbe, míg kén egyáltalán nem, így a környezetre mért terhelése jóval kisebb, mint a fosszilis eredetű tüzelőanyagoknak. Ehhez hozzátartozik, hogy könnyen lebomló, nem toxikus folyadékról beszélünk. Hátránya a gyártási technológiájából adódik, miszerint előállítása sok vizet igényel. Önmagában is, de meghatározott arányban hagyományos dízel üzemanyaghoz keverve is használható [10].

Az algatermesztés és a biodízel előállításának gazdasági háttere

Bármely új termék piacra történő bevezetésekor figyelembe kell venni a költségeket. Ugyanez érvényes a hagyományos tüzelőanyagok alternatív üzemanyagokra történő kiváltására is, hiszen egy szempont a sok közül, hogy nem szennyezi a környezetet, illetve megújuló energiaforrások felhasználásával készül el, de fel kell vennie a versenyt árban is a piacon lévő egyéb lehetőségekkel.

[7] A képletekben szénhidrogén csoportokat jelölnek az R_1, R_2, R_3 jelzések.

Költségeket tekintve a mikroalgából az olaj kinyerése, majd ennek átalakítása biodízel üzemanyaggá független a rendszer kialakításától, vagyis eltekinthetünk attól, hogy fotobio-reaktorban vagy nyíltvízi medencében történik a termesztés, egyetlen befolyásoló tényező maga a biomassza és ennek fenntartása. E növényi olajból előállított biodízel akkor válik versenyképessé a hagyományos dízel üzemanyaggal szemben, ha 0,48 USD áron lehet előállítani literét (2007-es ár), illetve az alábbi képlet segítségével megállapítható az adott kőolaj árból származtatott alga olaj ár, amellyel gazdaságilag helyettesíthető a fosszilis eredetű alapanyag:

$$C_{\text{alga olaj}} = 6{,}9 \cdot 10^{-3} C_{\text{kőolaj}},$$

ahol

$C_{\text{alga olaj}}$ – 1 liternyi mikroalga olaj ára USD-ben;

$C_{\text{kőolaj}}$ – a nyersolaj hordónkénti[8] ára USD-ben [5].

Példaként említve, ha 48 USD-os hordónkénti nyersolaj árat (2017. első negyedév átlag ára) tételezünk fel, akkor a mikroalgából készült olaj ára nem lehet magasabb 0,33 USD literenként, ha a hagyományos alapanyag kiváltását szeretnénk gazdasági szempontok alapján. Ehhez még természetesen azt is figyelembe kell venni, ennek a növényi eredetű olajnak az energiatartalma mekkora a kőolajhoz viszonyítva. A fenti képlet körülbelül 80%-kal számol.

Még piacképesebbé tehető a mikroalgákból előállított biodízel, ha a termelési költsége csökkenthető. Erre jelenleg három módszer ismert:

- fotobioreaktorok különböző paramétereinek fejlesztése;
- a mikroalgák termelési képességeinek javítása (genetikai módosítás);
- biofinomító alapú termelés bevonása a rendszerbe [5].

Bár a fotobioreaktor termelékenysége magasabb szintű a medencéhez képest, de azért mindenképpen fejlesztésre szorul. Kialakulhatnak benne úgynevezett központi sötét zónák (cső belseje) illetve jobb megvilágítású perifériás területek (cső külseje), amelyek a biomassza optimális fejlődésének szempontjából nem megfelelőek. A csövekben fellépő turbulencia a fermentlé gyors körforgását indukálja a világosabb és a sötétebb részek között, amely ciklus gyakorisága több tényezőtől függ, például a külső besugárzott felülettől, a csővezetékek átmérőjétől, az algát felépítő sejtek koncentrációjától, a biomassza optikai paramétereitől illetve a turbulencia intenzitásától. Ha időben megfelelő ütemben váltakoznak a fényes és sötét periódusok, akkor ezzel is növelhető a biomassza termelékenysége a folyamatosan azonos fényintenzitású előállításhoz képest. Ennek oka, hogy a fénytelítettséget ellensúlyozva a szükséges ideig sötétben tartott algák regenerálódni tudnak, így felkészülve a következő fényes időszakra és a növekedésre. Ötletként merült fel, hogy a fotobioreaktor csővezetékeibe álló keverő lapátok beépítése is, a biomassza áramlás kétféle zónájának keverésére, de ez a megoldás nem váltotta be a hozzáfűzött reményeket, mert döntően akadályozta a fény bejutását a csővezetékek belsejébe. Továbbá arra is figyelmet kell fordítani, hogy ne legyen túl nagy az áramlás sebessége a csövekben, mert az roncsolhatja az algatelepet, amelyek egyébként is ki vannak téve a keringtetés miatt a szivattyú

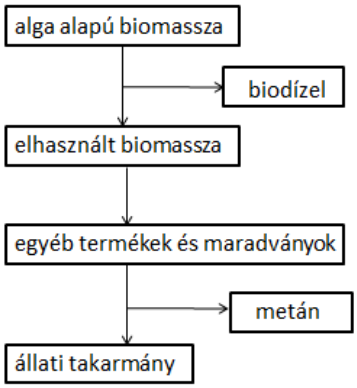
[8] Egy standard amerikai ***hordó (barrel) nyersolaj 159 liter (0,136 tonna)***, amiből annak minőségétől, az alkalmazott technológiától függően (pl. USA-ban) 78 liter benzin és 38 liter gázolaj állítható elő.

illetve a tartályfalak okozta sérülésnek. Tehát meg kell találni azt az optimális áramlási sebességet, amellyel a sötét-fényes területek megfelelően keverhetőek, de nem szaggatja szét az algaszőnyeget [5].

A második költségcsökkentő, termelési képességet növelő tényező a mikroalgák tulajdonságainak genetikai módosítása. E szakterülettel a géntechnológia foglalkozik az utóbbi évtizedben egyre sikeresebben. Különféle beavatkozásokkal, eljárásokkal a mikroorganizmusok alábbi jellemzői befolyásolhatóak:

- a fotoszintézis hatékonyságának növelése;
- a biomassza növekedési ütemének növelése;
- a biomassza olajtartalom mennyiségének emelése;
- a hőmérsékletingadozás toleranciájának erősítése;
- a fény telítettség jelenségének kiküszöbölése;
- a fotoinhibíció (fénygátlás) csökkentése;
- a fotooxidációra való hajlam redukálása [5].

A harmadik lehetőség biofinomító létrehozása algafarmok mellett. E a rendszer működési elve megegyezik a kőolajfinomítóéval, hiszen az eljárás során az összes keletkező nyersanyagot további felhasználásra képessé teszi. A 9. ábra bemutatja, milyen nyers- és alapanyagok jönnek létre egy biofinomítóban működés közben:



9. ábra Biofinomító működése közben termelődött alap- és nyersanyagok

Ilyen berendezések már megtalálhatóak Németországban, az Amerikai Egyesült Államokban, illetve Kanadában is, egyelőre főként olajos magvak feldolgozására alkalmazzák. A mikroalgák az olaj mellett fehérjéket, szénhidrátokat illetve egyéb tápanyagokat tartalmaznak. A fenti ábrából jól látható, hogy az elhasznált, kimerített biomasszát még fel lehet használni állatok takarmányozására, étrendkiegészítők, kozmetikai cikkek alapanyagainak és metán előállítására is (ami közvetlenül is kinyerhető lenne algából, de más szerves anyag anaerob (oxigénhiányos környezetben is életképes) bomlásából származó gáz olcsóbb előállítási költségű), amely alkalmazásával elektromos áram nyerhető (például algatermesztésnél továbbiakban igénybe vehető). Tehát, a mikroalgákból biodízel, biogáz, állati takarmány és villamos áram is kinyerhető [5].

Az algatermesztéssel foglalkozó vállalatok bemutatása

A világon egyre több helyen létesülnek algatermesztéssel foglalkozó vállalatok Amerikától kezdve Európán át egészen Ausztráliáig. E cégek többségére jellemző, hogy a termelés mellett

kutatásokat is végeznek, illetve nem csak bioüzemanyag előállítással, hanem egyéb áruk létrehozásával is foglalkoznak (például táplálék kiegészítők, kozmetikai termékek, állati takarmányozásra szánt tápok stb.), kihasználva a biofinomító berendezés adta lehetőségeket. Természetesen a befektetői kedvet ebben a szektorban is befolyásolja a folyamatosan ingadozó nyersolajár. Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül megismerhető néhány, a piacon meghatározó - algatermesztéssel foglalkozó vállalat.

Sapphire Energy

A 2007-ben alapított, San Diego-i székhelyű Sapphire Energy vállalat olyan támogatókat és befektetőket tudhat maga mögött, mint Stephen Mayfield (sejtbiológus), Bill Gates and Arch Venture Partners.

A Sapphire Energy a nyílt felületű medencés termelési módszert alkalmazva olyan vízzel tölti fel ezeket a víztárolókat, amely emberi fogyasztásra alkalmatlan (pl. sós tengervíz) illetve elhelyezkedésüket tekintve se merülnek fel etikai kérdések, hiszen használaton kívüli földre telepítik őket. A vállalat alacsony költségű, de értékes biomasszából akvakultúra alapanyagául szolgáló, illetve állati takarmány összetevőket és megújuló üzemanyagot állítanak elő. A cégnek eddig több mint 300 elfogadott továbbá függőben lévő szabadalmi bejegyzése létezik, ezek közé sorolható a 2007 nyarán létrehozott Green Crude elnevezésű algából származó üzemanyag. A Sapphire Energy olyan bioüzemanyagot állított elő, mely nem biodízel és nem etanol, megfelel a tüzelőanyag szabványnak, kiváltható vele a kerozin, a benzin illetve a gázolaj is. Természetesen teljes titoktartás mellett hozzák létre a Green Crude-ot, amely magában foglalja az egész folyamatot az algák genetikai módosításától kezdve a termesztésen át egészen a bioüzemanyag előállításáig [6][11].

Solazyme

Kalifornában, San Francisco-ban 2003-ban alapították Solazyme vállalatot amely, kirendeltséget működtet Peoria-ban illetve Sao Paulo-ban is. Ipari kenőanyagokat, bioüzemanyagot állítanak elő folyamatos fejlesztések során. Olyan mikroalgákkal folytatnak kísérleteket, amelyek által megtermelt olaj ki tudja váltani a kőolajat, az állati zsiradékot illetve a növényi olajakat. A Solazyme vállalat arra törekszik, hogy olyan megújuló, tiszta bioüzemanyagot állítson elő, amely orvosolja az üzemanyaghiányt, ebből adódóan energiabiztonságot ad, illetve létrehozásával nem szennyezi a környezetet, alkalmazásához nem szükséges módosítani a motorokat [12].

Négy bioüzemanyaguk autókba, légijárművekbe illetve tengeri járművekbe tankolható. A Soladiesel$_{BD}$ és a Soladiesel$_{RD}$ (megújuló dízel) az autókba tölthető diesel üzemanyagot váltja ki. Mindkettő 100%-ban alga alapú, megfelel az amerikai ASTM D 975 szabványnak (a BD változat az ASTM D 6751-nek is), mert nagyon alacsony a kibocsájtott kipufogógázuk kén- illetve szilárdrészecske tartalma. Az ASTM D 1655 szabványnak megfelelő Solajet elnevezésű tüzelőanyaguk a repülőgépekhez használható. Előnye, hogy a hagyományos üzemanyagok teljesen kiválthatóak vele, hosszabb az eltarthatósági ideje, használatával csökken a légijárművek füstkibocsátása, illetve a szárnyat ért hő általi igénybevétel, olcsóbb a karbantartás, alacsonyabb szintű a gyúlékonysága. 2008 óta áll a Solazyme vállalat kapcsolatban az Amerikai Haditenge-

részettel és a Védelmi Minisztériummal, hogy megújuló üzemanyagot fejlesszenek ki számukra. A cég a tengeri járművekhez használható, a HRD-76 illetve a HRJ-5 katonai előírásoknak megfelelő biodízelt hozta létre [12].

Algae.Tec

A 2007-ben alapított ausztrál Algae.Tec vállalat szintén több féle termékeket állít elő algából az élelmiszer, a mezőgazdaság és az üzemanyag szektorokban a fenntarthatóság jegyében, megújuló technológiákat alkalmazva. Folyamatos fejlesztések folynak laboratóriumaikban, hogy javítsák az algák termelékenységét, szén-dioxid megkötését, versenyképesek maradjanak az algák termesztése, betakarítása illetve a belőlük készült produktumok létrehozása terén. A cég zárt rendszerű fotobioreaktorban termeszti az algákat, mely rendszerhez kapcsolódik egy légköri szén-dioxidot befogó és tároló készülék, mely a mikroorganizmusok táplálásához elengedhetetlen. Az Algae.Tec és a Lufthansa vállalat egy szándéknyilatkozatot írt alá a repülésben használható biodízel üzemanyag fejlesztéséről [13].

AlgaEnergy

Az AlgaEnergy madridi székhelyű cég, mely mikroalgák biotechnológiájára szakosodott, kutatások, fejlesztések területén, melyektől a környezet fenntarthatóságát, energia igények kielégítését, illetve az élelmiszerbiztonság problémájának megoldását várják. Az AlgaEnergy több fajta terméket állít elő mikroalgákból (étrendkiegészítőkhöz és kozmetikai szerekhez alapanyagot, állati takarmányokat, bioműtrágyát illetve bioüzemanyagot), amelyekkel nem csak a hazai piacokat, hanem a külföldieket is ellátja. A cég által megálmodott AlgaeDiesel üzemanyag már létezik, kiemelkedő tulajdonságokkal, magas energetikai teljesítménnyel bír, de jelenleg is folynak fejlesztések, hogy gyártása költséghatékonnyá váljon [14].

Az első algatenyészetet egy olyan mobil laboratóriumban helyezték el, ahol a tartályok térfogata összesen 240 l volt. A kapacitás-fejlesztés következő lépéseként 2009-ben telepítettek egy üzemet az Alfondo Suarez Madrid-Bajaras repülőtér mellé, mely létesítményük az ipari szén-dioxid kibocsátást használja fel a fotobioreaktorokban tenyésző algák táplálására, ahol azóta is számos kutatás folyik a különböző algafajok termesztésével, gyártási technológiákkal kapcsolatban. A berendezések űrmértéke összesítve 40 000 liter. 2014-ben üzembe helyezték az egy hektáron elterülő Arcos de la Frontera ipari létesítményt, melynek teljes kapacitása 1 000 000 liter és emellett évente 100 t száraz biomasszát képes előállítani. Az algafarm az IBERDROLA erőmű mellett fekve a gyár kéményeiből származó szén-dioxidot használja fel [14].

Cellana

A HR BioPetroleum vállalatot 2004-ben alapították, majd 2011-ben nevét Cellana-ra változtatták. Központja Hawaii-on illetve Kaliforniában van. A cég biofinomítót működtetve étrendkiegészítő alapanyagokat, állati takarmányt, bioüzemanyagot állít elő édesvízi és tengeri algákat termesztve. Az általuk létrehozott és szabadalmaztatott ALDUO technológiát használják, amely kétlépcsős, hibrid rendszerben, párban kapcsolja össze a fotobioreaktorokat a nyíltvízi medencékkel. E két módszer együttes alkalmazásával biztosítható a gazdaságos (csökkentett beruházási és teljes termelési költség), folyamatos termelés, kizárva az algák felülfertőződését, így egységes monokultúrát létrehozva [15].

A Cellana által létrehozott bioüzemanyagok összefoglaló neve: ReNew Fuel. Három lehetőséget kínál, melyből kettőt szárazföldi, egyet légiközlekedéshez ajánl. Megújuló dízel üzemanyaguk jelenleg a legfejlettebb a piacon. Összetételében megegyezik a hagyományos gázolajjal, így önmagában vagy hagyományos gázolajjal keverve elláthatók vele dízel motorok, és használatával csökkenthető a károsanyagok szintje a kipufogógázokban. Biodízel üzemanyaguk is hasonló tulajdonságokkal bír, de az maximum 20/80%-os arányban keverhető fosszilis tüzelőanyaggal, az utóbbi javára. Előnyei közé sorolható, hogy ként és aromás vegyületeket egyáltalán nem vagy csak nagyon kis mennyiségben tartalmaz, kb. 75%-os szén-dioxid csökkenés érhető el vele a hagyományos tüzelőanyagokhoz képest. Nyers algából készült olaja jó alapanyagot biztosít a civil illetve a katonai légijárművek tüzelőanyag ellátáshoz [15].

ÖSSZEFOGLALÁS

A mikroalgákból megfelelő termelési módszerek, technológiák alkalmazása mellett, az olajos magvakhoz képest bőségesen állítható elő olaj termőföldek használata nélkül, ráadásul fotoszintézisükhöz a légkör nagy mennyiségű szén-dioxidját veszik fel. Lehetőség mutatkozik arra, hogy az ebből előállított biodízel egyelőre részben, később teljesen kiszoríthassa a hagyományos üzemanyagokat. A manapság használatban lévő dízelmotorokban jelenleg csak meghatározott keverési arányban, pár év múlva új fejlesztések révén várhatóan önmagában is alkalmazható lesz. Ez az alternatív üzemanyag valószínűsíthetően a későbbiekben széleskörűen elterjedt a szárazföldi, légi és tengeri járművek üzemeltetésében.

Jelenleg a biodízel elterjedésének több tényező szab határt, kiemelten az előállításának költség oldala. Gazdaságilag kell versenyképessé tenni a hagyományos üzemanyagok mellett, amelyhez elengedhetetlenek a további technológiai fejlesztések. Kiemelten ide tartozik az algák genetikai módosítása az olajhozamhoz kapcsolódó jellemzőik javítása érdekében. További költségcsökkentés várható a termelésben, ha biofinomítót alkalmazva más, újabb termékeket is képesek lesznek előállítani az elhasznált biomasszából (pl. állati takarmányt, étrend-kiegészítőket vagy elektromos áramot, utóbbit visszaforgatva a termelési rendszerbe).

Elmondható, hogy a világ nagy részén egyre több kutatás zajlik ebben a témakörben, és növekszik a vállalatok száma, melyek a biodízel üzemanyag vizsgálatával, fejlesztésével, illetve létrehozásával foglalkoznak. Míg 2006-ban összesen négy cég foglalkozott algatermesztéssel, addig két évvel később már ötven vállalkozás volt érdekelt ezen a szakterületen [6]. Az algatermesztés és bioüzemanyag gyártás rentabilitását és ezen keresztül a befektetési és vállalkozói kedvet az ingadozó olajárak számottevően befolyásolják. Valószínűsíthető, hogy az apadó mennyiségű nyersolaj, az erősödő környezetvédelmi előírások miatt keresni fogják a kutatók a kőolaj kiváltására alkalmas alternatívákat, amely problémára adott egyik válasz a mikroalgák által megtermelt olaj lesz.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] OREGON STATE UNIVERSITY: Generations of Biofuels. Oregon State University honlapja, http://agsci.oregonstate.edu/sites/agsci.oregonstate.edu/files/bioenergy/generations-of-biofuels-v1.3.pdf (2017. 02. 08.)

[2] ARO, EM.: From first generation biofuels to advanced solar biofuels. Ambio, 45 1 (2016), 24-31. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4678123/ (2017. 02. 20.)

[3] Alga. BioLets. http://www.biolets.com/images/slide3.jpg (2017. 03. 10.)

[4] Mikroalga. Febico. http://www.febico.com/en/health-library/What-is-Microalgae/FL-1-Microalgae.html (2017.03.14.)

[5] CHISTI, Y.: Biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, 25 3 (2007), 294-306, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975007000262 (2007. 01. 23.)

[6] GRAMLING, C.: As Green As It Gets: Algae Biofuels. EARTH The Science Behind The Headlines, (February 13, 2009.), https://www.earthmagazine.org/article/green-it-gets-algae-biofuels (2017. 02. 07.)

[7] Earthrise Nutritional. Algae Industry Magazine. http://www.algaeindustrymagazine.com/wp-content/uploads/Earthrise-Aerial.jpg (2017. 03. 14.)

[8] Biocoil Fotobioreactor. Advanced Biology. http://advbio.cascadeschools.org/94-95/biocoil.html (2017. 03. 10.)

[9] Algae-biodiesel. Bioenergy: Refueling the Future. http://refuelingthefuture.yolasite.com/resources/algae-biodiesel.jpg (2017. 02. 16.)

[10] BARTHOLY J., BREUER H., PIECZKA I., PONGRÁCZ R., RADICS K.: Megújuló energiaforrások. ELTE TTK FFI Meteorológiai Tanszék, (2013), 78. http://ttktamop.elte.hu/sites/ttktamop.elte.hu/files/tananyagok/megujulo_energiaforrasok.pdf (2017. 03. 10.)

[11] Sapphire Energy vállalat honlapja, http://www.sapphireenergy.com/

[12] Solazyme vállalat honlapja, http://solazymeindustrials.com/

[13] Algae.Tec vállalat honlapja, http://algaetec.com.au/

[14] AlgaEnergy vállalat honlapja, http://www.algaenergy.es/en/

[15] Cellana vállalat honlapja, http://cellana.com/

[16] Agrároldal honlapja, http://www.agraroldal.hu/mamutszivattyu-kifejezes.html

POTENTIAL USES OF MICROALGAE IN PRODUCTION OF BIODIESEL FUELS

One third of total energy consumption is shared by land, air and sea transportation, thus several important issues have to be taken into consideration, which are influenced by the use of fossil fuels. Their use causes increasing environmental pollution, besides that, operating costs permanently increase as the price of crude oil increases. Considering these two factors it is worth identify alternative options capable of replacing fuels currently in use, which are, renewable, carbon dioxide-neutral and environmental-friendly. Among alternative fuels one solution can be the use of biofuels, which can be produced from various kinds of biomass, like photosynthetic microorganisms, that is, algae. Oil produced by them may be the appropriate source material for producing biodiesel, moreover, for this process the carbon dioxide from the atmosphere is used.

Keywords: *alternative fuel, fossil fuels, biofuels, biodiesel fuels, microalgae, Green Crude,*

Fehér Krisztina egyetemi tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék rozovicsne.feher.krisztina@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5057-733X	Fehér Krisztina Assistant lecturer National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine rozovicsne.feher.krisztina@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5057-733X
Dr. Óvári Gyula egyetemi tanár Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék ovari.gyula@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-8604-5861	Dr. Óvári Gyula Professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft and Engine ovari.gyula@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-8604-5861

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE" című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „AVIATION_FUEL" nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-11-0402_Feher_Krisztina-Ovari_Gyula.pdf

Számel Bence Domonkos, Szabó Géza

FORGALOM-ELŐREJELZŐ MODUL FEJLESZTÉSE SZEKTORKONFIGURÁCIÓ TERVEZŐ DÖNTÉSTÁMOGATÓ ESZKÖZHÖZ

A légiforgalmi irányítási rendszerekben az irányítói munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfigurációval kapcsolatos döntéseket a supervisorok meghatározott szabályrendszer alapján, de azon belül elsősorban saját tapasztalataikra és képességeikre hagyatkozva hozzák meg. Biztonsági és hatékonysági megfontolások is indokolnák, hogy ezen döntési folyamatot automatizált eszközzel támogassuk, amely képes javaslatot tenni az optimális szektorkonfigurációra. Egy ilyen eszköznek szimulálnia kell az "ideális" supervisor döntési folyamatának minden lépését, köztük a közeljövőben várható légiforgalmi helyzet előrejelzését. Ebben a munkában áttekintjük egy döntéstámogató eszköz funkcionális modelljét és bemutatjuk, milyen funkciókat kell az eszköz forgalom előrejelző moduljának megvalósítania és milyen algoritmusok alapján történhet mindez. Ennek során a légijármű pozíciók egyszerű előrevetítése mellett figyelembe vesszük a korlátozott légtértartományok kerülését és az esetleges irányítói beavatkozást szimuláló funkciók szükségességét is.

Kulcsszavak: *légiforgalmi irányítás, döntéstámogatás, forgalom előrejelzés, szimuláció, konfliktus feloldás*

1. BEVEZETÉS

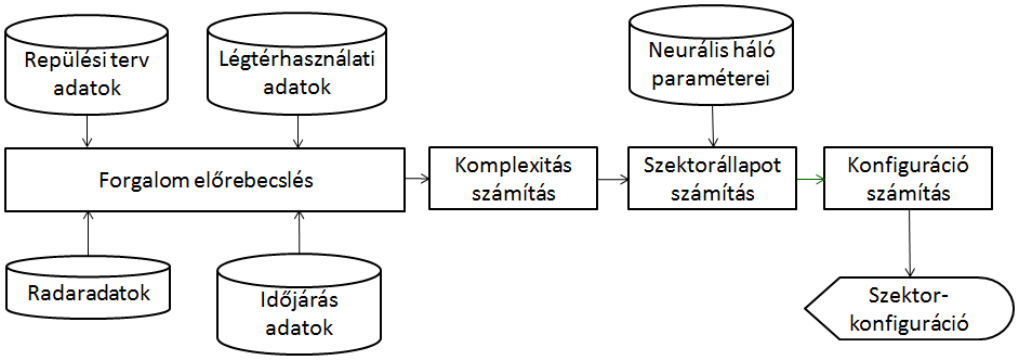
A légiforgalmi irányítási rendszerrel szemben alapvető elvárás, hogy a lehető legnagyobb mértékben járuljon hozzá a kereskedelmi légi forgalom biztonságához. Ahhoz, hogy ennek az elvárásnak eleget tegyen, a rendszernek biztosítania kell, hogy minimális legyen a bekövetkezési valószínűsége a légiforgalmi irányítók hibáinak, amelyek közvetlenül vagy közvetetten biztonsági veszélyeztetések (pl. elkülönítési minimum sérülése) vagy balesetek kialakulásához vezethetnek. A biztonságkritikus rendszereket kezelő operátorok, így a légiforgalmi irányítók teljesítményét is (ami magában foglalja a hibázás valószínűségét is) számos viselkedést befolyásoló tényező alakítja [1], amelyek között megtalálható a munkaterhelés is [2]. Egy irányító munkaterhelését nagymértékben befolyásolja az, hogy a felelőssége alá tartozó légiforgalmi irányítási szektorban hány légijármű tartózkodik és hogy a kezelendő forgalmi szituáció mennyire komplex, azaz mennyire igényel az irányítása fokozott figyelmet és összetett döntéseket az irányítótól. Egyes kutatások (pl. [3], [4]) alapján feltételezhetjük, hogy ha a komplexitást különböző számszerű tényezők segítségével le tudjuk írni, akkor ezen tényezők értékei alapján a megfelelő függvények használatával lehetséges becslést adni a munkaterhelésre, amit egy adott szektorban egy adott forgalmi szituáció elő fog idézni. Más szóval ezen számítások segítségével megállapítható, hogy szükség van-e az adott szektor további szektorokra történő bontására vagy összevonására más szektorral.

A szektorok osztásával vagy összevonásával (azaz az aktuális szektorkonfiguráció megváltoztatásával) kapcsolatos döntéseket a légiforgalmi irányítók munkáját koordináló supervisor feladata meghozni. Napjaink légiforgalmi irányítási rendszereiben a döntést a supervisor saját problémamegoldó képessége és tapasztalata alapján hozza meg úgy, hogy csak minimális funkcionalitású (például csak a szektorokban tartózkodó légijárművek számát figyelembe vevő) sza-

bályrendszer vagy automatizált segédeszköz áll a rendelkezésére. Emiatt előfordulhat – különösen a megszokottól eltérő forgalmi szituációk jelenlétében – hogy a supervisor nem a munkaterhelés (és ezáltal a biztonság) szempontjából optimális döntést hozza vagy éppen ennek ellenkezőjét teszi, azaz túl nagy mértékben téved a döntés során a biztonság irányába és több irányítót rendel a forgalom kezelésére, mint amennyi minimálisan szükséges lenne, ezzel csökkentve a rendszer hatékonyságát. Ezen problémák elkerülése érdekében érdemes lenne olyan automatizált döntéstámogató eszközt létrehozni, amely a forgalmi szituációk komplexitása alapján kiszámítja az egyes szektorokban várható munkaterhelést és javaslatot tesz a supervisornak a különböző szektorok állapotára, azaz a szektorkonfigurációra.

A felvázolt eszköznek működése során a supervisor gondolkodásmódját kell tükröznie. Emiatt figyelembe kell venni egyebek mellett, hogy a szektorkonfiguráció bármilyen jellegű változtatása előtt szükség van bizonyos időre (jellemzően 10–20 percre), hogy az érintett irányítók megismerhessék az új szektoruk forgalmát, az újonnan beosztott irányítók pedig elfoglalhassák munkaállomásukat. Ennek megfelelően a szektorkonfigurációt a supervisor nem az adott pillanatban fennálló, hanem a 10–20 perccel később várható forgalmi szituációra vonatkozóan határozza meg. Más szóval a szektorkonfiguráció előállításának első lépése egyfajta előrejelzés készítése a forgalomra vonatkozóan az aktuális forgalmi helyzet alapján a szektorkonfiguráció változtatása szempontjából releváns időpontra, vagyis a döntéstámogató eszköz egyik moduljának a forgalom előrebecslésével kell foglalkoznia. Cikkünkben ennek a forgalom előrejelző modulnak a működését mutatjuk be.

2. A FORGALOM ELŐREJELZŐ MODUL RENDELTETÉSE



1. ábra A munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfiguráció becslésére szolgáló automatizált eszköz felépítése

Az 1. ábra olyan automatizált döntéstámogató eszköz felépítését szemlélteti, amely képes az aktuális légiforgalomra és a légtérre vonatkozó adatokból kiindulva becslést készíteni az irányítói munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfigurációra (az eszköz esetünkben ehhez neurális hálót használ). Az eszköz működésének alapját a supervisorok szektorkonfigurációval kapcsolatos döntéshozási folyamata képezi, amely a következő fő lépésekből áll:

- a forgalom előrebecslése a szektorkonfiguráció érvényességének időpontjára (a továbbiakban t_p) vonatkozóan;
- a forgalom komplexitásának becslése az egyes szektorokban;

- a munkaterhelés és ezzel szoros összefüggésben az optimális szektorállapot (osztott, összevont vagy önállóan használt) becslése az egyes szektorokra;
- az optimális szektorállapotokat megvalósító szektorkonfiguráció tervezése.

Ennek megfelelően az eszköz különböző, egymásra épülő moduljainak célja a felsorolt döntési lépéseket modellező funkciók végrehajtása. A lépések végrehajtása során a supervisor a műszaki rendszerektől érkező adatokra (pl. radar- és repülési terv adatok, légtérszerkezetre vonatkozó adatok), különféle eljárásokra (pl. konfliktus feloldására vagy zivatarkerülésre vonatkozó eljárások) és saját tudására (pl. milyen forgalmi jellemzők hatnak a munkaterhelésre és milyen mértékben) támaszkodik. A döntés megfelelő szimulációjának érdekében tehát az automatizált eszköz számára is elérhetővé kell tenni ezeket az információkat. Ennek megvalósítása részben azáltal történik, hogy biztosítjuk az eszköz számára a hozzáférést a radar-, repülési terv- és légtéradatokat tartalmazó adatbázishoz, részben pedig azzal, hogy a különböző modulok által használt algoritmusokat a megfelelő paraméterekkel, ezeket pedig a megfelelő értékekkel látjuk el. Utóbbi jelentheti többek között a komplexitási tényezőnek tekintett forgalmi jellemzők kiválasztását (a supervisor komplexitási tényezőkre vonatkozó preferenciáinak modellezése), a komplexitási tényezőkből szektorállapotokat előállító neurális háló tanítását (a komplexitás és munkaterhelés közti kapcsolat feltárásának modellezése) vagy a korlátozott légtértartományok- és konfliktusok kerülése miatti módosított útvonalak előállítására szolgáló módszer meghatározását (forgalom előrejelzésének modellezése).

Az eszköz működésének és rendeltetésének részletesebb bemutatása [5]-ben olvasható, az pedig az itt ismertetettek alapján is látható, hogy bár az eszköz logikájának középpontjában a komplexitás és a várható munkaterhelés számítása áll, ez nem hajtható végre a forgalom előrejelzésére szolgáló modul nélkül. Az előrejelző modul feladata a ténylegesen megvalósuló forgalmi helyzetek radar-, repülési terv- és légtér-korlátozási adataiból kiindulva, a különböző előírások és gyakorlati szokások alapján meghatározott paraméterértékeket felhasználva előállítani azt a forgalmi szituációt (vagyis szimulált radaradat-halmazt), amely a t_p időpillanatban várhatóan fenn fog állni, és amelyre elvégezhetőek a különféle komplexitási számítások. Annak részleteiről, hogy ez hogyan valósulhat meg, a következő fejezetekben lesz szó.

3. ELŐREJELZETT SZITUÁCIÓK ELŐÁLLÍTÁSA

Mivel a modul feladata a supervisor által végzett forgalmi helyzet előrejelzés szimulációja, ezért működésének tervezése során a supervisor döntési folyamatát érdemes alapul venni. Ez a döntési folyamat magában foglalja a légijárművek közeljövőben várható pozíciójának, se-bességének és repülési szintjének megállapítását, valamint az így előállított feltételezett for-galmi szituáció validálását. Utóbbi annak vizsgálatát jelenti, hogy a feltételezett forgalmi helyzet megvalósulhat-e a légiforgalmi irányítás hibája nélkül, azaz nem tartalmaz-e elkülöní-tési minimum sérülést vagy konfliktusban lévő légijárműpárt.

3.1. Adatok

A modul számára azoknak az adatoknak kell rendelkezésre állniuk, amelyeket a supervisor is felhasználhat a felvázolt döntési folyamat során. Ezek az adatok az alábbi három adathalmaz valamelyikébe tartozhatnak:

1. radaradatok;
2. repülési terv adatok;
3. légtér korlátozási adatok.

A radaradatok a jármű aktuális földrajzi helyzetéről (x, y), sebességvektoráról (v_x, v_y) és repülési szintjéről (FL) adnak információt. Mivel a légijármű jövőbeli viselkedésével kapcsolatban nem hordoznak információt, ezért a jármű várható tulajdonságainak becslésére csak korlátozottan (legfeljebb 1-2 perces időtávra vonatkozóan) lehet őket megbízhatóan használni. A radaradatok ugyanakkor rendelkeznek azzal az előnnyel, hogy minden légijárműhöz rendelkezésre állnak, amelyet a radar észlelt, így ezek alapján bármely légijárművel kapcsolatban elvégezhető a becslés.

A repülési terv adatok a légijármű által tervezetten érintett útvonalpontok ($W_1..W_n$) földrajzi koordinátáit (x_{Wi}, y_{Wi}) tartalmazzák az adott pont elérésének várható időpontjával (t_{Wi}), valamint az elérésekor érvényes sebességgel (v_{Wi}) és repülési szinttel (FL_{Wi}) együtt. A légijárművekkel kapcsolatban feltételezhető, hogy általános esetben – vagyis ha nem kapnak ezzel ellentétes utasítást az irányítástól – a repülési tervben megadott útvonalat követik. Ennek megfelelően a repülési terv adatok alapján lényegesen pontosabb becslés készíthető a járművek jövőben várható tulajdonságaira vonatkozóan. Ezek az adatok ugyanakkor csak azokhoz a légijárművekhez kapcsolódóan állnak rendelkezésre, amelyeket sikerült tervezett járatként azonosítani és ez alapján repülési tervet rendelni hozzájuk.

A légtér korlátozási adatok halmaza a légtér azon tartományaival kapcsolatban tartalmaz adatokat, amelyek a forgalom előrejelzése szempontjából releváns légijárművek által várhatóan nem lesznek használhatóak. A korlátozott légtértartományokra vonatkozó adatok leírják a tartomány földrajzi elhelyezkedését (vagyis a határát meghatározó pontok koordinátáit) és magassági kiterjedését (azaz az alsó és felső határához tartozó repülési szintet). Az adatok emellett arról is hordoznak információt, hogy tervezett korlátozásról (valamely szabványos TRA[1] használatáról) vagy időjárás miatti „korlátozásról", azaz zivatartevékenység miatt használhatatlan légtértartományról van-e szó. Utóbbi információra azért van szükség, mert a korlátozott tartomány kerülésének folyamata, és ennek következtében annak szimulációja a kétféle esetben különböző módon mehet végbe.

3.2. Forgalom becslése korlátozások nélkül

A supervisor az előző alfejezetben bemutatott adatokat használhatja fel a közeljövőben várható forgalomra vonatkozó mentális kép megalkotásához. Mivel a repülési terv adatok pontosabb becslést tesznek lehetővé, ezért, ha rendelkezésre állnak, ezek alapján történik a várható pozíció (és más jellemzők) becslése, a radaradatok alapján történő becslést pedig azokra a járművekre használják, amelyekre csak ezek elérhetőek. Ehhez kapcsolódóan fontos megje-gyezni, hogy a gyakorlatban előfordul, hogy nagyobb számú légijármű jelenlétében a supervisor néhány azonosított légijárműre vonatkozóan is radaradatok alapján végzi a becslést, mivel az összes repülési terv egyidejű figyelembe vétele túl összetett feladat lenne. A tervezett automatizált forga-

[1] Temporary Restricted Airspace, Időszakosan korlátozott légtér

lombecslő eszköz számára ugyanakkor mindez várhatóan nem jelent problémát, ezért a szimuláció során minden repülési tervvel rendelkező légijárműre vonatkozóan a repülési terv alapján végezzük a becslést.

A forgalom előrejelzését végző modul bemenetét minden esetben egy ténylegesen megvalósuló (vagy annak tekintett) légiforgalmi szituáció adatai adják. Ez a szituáció áll fenn az előrejelzés elvégzésének időpontjában (t_0). A szituációban jelen lévő repülőgépek egy része azonosított (rendelhető hozzá repülési terv), a többi pedig azonosítatlan. Előbbi halmazba azon repülőgépek többsége sorolható, amelyek az adott (jellegzetes felhasználási esetben a budapesti) ATC központ felelőssége alá eső légtérben tartózkodnak, azt elhagyták vagy abba rövidesen (kb. 10 percnél rövidebb időn belül) belépnek. Az azonosítatlan légijárművek általában olyan repülőgépek, amelyek közelednek a légtérhez, de túl távol vannak tőle ahhoz, hogy az erre szolgáló automatizált eszköz repülési tervet tudjon rendelni hozzájuk. Ugyanakkor lehetséges, hogy az előrejelzés időtávlatán (amely 15 vagy 20 perc is lehet) belül belépnek a légtérbe, ezért ezeket is figyelembe kell venni az előrejelzés során.

Az előrejelzés során a szituációban részt vevő összes repülőgéphez kapcsolódóan végre kell hajtani a megfelelő előrejelző funkciót egy meghatározott jövőbeni időpontra (t_p) vonatkozóan. Ennek első lépése minden repülőgép esetében annak eldöntése, hogy azonosított vagy azonosítatlan repülőgépről van-e szó, a további lépések pedig ennek eredményétől függnek. Ha a légijármű azonosítatlan, akkor az előrejelzés csak radaradatok alapján történhet, annak feltételezése mellett, hogy a légijármű az aktuális sebességvektorát és repülési szintjét nem fogja megváltoztatni. Ebben az esetben az előrejelzés a pozíció egyszerű extrapolációja a t_0 időpontban érvényes pozícióból ($x(t_0)$, $y(t_0)$)kiindulva a sebességvektor és a becslés időtávja ($t_p - t_0$) alapján (2. ábra):

$$\begin{aligned} x(t_p) &= x(t_0) + (t_p - t_0)v_x \\ y(t_p) &= y(t_0) + (t_p - t_0)v_y \end{aligned} \tag{1}$$

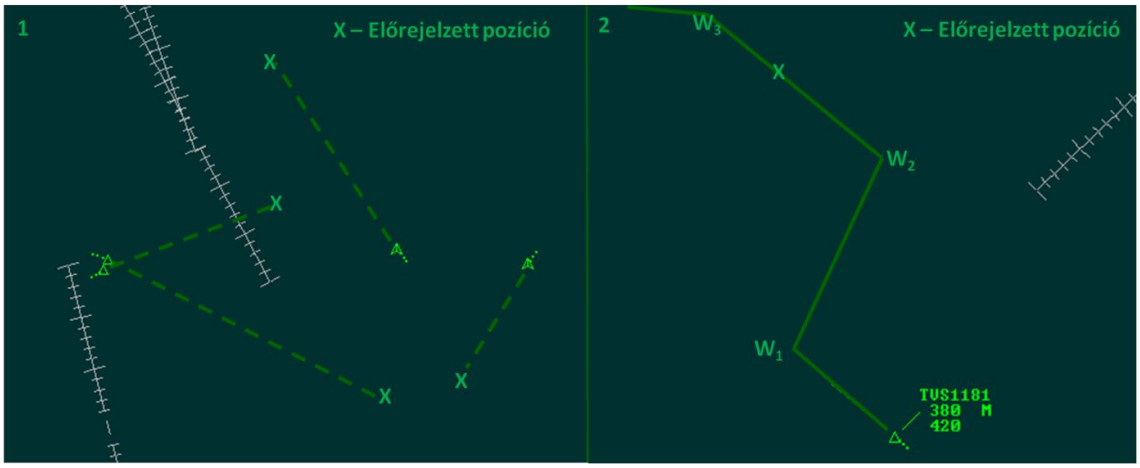
Az azonosított légijárművek esetében az előrejelzés a repülési terv adatok alapján történik. Az előrejelzés első lépése ilyenkor annak megállapítása, hogy melyik az utolsó útvonalpont, amelyet az előre jelzett időpontban (t_p) a repülőgép elhagy, azaz melyik Wi útvonalpontra teljesül a $t_{Wi} < t_p < t_{Wi+1}$ feltétel. Ezt követően el kell végezni a t_p időpontban érvényes földrajzi pozíció interpolációját a W_i és W_{i+1} útvonalpont között a W_i pontban mérhető sebességet (v_{Wi}) alapul véve (2. ábra):

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{y_{W_{i+1}} - y_{W_i}}{x_{W_{i+1}} - x_{W_i}} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} x(t_p) &= x_{W_i} + (t_p - t_{W_i})v_{W_i}\cos\varphi \\ y(t_p) &= y_{W_i} + (t_p - t_{W_i})v_{W_i}\sin\varphi \end{aligned} \tag{3}$$

Mivel a sebesség és a repülési szint jelentős változásai (és a földrajzi pozíció, ahol ezek megtörténnek) önálló bejegyzésként szerepelnek a repülési terv adatokban, ezért a t_p időpontban érvényes sebesség és repülési szint meg fog egyezni a W_i ponthoz tartozó sebességgel és repülési szinttel. A repülési terv- és radaradatok alapján a fenti funkciók valamelyikének használatával tehát előállítható a t_p időpontban várhatóan megvalósuló forgalmi szituáció olyan esetek-

ben, amikor a légtér egyes részei nem korlátozottak. Figyelembe kell azonban venni az előrejelzés szimulációja során, hogy a gyakorlatban utóbbi feltétel nem mindig teljesül – ezzel foglalkozunk a következő alfejezetben.



2. ábra Várható pozíció előrejelzése radaradatok (1) és repülési terv adatok (2) alapján

3.3. Légtérkorlátozások kezelése

Ahogyan a 3.1. alfejezetben is szó volt róla, előfordulhat, hogy a légtér egyes részei tervezett korlátozás vagy zivatartevékenység miatt nem használhatóak. Természetesen az előre jelzett forgalmi szituációra vonatkozóan nem megengedhető sem az, hogy egy légijármű várható pozíciója korlátozott tartományba essen, sem az, hogy a várható pozíció meghatározásakor feltételezett útvonal korlátozott tartományt érintsen. Emiatt a 3.2-ben bemutatott előrejelző funkciók korlátozások esetén nem minden légijárműre használhatóak.

Ha vannak korlátozott tartományok a légtérben, akkor mind az azonosítatlan, mind az azonosított légijárművek feltételezett útvonalát módosítani kell és a módosított útvonalakra kell alkalmazni a várható pozíciót előrejelző funkciókat. A módosított útvonalak meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy a korlátozás tervezett vagy az időjárás miatt alakult ki. Aszerint, hogy a légijármű azonosított vagy azonosítatlan és hogy a korlátozás tervezett vagy időjárás miatti, négyféle esettel kell foglalkozni az előrejelzés modellezése során.

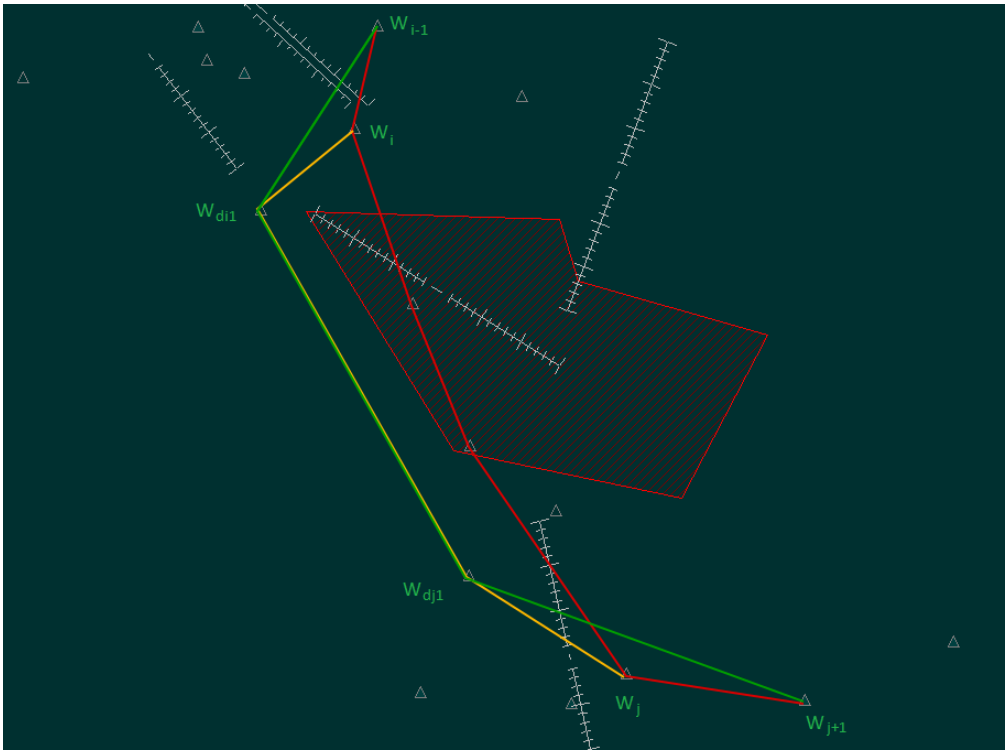
Azonosított légijárművek esetében nem jellemző, hogy a tervezett útvonal tervezetten korlátozott légteret érint, mivel a repülési tervek elkészítésekor általában figyelembe veszik a korlátozott légtértartományokat. Ugyanakkor teljesen nem is zárható ki a felvázolt eset megvalósulása, ezért figyelembe kell venni az előrejelzés modelljében. A tervezett korlátozás előnye az időjárás alapúval szemben a légiforgalmi irányítás szempontjából az, hogy a korlátozás időtartama és a korlátozott tartomány kiterjedése pontosan meghatározott, továbbá mindkettőről valós idejű információ áll rendelkezésre. Ennek köszönhetően lehetőség nyílik a tartomány elkerülésének korai megtervezésére úgy, hogy a kerülési útvonal szabványos jelentőpontok mentén haladjon. Ennek azért van jelentősége, mert szabványos pontok nélkül a légijármű irányításához folyamatos kiemelt figyelemre és rendszeres utasításokra lenne szükség a légiforgalmi irányítótól, ami hátrányosan hatna a munkaterhelésre és ezáltal a biztonságra.

A szimulált kerülés tehát azonosított légijárművek és tervezett korlátozások esetén szabványos útvonalpontok mentén történik. Az útvonal meghatározásához először meg kell keresni azt a szakaszt (vagy szakaszokat) a repülési terv által meghatározott útvonalon, amely keresztezi a korlátozott tartományt. Ha ez megtörtént, az első ilyen szakasz kezdőpontja (W_i) lesz az a pont, amelynél a légijármű elhagyja az eredetileg tervezett útvonalat (azaz megkezdi a kerülést) és az utolsó ilyen szakasz végpontja (W_j) lesz, ahol visszatér arra. Ezt követően meg kell keresni azt a szabványos pontot (W_{di1}), amely a W_i pontból indulva, egyenesen haladva a leg-rövidebb úton elérhető anélkül, hogy az útvonal keresztezné a korlátozott tartományt. Ehhez hasonlóan meg kell keresni azt a pontot is (W_{dj1}), amelyből indulva hasonló feltételek mellett a W_j pont a legrövidebb úton elérhető. Ha a [W_{di1}, W_{dj1}] szakasz nem keresztezi a korlátozott tartományt, akkor az első lehetséges kerülési útvonal a W_i, W_{di1}, W_{dj1}, és W_j pontok által meghatározott útvonal lesz. Ha a [W_{di1}, W_{dj1}] szakasz keresztezi a korlátozott tartományt, akkor a W_{di1} és W_{dj1} pontok megkeresésséhez használt algoritmust felhasználva, ezekből a pontokból kiindulva meg kell keresni a W_{di2} és W_{dj2} pontokat. A hasonló pontok keresését (mindig az előző két megtalált pontból kiindulva) addig kell folytatni, amíg nem találunk olyan pontpárt (W_{din} és W_{djn}), amelyeket összekötő szakasz már nem keresztezi a korlátozott tartományt. Ha ezeket a pontokat megtaláltuk az egyik lehetséges kerülési útvonal a W_i, W_{din}, W_{djn}, és W_j által meghatározott útvonal lesz (3. ábra).

Mivel – ahogyan korábban is utaltunk rá – tervezett korlátozás esetén az irányítás hamarabb tudja elkészíteni a kerülésre vonatkozó tervet, előfordulhat, hogy az útvonalpont, amelyiknél a kerülés elkezdődik, és amelyiknél véget ér, nem a korlátozott tartomány elérését megelőző utolsó-, illetve a tartomány elhagyását követő első pont. Ezek helyett kezdődhet a kerülés egy korábbi pontban (pl. W_{i-1}) vagy befejeződhet egy későbbi pontban (pl. W_{j+1}). Ezt a lehetőséget a szimuláció során úgy vesszük figyelembe, hogy feltételezzük, hogy az ezért felelős légiforgalmi irányító a kerülés végrehajttatása előtt fejben felvázol néhány lehetséges kerülési útvonalat különböző kiinduló- és végponttal, majd ezek közül kiválasztja azt, amelyik a legrövidebbnek tűnik. Más szavakkal a szimuláció során több lehetséges kerülési útvonal hosszát is kiszámítjuk, és azt használjuk közülük, amelyik hossza a legkisebb, azaz amelyik a leggyorsabb kerülést teszi lehetővé (mivel a kerülés során a sebességet állandónak tekintjük). A meghatározott útvonalpontokat és lehetséges kerülési útvonalakat egy adott szituációra a 3. ábra szemlélteti.

Ha egy azonosított légijárműnek időjárás miatt légteret kell elkerülnie, akkor a légiforgalmi irányítás máshogyan viselkedik, mint tervezett korlátozások esetében, ezért a szimuláció alapját képező modellben is máshogyan kell kezelni az ilyen eseteket. Az időjárás miatti kerülési útvonalak a légiforgalmi irányítók részéről nehezebben tervezhetőek előre, mivel a korlátozott tartomány elhelyezkedése folyamatosan változhat, ráadásul a tartomány jellemzőiről nem állnak rendelkezésre valós idejű adatok. Ezen felül – és részben éppen emiatt – az ilyen jellegű kerülést általában a légijárművek kezdeményezik azzal, hogy az irányítástól engedélyt kérnek a kerülésre, ami miatt még pontos adatok ismeretében is nehéz előrebecsülni, hogy a tervezett útvonal melyik pontján (D_{s0}) kezdődik (és melyik pontján (D_{f0}) fejeződik be) a kerülés. Ennek megfelelően az előrejelző eszköz algoritmusa nem előre definiált pontokat használ bizonyos meghatározott távolságra a korlátozott tartomány határától, hanem véletlenszerű pontokat egy meghatározott [d_{min}, d_{max}] távolságtartományon belül (4. ábra). A korlátozott tartomány határának (és ezzel szoros összefüggésben a D_{s0} pont lehetséges helyének) meghatározása során a [6]-ban is látható megközelítést használjuk, amely szerint a zivatargócokat a bizonytalanság kezelése és a biztonság érdekében

bizonyos távolságnál (amely a szimuláció során konfigurálható) jobban nem közelíthetik meg a légijárművek. Ebből következően a szimulációban a zivatargócok határoló vonalait azokkal párhuzamos, tőlük a megadott távolságra elhelyezkedő vonalakkal helyettesítjük.

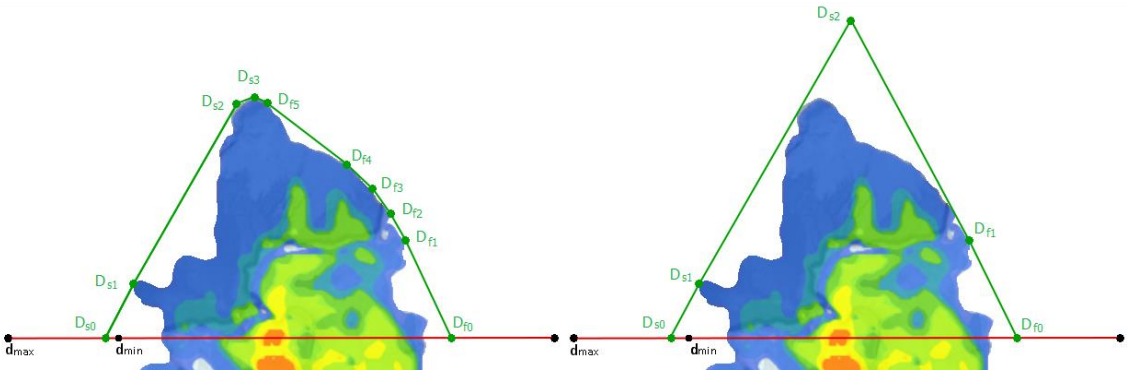


3. ábra Tervezetten korlátozott légtértartomány kerülésének lehetséges útvonalai

További eltérést jelent időjárás miatti korlátozás esetén, hogy a kerülési útvonal nem feltétlenül szabványos útvonalpontok mentén halad. Emiatt a kerülési modell megalkotásakor nem használható a korábban ismertetett, diszkrét pontok közötti választáson alapuló algoritmus sem. Ehelyett analitikus módszerrel kell megtalálni azt a kerülési utat, amelynek hossza minimális és a légiforgalmi irányítók által gyakorlatban követett eljárások alapján megvalósítható. Az ezen feltételeknek megfelelő útvonalak azok, amelyeknek az első szakasza és utolsó szakasza is pontosan egy pontban (D_{s1} és D_{f1}) érinti a korlátozott tartományt. Az ilyen útvonalak közül az lesz a lehetséges legrövidebb, amelyiknek az első szakasza a D_{s1} pontban ér véget, az utolsó szakasza a D_{f1} pontban kezdődik, a két pont között pedig a korlátozott tartomány kiterjedésétől függő számú további szakasz alkotja, amelyek mind pontosan egy pontban ($D_{s2}..D_{sn}$, $D_{f2}..D_{fm}$) érintik a tartományt szimbolizáló síkidomot vagy illeszkednek annak valamely oldalára. A hossz szempontjából optimális kerülési útvonal pontjait tehát olyan rekurzív algoritmus használatával kellene megkeresni, amely minden lépés során kicserél egy-egy pontot az adott pontból induló és a tartományt érintő félegyenes érintési pontjára addig, amíg nem talál újabb érintési pontokat (ekkor az utolsó szakaszok meghosszabbításának metszéspontja lesz az utolsó keresett pont) vagy egybeeső pontokat talál.

Figyelembe kell venni ugyanakkor, hogy az optimális kerülési útvonal modellezése nem egyszerű geometriai problémamegoldás. Nem szabad ugyanis megfeledkezni arról, hogy az útvonalat leíró pontok ($D_{s1}..D_{sn}$, $D_{f1}..D_{fm}$) valójában egy-egy légiforgalmi irányítói utasításnak (vagy engedélyadásnak) felelnek meg. Ebből következően minden változás a kerülési útvonal

irányában a korábbihoz képest további döntések meghozását igényli az irányító részéről és további kommunikációs tevékenységet eredményez az irányítás és a légijárművek között. Ha emellett azt is figyelembe vesszük, hogy a kerülést egy időben általában több repülőgépnek is végre kell hajtani, mondhatjuk, hogy a töréspontok számának növelése a kerülési útvonalon növeli a légiforgalmi irányítók (és a repülőgép-személyzetek) munkaterhelését, ezáltal növelve a hibázás valószínűségét és csökkentve a biztonságot. Mivel a kerülés biztonságos végrehajtása fontosabb, mint a kerülés miatti késés minimalizálása, ezért a kerülési útvonal modellezése során is fontosabb szempont a töréspontok számának alacsony szinten tartása, mint az útvonal teljes hosszának minimalizálása. Ennek megfelelően az előrejelzést végző eszköz kezdeti verziójában a kerülés szimulációja maximum három töréspont felhasználásával történik. A kétféle felvázolt módszerrel előállítható kerülési útvonalak a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra Időjárás miatt korlátozott légtértartomány kerülésének modellje tetszőleges számú- és legfeljebb három útvonalpont használatával (az ábra a modell működésének szemléltetésére szolgál – a valóságban a kerülés nem a zivatargócok fizikai határán, hanem attól távolabb, de azt követve megy végbe)

Fontos ugyanakkor szem előtt tartani, hogy a pontok számának ilyen mértékű behatárolása bizonyos szituációkban a valóságot rosszul közelítő szimulált kerülési utakat eredményezhet, amelyek megengedhetetlenül nagy késést jelentenének a kerülést végző járművek számára. Az ilyen esetek elkerülése érdekében az eszköz későbbi verzióiban érdemes lesz inkább egyfajta módosított algoritmust használni a minimális hosszúságú útvonal meghatározására, amely a szakaszok összesített hosszához minden új töréspont bevezetésekor hozzáadna egy meghatározott értéket (amelynek meghatározását gyakorló légiforgalmi irányítási szakemberekkel közösen kell majd elvégezni). A jelenlegi verzió további hiányossága lehet, hogy nem veszi figyelembe a zivatartevékenység dinamikus jellegét, vagyis azt, hogy az a kerülés ideje alatt akár meg is szűnhet. Emiatt, ha az eszköz verifikációja során az derül ki, hogy a jelenlegi algoritmusok alapján szimulált kerülési útvonalak nem közelítik elég jól a valóságban várható útvonalakat, akkor ezek helyett érdemes megfontolni olyan külső fejlesztésű modellek alkalmazását, mint a [7]-ben ismertetett geometriai modell.

Ha a kerülést azonosítatlan légijárművekre vonatkozóan kell szimulálni, akkor nem használhatóak a repülési terv alapján előálló útvonalszakaszok a kerülés lehetséges kezdő- és vég-pontjának meghatározásához. Ugyanakkor – más lehetőség nem lévén – tekinthetünk úgy a légijárművek aktuális haladási iránya által meghatározott egyenesre, mint a következő 10–20 percre vonatkozó repülési tervből vett útvonalra, visszavezetve ezzel a kerülés modellezésének problémáját a repülési tervvel rendelkező légijárművek esetére. Ennek megfelelően az időjárás miatt

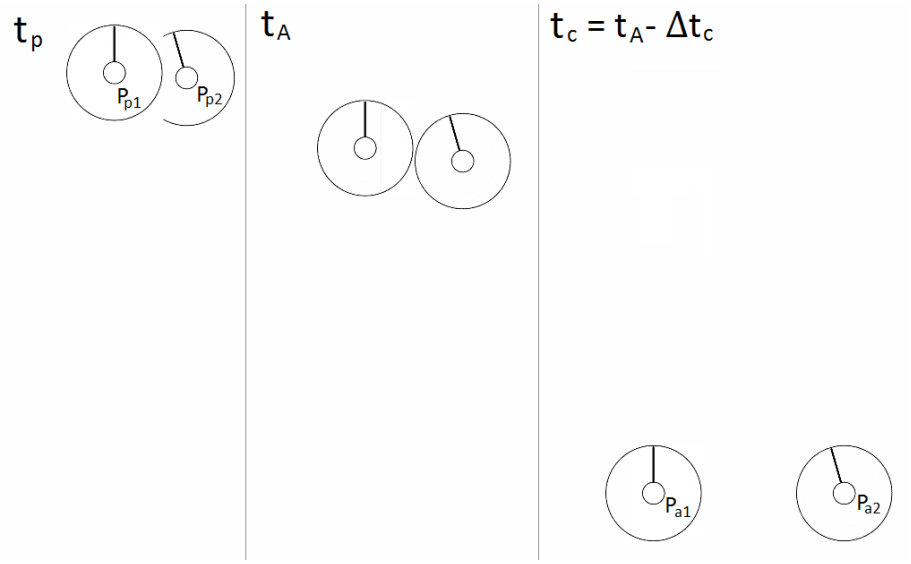
korlátozott légtértartományok kerülésének szimulációja az azonosított légijárművekkel kapcsolatban ismertetett módszerrel történik. Kissé más a helyzet akkor, ha tervezett korlátozásról van szó, mivel – ahogyan már szó volt róla – ilyen esetben a kerülést szabványos útvonalpontok mentén szimuláljuk, a radaradatokból előállított egyenes útvonal azonban nem biztos, hogy tartalmaz ilyeneket. Ilyen esetben tehát először meg kell vizsgálni, hogy az egyenes útvonalon található-e szabványos útvonalpont még a korlátozott tartományt keresztező szakasz előtt, illetve az után (mivel a légijárművek általában valamilyen szabványos pont irányába repülnek, ezért utóbbi ez esetek többségében várhatóan teljesülni fog). Ha vannak ilyen pontok, akkor a kerülés modellezésére az azonosított légijárművek esetében alkalmazott módszert használjuk, míg ha nincsenek, akkor a tervezetten korlátozott tartományt időjárás miatt korlátozott tartománynak tekintjük és az erre vonatkozó szimulációs módszert alkalmazzuk.

4. SZITUÁCIÓK VALIDÁLÁSA

Az előző fejezetben felvázolt algoritmusok és funkciók segítségével előállíthatóak az előre jelzett szituációk, ezek azonban nem biztos, hogy a gyakorlatban biztonságosan (az előírt elkülönítési minimum sérülése nélkül) megvalósíthatóak. Emiatt az előre jelzett szituációk véglegesítése előtt végre kell hajtani azokon egyfajta validáló funkciót, amely ellenőrzi, hogy az előállt szituációra teljesülnek-e az előírt biztonsági követelmények és korrigálja a szituációt, ha nem. Az ennek alapjául szolgáló algoritmus első lépése tehát az ellenőrzés, amely során az összes légijármű esetében ki kell választani a többi légijármű közül azokat, amelyek repülési szintje kevesebb, mint 10 egységgel tér el az adott járműétől, majd mindegyikre vonatkozóan meg kell vizsgálni, hogy a földrajzi pozícióik távolsága eléri-e az 5 NM-t. Ha utóbbi feltétel nem teljesül, akkor korrigálni kell a szituációt. A korrekció során a két, nem megfelelően elkülönített légijármű közül az egyiknek (amelyet az eszköz kezdeti verziójában véletlenszerűen választunk ki) módosítani kell a pozícióját úgy, hogy az elkülönítési feltételek teljesüljenek. Ennek végrehajtása során azt feltételezzük, hogy az irányítás már jóval az elkülönítési minimum sérülése előtt észrevette annak lehetőségét és elhárította a konfliktust. A korrekciós funkció végrehajtása tehát lényegében a konfliktusok elhárításának szimulációját jelenti.

A konfliktus elhárításának modellezése során két kérdésre kell megadni a választ. Az első kérdés, hogy mikor kezdi el az ezért felelős légiforgalmi irányító a konfliktus elhárítását. Ezzel kapcsolatban azzal a feltételezéssel élünk, hogy az irányító az STCA[2] eszköz jelzésének első pillanatában (t_A) vagy az ezt meg-előző rövid idősávban (Δt_c) észlelte a konfliktust és kiadta az elkerüléséhez szükséges első utasítást. Az, hogy a Δt_c időtartományon belül melyik tc időpontban következik be, a szimuláció során véletlenszerűen dől el (a bekövetkezés valószínűsége minden időpontban azonos), mivel a gyakorlatban a supervisor sem tudna ezzel kapcsolatban pontos előrejelzést adni. A konfliktus elhárítása tehát a t_c időpontban kezdődik, ezért az elhárítás szimulációjának első lépéseként el kell végezni az előrejelzést a két konfliktusban lévő légijármű pozíciójára (P_{a1} és P_{a2}) és ezeket kell a konfliktus elhárítása szempontjából aktuális pozícióként kezelni (5. ábra).

[2] Short Term Conflict Alert, Rövidtávú konfliktusjelzés



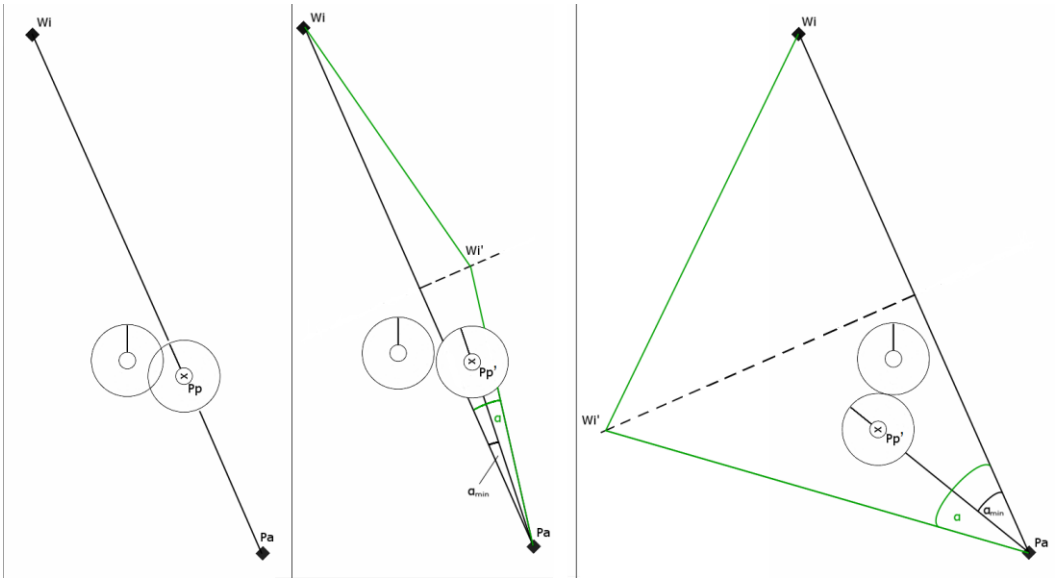
5. ábra Konfliktusban lévő légijárműpár pozíciója a szimuláció különböző időpontjaiban

A másik kérdés az, hogy milyen módszerrel hárítja el az irányító az észlelt konfliktust. A gyakorlatban a konfliktus megszűntetéséhez az irányítás a repülőgépek jellegzetes paraméterei, azaz a haladási irány, a sebesség nagysága és a repülési szint közül bármelyiket megváltoztathatja. Utóbbi két paraméter esetében a lehetséges értékek és az értékek változtatásának sebessége is nagyban függ a légijármű típusától, míg a haladási irány megváltoztatására bármely légijármű képes kell, hogy legyen. Mivel az eszköz kezdeti verziójában a légijárművek típusait nem vesszük figyelembe, ezért a konfliktus-elhárítás szimulációja során csak a haladási irány módosítását engedélyezzük. A haladási irány módosítása a szimulációhoz használt modellben a légijármű aktuális pozíciója (P_a) és következő útvonalpontja (W_i) közti szakasz helyettesítését jelenti két másik szakasszal, azaz egy új útvonalpont (W_i') beiktatásával (6. ábra). Ennek a módosított útvonalnak biztosítania kell, hogy megszűnjön a konfliktus a két adott légijármű között úgy, hogy az irányváltoztatásra utasított jármű a legkisebb időveszteséggel juthasson el a W_i pontra. Utóbbi akkor valósulhat meg, ha a W_i' pont a [P_a, W_i] szakasz felezőmerőlegesén helyezkedik el. Ebből következően a W_i' pont pontos helyének meghatározásához elegendő a konfliktus elkerüléséhez szükséges iránymódosítás szögét (α) kiszámítani. A szög szükséges értékére alsó becslés (α_{min}) adható azzal, hogy kiszámítjuk, mekkora szöggel kell minimálisan elforgatni a [P_a, P_p] szakaszt a P_a pont körül, hogy t_p időpontban ne álljon fenn az elkülönítési minimum sérülése ($d(P_n,P_m)$ a P_n és P_m pont távolságát jelöli, P_p' pedig a módosított útvonalon haladó légijármű várható pozícióját t_0-ban):

$$\alpha_{min} = \arccos \frac{d(P_a,P_p)^2 + d(P_a,P_p')^2 - d(P_p,P_p')^2}{2d(P_a,P_p)d(P_p,P_p')} \tag{4}$$

Mivel az így kiszámított szög szerinti iránymódosítás egyes esetekben (ha a két légijármű távolsága t_p időpontban nem növekszik) csak késlelteti az elkülönítés sérülését, de nem hárítja el, ezért a minimálisnál nagyobb szöget érdemes használni a forgatáshoz. Ezt a szimuláció során úgy oldjuk meg, hogy a minimális szögértéket szorozzuk egy konfigurálható, 1-nél nagyobb számértékkel (alapértelmezésben 2), amivel nem csak a fenti problémát küszöböljük ki, hanem azt is figyelembe vesszük, hogy a légiforgalmi irányítók biztonsági megfontolásból általában a

konfliktus elhárításához minimálisan szükségesnek ítéltnél nagyobb szöggel módosítják a haladási irányt. Mivel a légijármű haladási iránya két irányban is módosítható, ezért a szöget mindkét irányra ki kell számítani, majd meg kell vizsgálni, hogy a módosított útvonal teljes hossza melyik irány esetén lesz kisebb és a továbbiakban ezt az irányt kell figyelembe venni a szimuláció során. A konfliktus elhárításának modellezésére és szimulációjára szolgáló módszer működését a 6. ábra mutatja be.



6. ábra Konfliktusban lévő légijármű útvonalának módosítása

A felvázolt validáló funkció tényleges végrehajtása kétféle módszerrel történhet. Az első módszer esetében csak a t_p időpontra előre jelzett szituációra végezzük el az ellenőrzést és a korrekciót, míg a második módszerrel egy vagy több ezt megelőző szituációra is. Mivel az első módszerrel a funkciók csak egyszer hajtódnak végre, a szükséges számítások rövidebb idő alatt végezhetőek el, ami fontos követelmény egy olyan eszköz esetében, amelytől valós idejű információszolgáltatást várnak el. Ezzel a módszerrel ugyanakkor nem szűrhetőek ki az olyan esetek, amelyek során a t_p időpontra előre jelzett szituáció ugyan nem tartalmaz elkülönítés sérülést, a szituáció kialakulásához vezető szimulált folyamat során korábban azonban előfordult ilyen, vagyis nem teljesül az a feltétel, hogy az előre jelzett szituáció biztonságosan megvalósítható.

Megbízhatóbb eredményeket kaphatunk tehát, ha a validálást nem csak a végső előre jelzett szituációra végezzük el, hanem a kiindulási szituáció időpontjától (t_0) indulva állandó időközű (pl. 30 s vagy 60 s) lépésekkel haladva újabb és újabb előre jelzéseket végzünk és minden így előállt szituációra elvégezzük a validálást. Az újabb szituációk előre-jelzése során a légijárművek adataiban természetesen figyelembe vesszük a legutóbbi előre jelzett szituáció validálása során végrehajtott esetleges korrekciókat is. Látható tehát, hogy utóbbi módszer bár pontosabb, az erőforrásigénye lényegesen nagyobb. Ebből fakadóan azt, hogy az egylépéses vagy a többlépéses validációt alkalmazzuk (továbbá utóbbi esetében a lépések számát) az határozza meg, hogy az automatizált légiforgalmi irányítási rendszer, amelyben az eszközt használni tervezik milyen számítási kapacitással rendelkezik. Szempont lehet ennek eldöntésében továbbá az, hogy a többlépéses validáció használata mennyivel növeli az előrejelzés pontosságát, mert ha ez a növekedés elhanyagolható, nem kell a jóval költségesebb másik módszert használni. Az

ezzel kapcsolatos döntést – olyan további döntésekkel együtt, mint például a korábbi fejezetekben bemutatott különböző algoritmusok paramétereinek optimális értékei – nem kell feltétlenül a fejlesztés jelenlegi szakaszában meghozni, ha inkrementális fejlesztési folyamatot [8] alkalmazva elkészítjük az eszköz egy működőképes, de nem feltétlenül optimális verzióját, majd ezt folyamatosan validáljuk és frissítjük (lehetőség szerint a célrendszeren futtatva).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Mivel a munkaterhelés szempontjából optimális szektorkonfiguráció meghatározását mindig a jövőben várható forgalmi helyzetre vonatkozóan kell elvégezni, elengedhetetlen, hogy egy szektorkonfiguráció számításra szolgáló eszköz jövőbeni szituációk előrejelzésére. Az előrejelzést az aktuális forgalmi helyzet adatai alapján kell elvégezni, de figyelembe kell venni, hogy a légijárművek eredetileg tervezett útvonala módosulhat a légtér egyes tartományainak korlátozása miatt. Emellett – részben éppen a korlátozott tartományok kerülése miatt – előfordulhat, hogy a tervezett útvonalat követő légijárművek között nem megengedett értékre csökkenne az elkülönítés, amit az irányítás az esetek többségében megakadályoz újabb útvonal módosításokkal, ezt pedig a szimulációban is figyelembe kell venni.

Egy adott kezdeti forgalmi helyzetből kiindulva az előző fejezetekben felvázolt algoritmusok használatával sokféle különböző előre jelzett szituációkat állíthatunk elő annak köszönhetően, hogy az algoritmusok legtöbb paraméterének (például kerülési útvonal kezdőpontjának távolsága a korlátozott tartománytól, fordulás szöge konfliktus feloldásnál stb.) értéke változtatható. Fontos, hogy ezen szimulált szituációk közül ki tudjuk választani azokat, amelyek a legjobban közelítik a valóságban adott kezdeti feltételek mellett kialakuló szituációt. Ehhez meg kell találni a paraméterekhez a valóságot legjobban közelítő értékeket, ami történhet az eszköz által előre jelzett szituációk és a ténylegesen megvalósult (vagy szakemberek által gyakorlati ismeretek alapján előrebecsült) szituációk összehasonlításával, illetve szakemberek megkérdezésével a gyakorlatban jellemző értékekről vagy arról, hogy egy-egy előre jelzett szituáció mennyire valósághű. Utóbbi módszerhez szükség lehet arra, hogy az előre jelzett szituációkat vizuálisan bemutathassuk a megkérdezetteknek, amihez – bár a végső felhasználás során nem lesz rá szükség – érdemes az előrejelző eszközt a szituációk grafikus megjelenítésére is alkalmassá tenni. Az eszköz fejlesztésének következő szakaszában tehát a paraméterek konfigurálásával és ehhez kapcsolódóan a megjelenítő funkció létrehozásával foglalkozunk.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Blackman, H.S., Gertman, D.I., Boring, R.L.: Human Error Quantification Using Performance Shaping Factors in the SPAR-H Method, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2008 Annual Meeting (2008)

[2] Strenzke, R., Schulte, A.: Modeling the Human Operator's Cognitive Process to Enable Assistant System Deci-sions, Proceedings of the 21st International Conference on Automated Planning and Scheduling (2011)

[3] Gianazza, D., Guittet, K.: Evaluation of air traffic com-plexity metrics using neural networks and sector status, Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Air Transportation, ICRAT 2006 (2006)

[4] Song, L., Wanke, C., Greenbaum, D.: Predicting Sector Capacity for TFM, Proceedings of the Seventh USA/Europe ATM R&D Seminar (2007)

[5] Számel Bence, Szabó Géza: Air Traffic Control Workload Parameters and their Application for Sector Configuration Advisory Tool, Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, (2015)

[6] Tian, Y., Wan, L., Chen, C. és Yang, Y.: Safety assessment method of performance-based navigation airspace planning. Journal of Traffic and Transportation Engineering (2015)

[7] Yoon, Y., Hansen, M., Ball, M. O.: Optimal route decision with a geometric ground-airborne hybrid model under weather uncertainty, Transportation Research Part E 48, 34-49. (2012)
[8] Schuster György, Terpecz Gábor: Inkrementális fejlesztés és tesztelés biztonságkritikus rendszerek esetén, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2014/2, pp. 467–473.

DEVELOPMENT OF THE TRAFFIC PREDICTION MODULE OF A DECISION SUPPORT TOOL FOR SECTOR CONFIGURATION PLANNING

In an Air Traffic Control system, the decision about the sector configuration that results in an optimal level of controller workloads made by the supervisor based on his personal skills and experience. However, for safety and efficiency reasons make it advisable to support this decision process by an automated tool which is able to provide suggestions about the optimal sector configuration. Such a tool is required to simulate every step of the supervisor's decision process, including the prediction of the traffic situation expected to occur in the near future. In this paper, we present the functions that need to be implemented by the traffic prediction module of the decision support tool as well as the algorithms that make these functions work. Besides presenting the simple projection of aircraft position, simulation of the avoidance of restricted airspace segments or the actions of air traffic controllers will also be considered.

Keywords: *Air Traffic Control, decision support, traffic prediction, simulation, resolving conflict*

Számel Bence Domonkos (MSc) PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék szamel.bence@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-2844-184X	Számel Bence Domonkos (MSc) PhD student Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Control for Transportation and Vehicle Systems szamel.bence@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-2844-184X
Dr. Szabó Géza, PhD egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék szabo.geza@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-5956-0868	Dr. Szabó Géza, PhD Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Control for Transportation and Vehicle Systems szabo.geza@mail.bme.hu orcid.org/0000-0002-5956-0868

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-12-0395_Szamel_Bence-Szabo_Geza.pdf

Bakos Róbertné, Kóródi Márta, Mondok Anita, Szabó Attila

A POLGÁRI LÉGIJÁRATOK MŰSZAKI SPECIFIKÁCIÓJÁNAK SZEREPE AZ UTAZÁSI DÖNTÉSEKBEN

A légitársaságok utasforgalmi kommunikációjának markáns elemei között emelhetők ki a repült viszonylatok, a szállított utasok, a flotta mennyiségi és minőségi összetétele, új géptípusok vásárlása, menetrendbe állítása, a környezeti hatások mérséklése, a biztonsági paraméterek, a differenciált szolgáltatások a különböző utasosztályokon és utasszegmensek részére. Ez a kínálati változatosság, egyes viszonylatokban a választék szélessége és a repülőjegy keresés találati listáján megjelenő árspektrum alapján visszatérően felveti a kérdést, hogy milyen attitűdök alapján választ az utas repülőjegyet, döntését mennyiben befolyásolják a kommunikált és tényleges műszaki paraméterek. A döntés elemei egyrészt korlátosak a találati rangsorok elsődlegesen megadott szempontjai miatt, de további információk szerezhetők, különös tekintettel a géptípusok és a légitársaságok által, a gép műszaki paraméterei, berendezettsége és az ezek alapján nyújtható szolgáltatásokra és az utazási élményre vonatkozóan. A szervezett polgári repülés műszaki háttere, a kommunikáció és a repülési élmény közötti összefüggéseket feltáró tanulmány a szekunder információk alapján készített összefoglalót a járatválasztásról felmért primer adatok elemzésével kiegészítve tesz megállapításokat a légiutazásra vonatkozó döntésekről.

Kulcsszavak: *turizmus, légiközlekedés, utazási döntés, járatválasztás, preferenciák, fenntarthatóság*

BEVEZETÉS

A Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség (International Air Transport Association –IATA) közleményei szerint az utóbbi években olyan gyors ütemű és jelentős változások következtek be a szervezett polgári légiutaztatásban, amelyeket nemcsak figyelembe kell venniük a légiforgalmi szolgáltatóknak, hanem proaktív alkalmazkodásra kényszerülnek versenypozíciójuk megőrzése, megerősítése, vagy javítása érdekében. A légijáratok menedzselésében a piaci teljesítményen túl négy tényező került előtérbe, az üzemeltetés biztonsága, az utas-, vagyon- és járatbiztonság, a fenntarthatóság és az együttműködés, melyek közül a középső három közvetlen műszaki vetülettel is bír [1]. A szervezett személyforgalom esetében az utazási döntés folyamatában a szolgáltatás értékébe beépülve jelennek meg a tényezők, vagyis az utas a jegyár formájában komplexen szembesül az öt problémával. Az utas döntési szempontjai és a járatok háttértényezői sajátosságainak feltárását célozva, a járatválasztási preferenciák műszaki hátterének beazonosításával és egy járatválasztási felmérés eredményeinek összegzésével kerül javaslattétel a probléma megoldására.

Az elektronikus jegyvásárlás elterjedésével és gyors ütemű növekedésével az utazási döntés előtt állók lehetősége is megnövekedett járatinformációk összegyűjtésére, nemcsak az indulás és érkezés időpontja tekintetében, de a légitársaságok, illetve a konkrét járat szolgáltatásaira vonatkozóan is. Az ár az utazási döntésnél jelentős szerepet játszik, ugyanakkor csak kevés légitársaság népszerűsíti kizárólag az alacsony árait, más előnyt is megemlít a kommunikációban [2]. A járatválasztás lehetősége a hagyományos és az online utazási irodák számára még kiterjedtebb, több GDS (Global Distribution System) számos variációt kínáló menetrendi bázisában kereshetnek. A jegyértékesítésben tehát a koncentráció a jellemző, ami az utas számára az összehasonlítás lehetőségét nyújtva áron kívüli előnyöket jelenthetne, de a foglalásnál megjelenő információk köre korlátozott. Vagyis úgy várják el az utastól, és az utas is úgy várja el

magától az optimális döntést, hogy nincs a teljes informáltság állapotában, szervezési, üzemeltetési, vagy gazdálkodási okokból hiányos információk melletti döntésre kényszerítik. Mindeközben az utazási tapasztalatok bővülésével az utasok megismerik a gépek felszereltségét, igénylik a választási lehetőségeket, másrészt a légitársaságok megkülönböztető stratégiájának részévé válik, hogy az egyediséget, a felszereltséget és szolgáltatásokat kommunikálja, ami a felkínált variációkkal a választást ismét a középpontba állítja.

A járatválasztási döntéseket egy sajátos, műszaki szempontból is vizsgáló tanulmány szakirodalmat feldolgozó része a tényezők jellegzetességeit, a járatválasztási fogyasztói magatartást foglalja össze, majd a járatválasztási preferenciákról készült primer adatfelvétel eredményei kerülnek bemutatásra, következtetve a műszaki paraméterek és az utazási döntésben figyelembe vett jellemzők közötti kapcsolatra. A kutatás hipotéziseként feltételeztük, hogy optimális informáltság esetén az ár kisebb szerepet játszik a döntésben, mint az aktuális, adott körülményeknek megfelelő járatválasztásnál. A kutatás következtetései és javaslatai a foglalási jellemzők többlépcsős kibővítésére vonatkoztatva fogalmazódnak meg.

KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK

A járatválasztási döntés

Az utazási döntés közlekedésre vonatkozó eleme légiközlekedés esetén is számos választási lehetőséget nyújt. A járatválasztás problémájának feltárásával az ezredforduló körül kezdtek foglalkozni a kutatók eljutva a beazonosítástól a modellalkotásig. A kezdeti – 1999-es – lekérdezés a foglalási folyamat részéhez, a telefonos egyeztetéshez kapcsolódott az adott út légitársaságának, járatának és utasosztályának kiválasztásáról [3]. Eredményeként a szabadidős turisták menetdíjjal és késésekkel kapcsolatos negatív, valamint a törzsutasprogramokkal kapcsolatos pozitív preferenciáit állapították meg. Proussaloglou, és Koppelman tanulmánya légiutazási piac keresleti sajátosságaként állapítja meg, hogy a légitársaságok, a járatok, a viteldíjak, az utasosztályok, a menetrendi jellemzők, az ülésbeosztás, a jegymódosítási lehetőségek a verseny elemeiként funkcionálnak és befolyásolják a választást a preferenciákra a közvetlenül (törzsutas programok) és a közvetetten (hírnév, piaci pozíció, szolgáltatási színvonal, menetrendpontosság) ható tényezőkön kívül.

A preferenciák jelentősen módosultak az elmúlt másfél évtizedben, ami egyrészt a mérések módszertanából, másrészt a fogyasztói szokások változásából is következik. A szekunder információkat kiegészítő megkérdezések a repülőtereken írásban, szóban folytak, vagy az aktuális járatválasztástól egyre inkább elvonatoztatva, akár sok döntéses, az utas számára a tényezők relatív hasznosságát is feltáró on-line szimuláció módszerével képezték a primer adatbázist. A témát bevezető tanulmányt követően, arra alapozva és azt kiegészítve jelentek meg összefoglalók Louvrier [4], Basar és Bhat [5], Hess és Polak [6] Pels, Nijkamp és Rietveld [7] tárgyalásában brit, amerikai, ausztrál adatfelvételek alapján. Felméréseiket a repülőtereken, vagy a repülőút közben bonyolították. Hess, Adler és Polak. kutatásaiban [2] a választás tényezői közé sorolja a jegyárat, az utazás időigényét, a repülési időt, valamint az elkötelezettséget, hűséget légitársaság és a repülőtér iránt is. A modellalkotást a járatválasztásra az adattípusok sokasága miatt egyre bonyolultabb lett [8].

Internetes adatgyűjtést Hess és Polak [9] alkalmazott a szociodemográfiai jellemzők felmére-

sével kiegészítve az eddigieket, valamint az utazás célját is a döntésre ható tényezőnek tekintették. Az árak alapvető befolyásoló szerepét elfogadva, azt megpróbálták kiszűrni és azonos árak melletti rangsorolási lehetőséget kínáltak a különböző paraméterű járatok között. Ezek a változók a légitársaság, a járat, a törzsutas-tagság, a csatlakozási lehetőség, a repülőgép típusa (széles törzsű, keskeny törzsű, légcsavaros, sugárhajtóműves). Szükségét látták az utasok szegmentálásának is, a három, klasszikusnak tekinthető utascsoport közül az üzleti utazók a törzsutas-preferenciáik, a szabadidős utazók a légitársaság hírneve, a barát- és családlátogatók (VFR) a repülési idő alapján döntöttek azonos ár esetén.

A légijárat választási döntések vizsgálatának tapasztalatai rendkívül komplex és heterogén tényezőket tártak fel [6], ami miatt az induló utasoktól megkérdezéssel szerzett, feltárt preferenciák (Revealed Preference – RP) helyett – amit az adott időpontban éppen induló járatok jellemzői (ár, a járatválasztási lehetőségek, elkötelezettség a légitársaság felé, szinte csak az adott térség lakosainak felmérése) jelentősen befolyásolnak – előre meghatározott preferenciák (Stated Preference- SP) alapján lekérdezett motivációkat és összeállított adatbázist alkalmaznak inkább. A mérési módszerek, modellek összehasonlítása is gyakori a járatválasztások elemzéséről készült szakirodalomban, főként, ha – Collins, Rose és Hess eljárása szerint - azonos megkérdezettek két különböző módszertan szerinti kérdőívre adnak választ [10].

A normál keresés elsődlegesen ár alapján rangsorolja a találatokat, azonban a keresési feltételek előzetes beállításának módosításával, a járatok csoportosításával, a szolgáltatások pontos ismeretével minimális árdifferencia esetén is maximalizálható és egyénre szabható az utazási komfort és az utazási élmény. Azonban, amint kiderül, hogy a kívánt osztályra nincs jegy, azonnal más preferenciák kerülnek előtérbe, az addig kevésbé lényegesnek tartottak előre sorolódnak, vagy éppen még annyira sem lesznek lényegesek, mint az előző választási feltételek mellett [10]. Az online keresőmotorok vagy a keresés beprogramozásánál és/vagy a találatoknál a választási lehetőségek nagy számát kínálják, különösen, ha az elvárások nem diszkrét, hanem folytonos változóként jeleníthetőek meg [11].

Collins, Hess és Rose kutatásában az árat viteldíjra és a környezetterhelési adóra tagolták. Ez a bontás lehetőséget adott a környezettudatosságra következtetésre is, azonban az adó önállóan nem jelent meg a viteldíjtól eltérően szignifikáns tényezőként. Az online utazási irodák választási algoritmusát modellezve igazolták, hogy a döntésben a választási tényezők sorrendje is szerepet játszik, illetve meghatározták, hogy mennyivel fizetnének többet az utasok óránként az egyes tényezők kedvezőbb alakulásáért (üléstávolság, szórakozás) utazási távolság és korcsoportok szerint [11].

A járatválasztási modellek [2] és kutatások alapján megállapítható, hogy az áron, mint meghatározó tényezőn kívül a gyakorlott foglalók esetében a pénzben mérhető ösztönzések (fedélzeti kedvezményes vásárlás, poggyászkedvezmények), az üzleti utazók a nem pénzbeli, a későbbiekben felhasználható praktikus előnyök preferáltak (járatcsere, induláshoz közeli foglalás lehetősége).

Összegezve, optimális járatválasztási helyzetben reális döntési tényezőként jöhetnek számításba az indulási-érkezési repülőtér az elérhetőségével (közlekedési kapcsolatok járatsűrűsége, távolsága, szolgáltatások), a légitársaság jellemzői a repült viszonylatai, a repülési rutin, a szállított utasszám, az utazás biztonsága, a kedveltség, elfogadottság, elismertség, a személyzetről kialakult vélemény, vagyis a hírnév. Ide tartozik a flotta mennyiségi és minőségi összetétele a

kényelmi szolgáltatásokat, a környezeti hatásokat és az üzemelés műszaki biztonságát is figyelembe véve. Légitársaság és repülőtér függő a menetrendpontosság, ami az indulási és érkezési időpontok meghatározását befolyásolja, az átszállási lehetőségek és az átszállások száma, a repülésre, átszállásra fordított idő az utazás időtartamán belül. Szintén légitársasághoz, vagy csoporthoz köthetőek a törzsutas programok, amelyek a kínált előnyök miatt jelentős tényezőként vehetők számításba. Eleve meghatározó az adott járat géptípusa, kényelme (üléstávolság), a járat utazási szolgáltatásai (utasosztály-kínálat, poggyászméret és súly, poggyászdíjak, check-in lehetőségek, ülésválasztás lehetősége, jegymódosítási feltételek, a jegyben foglalt fedélzeti ellátás, a vásárlási lehetőségek és az utazás közbeni elfoglaltságok kínálata). Több utas figyelembe venné a járatok foglaltságát is, szívesebben utazva kisebb zsúfoltságban. Az ár, de még inkább a fentiek szerint az ár-érték arány alapján lenne optimalizálható a járat kiválasztása.

Kiemelt járatjellemzők

A döntéseket „felszereltség-érzékeny” döntésekre és „szolgáltatás-érzékeny” döntésekre oszthatjuk, főként az első csoport függ össze a járat műszaki paramétereivel. A járatjellemzők közül főként az utóbbiak kerülnek kiemelésre.

A légikikötő választása szoros kapcsolatban áll a járatsűrűséggel. Bár a választási lehetőségeket bővíti, de nem jelent ugyanakkor egyértelműen pozitív összefüggést, mert a gyakoribb járatindítás gyakoribb járatösszevonást is eredményezhet, ami az odaúton csatlakozási problémát, a visszaúton kényelmetlenséget, de legtöbbször elégedetlenséget eredményez. A repülőterek megközelíthetősége és közlekedési összeköttetései kiemelkedően jók, a repülőtér-desztináció távolság időigénye és a járatsűrűség alapvető döntési tényező, de mérlegelhetőek a földi közlekedési költségek is.

Az utazás egyik meghatározó faktora a kiindulási és az érkezési desztináció közötti közvetlen vagy kevés átszállási számú összeköttetés. Az átszállások száma az utazás hossza mellett befolyásolja a jegy árát, az eltérő géptípusok vagy légitársaságok miatt változó utazási komfortot, fedélzeti ellátást és csomagpolitikát eredményez. A kellemetlenségek csökkentésére törekednek a légitársaságok olyan stratégiai szövetségek létrehozásával, amelyekben horizontális integrációs együttműködés keretében a vállalatok összehangolják menetrendjüket, utaspolitikájukat, foglalási rendszereiket az utasok hatékonyabb kiszolgálása érdekében. A Star Alliance, a Oneworld, és a SkyTeam szövetségek világméretű járatlefedettséggel és törzsutasprogramokkal versenyeznek az utazókért. Nem véletlen, hogy az egyes stratégiai szövetségek vezető európai légitársaságai (a Lufthansa, a Turkish Airlines, a British Airways valamint az Air France és a KLM) az európai legforgalmasabb légikikötő-csomópontok országaihoz köthetők [12].

Az elfogadottságot a saját tapasztalat és az utasvélemények tükrözik, hivatalos oldalak szolgálnak információkkal, szakmai és utasvisszajelzésekkel, minősítésekkel, kommentekkel légitársaságonként csoportosítva, felhívva a figyelmet, hogy a légitársaság által kommunikált járatkategóriát minden esetben vegyék figyelembe a választásnál. Az elismertségre a szakmai szervezetek éves díjazotti listáiból lehet következtetni. Az Airline Ratings a következő minősítéseket, díjakat adja ki évente: Az év légitársasága, A legjobb Business class üzemeltető, A legjobb Economy üzemeltető, A legjobb First class üzemeltető, kontinensenként A legjobb diszkont légitársaság (ez Európában 2017-ben a Norwegian). Díjazzák a fedélzeti szórakoztatást, a hosszú távú járatokat kontinensenként, a legjobban fejlődő légitársaságot és a regionális járatokat üzemeltetőket is [13].

A flotta mennyiségi és minőségi szempontú megítélése több sajátosságot vehet figyelembe, az átlagéletkor azonban mindenképpen meghatározó. A „fiatal" flottákat és az új gépek rendelését hangsúlyosan kommunikálják, mint az Emirates, amely gépeinek átlagéletkora 5 év, az iparági átlag a kategóriában 11 év, míg a teljes üzemelő gépparkot tekintve 25 év. A kiemelkedő minősítés a flotta új géptípusokra specializáltságának is köszönhető (A380 és B777), ami ugyan korlátozza a repülhető desztinációkat, de megfelelő ráhordó járatokat üzemeltető partnerekkel gazdaságosan és sikeresen működtethető. A kivont A330 és A340 géptípusok környezetterhelése magasabb, üzemanyag-hatékonysága kedvezőtlenebb volt. A flotta géptípusai számának csökkentésére több vezető európai társaság törekszik a karbantartás optimalizálása miatt is. Erre főképp a diszkont légitársaságok hozhatók fel példaként, amelyek egy adott gyártó egy-két géptípusát lízingelik a legköltséghatékonyabb fenntartás érdekében (a Ryanair 370 darab Boeing 737-est, az Easyjet 133 darab Airbus 319-est és 102 darab 320-ast üzemeltet) [14].

Az európai uniós szabályok szerint jelentős késés vagy járattörlés esetén kártalanítás jár az utasoknak (segítség és repülési távolságtól függő összeg formájában). Bár a légitársaságok sokszor kibújnak a fizetés alól rendkívüli körülményekre (mint időjárás, műszaki meghibásodás vagy sztrájk) hivatkozva, ám a késések jelentősen visszavetik az utazók elégedettségét és negatívan befolyásolják a légiközlekedési vállalat általános megítélését. Már önálló vállalkozások is létrejöttek a járatkésésben érintett utasok jogainak képviseletére (Flight-delayed.com vagy Aimtoclaim.eu). Habár a járatok késését számos ok kiválthatja (csatlakozó járatra várás, zsúfolt repülőtér miatti későbbi résidő a felszállásra, földi személyzet szűk keresztmetszete, stb.), az utasok megfelelő tájékoztatása érdekében a Flightstats cég napi pontossággal statisztikázza az egyes repülőterek és légitársaságok késési és járattörlési adatait. Az Eurocontrol adatai szerint 2015 áprilisában a gépek átlagosan 27 percet késtek. Egyes hónapokban, mint december és a nyári hónapok, az értékek magasabbak az indulási vagy érkezési időpontok esetében. Repülőjáratonként átlagosan 3 perc késés a légitársaság, 1,2 perc a repülőtér hibájából és mindössze 0,3 perc a kedvezőtlen időjárásból fakadt [15]. 2016. legpontosabb légitársasága a KLM volt.

Az utazás élményfaktoraként jelentkezik a repülőgép típusa. A keskeny és széles törzsű sugárhajtású vagy a turbópropelleres gépek nyújtotta repülési komfort nemcsak a nagyságból és kialakításból, hanem a felszereltségből is ered. Nagyobb kabinméret több lehetőséget kínál, így a kényelmi szempontok figyelembe vételére elsősorban a széles törzsű, nagy távolságú járatokra tervezett géptípusok esetében tudnak a gyártók széleskörű megoldást kínálni. A rövid- és középhosszú távú repülések esetében – főképp a diszkont légitársaságoknál – a gép maximális utaslétszámának növelése a cél, amely kihívást jelent a gyártóknak is. Az Airbus A320-as géptípust eredetileg 150 főre kapacitálták, ám a low-cost légitársaságok térnyerésével megnövekedett megrendelői igények már 180 fős változatra szóltak. Mindez az ülések közötti távolság és ezzel együtt a lábtér nagyságának csökkentésével volt elérhető. Emellett több légitársaság is vékonyított háttámlával szerelt üléseket használ, amelyek kisebbek és könnyebbek is. Az Airbus Spaceflex koncepciója egy kisebb hátsó konyhaszekciónak és közvetlenül a hátsó nyomástartó válaszfal elé beépített mosdónak köszönhetően további üléssor telepítését teszi lehetővé [16][17].

A kereskedelmi légitársaságok repülőgépeinek fedélzetén kialakított konyhai rész nemcsak az ételek és italok tárolását és felszolgálását szolgálja, hanem az életmentő készülékek, valamint a légi utaskísérők felhajtható üléseinek a tárolása is itt történik. A fedélzeti ellátáshoz kapcso-

lódó berendezések is a konyhában kapnak helyet, mint a konvekciós sütők, kávéfőzők, italgépek, vízforralók, melegítő berendezések. A Boeing és Airbus típusú repülőgépek fedélzetén egy úgynevezett „trolley" típusú konyha kerül kialakításra, amely elnevezés a konyha különböző elemeinek ki-be tologathatóságára utal [18]. Jellemzően a konyharészek két egyetemes szabvány mentén épülnek fel. Ez a két norma az ATLAS és a KSSU koncepció, melyeket az 1960-as években fejlesztették ki az európai légitársaságok (ATLAS = Alitalia, TAP, a Lufthansa, az Air France, Sabena; KSSU = KLM, a Swissair, SAS, UTA), annak érdekében, hogy szabványméreteket vezessenek be az új Boeing 747-es repülőgépek fedélzetén, majd ezt követően fejlődtek ipari szabványokká. Ezek a szabványok például meghatározzák a „trolley"-k, felszolgáló kocsik magasságát, szélességét és mélységét. Az ATLAS szabvány jóval elterjedtebb, a légitársaságok mintegy 80% alkalmazza, de mindkettő koncepció létezik. [19] A fedélzeti konyhák, tehát, mint rugalmas moduláris rendszerek kerülnek kialakításra, amelyek lehetővé teszik, hogy a konyhák felszerelései felcserélhetők legyenek járatonként, így azok a különböző légitársaságok minden igényét ki tudják elégíteni. Például, az ATLAS szabványú konvekciós sütő 32 főétel melegítését képes elvégezni, a sütőberendezések melegítési ideje és a gép kapacitása szerint kell méretezni a konyhát, de befolyásolja az utasosztályok megoszlása és az elhelyezése is, különösen a két szintes géptípusok esetében (Boeing 747 és Airbus 380), ahol a magasabb utasosztályok és az à la carte igényekhez is igazodni kell [20].

A Star Alliance az intenzív terjeszkedés helyett a zökkenőmentes utazást tekinti rövidtávú stratégiai céljának. A légiszövetség 28 tagú, harmonizált utasfelvételi rendszerrel, közös prémium utas adatbázissal rendelkezik, aktuális fejlesztései a csomagkezelésre és az információ-megosztás egységesítésére irányulnak. Az utazási szolgáltatások tekintetében többször felmerül, hogy a repülőtéren kívüli check-in, a gyorsított csomagfelvétel saját címkézéssel, az automatizált útiokmány ellenőrzés utazáskönnyítő szolgáltatásnövelés, vagy önkiszolgáló jellegű szolgáltatáscsökkentés, mert az utazás előtti személyes kapcsolat, az ezáltal nyújtott biztonságérzet lecsökken. Ugyanakkor ezáltal a repülőterek nyilvános utastereiben, amelyek korlátozott szolgáltatásokat nyújtanak, a lehető legrövidebb ideig a lehető legkevesebb ember tartózkodik, csökkenhet a zsúfoltság érzet, ami komfortnövekedést jelent. A csomagokkal kapcsolatos szolgáltatások az a terület, amelyben a IATA 2015-ös felmérése szerint a légitársaságok leginkább fejlődhetnek: 81%-a a megkérdezetteknek nyomon szeretné követni csomagját a feladástól a végcél állomásra érkezésig [21]. A 2016-os felmérés megkérdezettjeinek 50%-a szerint az otthonról vagy más, repülőtéren kívüli helyszínről történő csomagfeladásra is lenne igény [22].

A fedélzeti szolgáltatások egyaránt tartoznak a felszereltség- és a szolgáltatás-érzékeny kategóriába. A komfortérzet különösen a hosszútávú járatokon kerül előtérbe, mint a nagyobb belmagasság, tágasabb belső tér, nagyobb ablakok, szélesebb utastér. Legtöbbször ezek csak néhány centimétert jelentenek, de különböző megoldásokkal és anyagokkal ezt meghaladó lehet az utas tágasság-érzetének növekedése. A Lufthansa 2010 végén világelsőként kezdett szélessávú internet-hozzáférést nyújtani interkontinentális járatain. A FlyNet a légitársaság 107 hosszútávú repülőgépének mindegyikén elérhető és vizsgálják az internet szolgáltatás bevezetését a rövid és közepes távolságú útvonalakon. A fedélzeti WiFi-t megelőzően az útközbeni időtöltésre, szórakozásra szolgáló megoldások a közös képernyő, a saját képernyő központi programmal és a saját képernyő saját video-keresővel, zenével, játékkal lehetőségek voltak, amelyek esetében az utóbbi volt az egyeduralkodó a preferencia sorrendben. Hasonló eredményt hozott

a IATA 2015-ös felmérése is, a válaszadók 81%-a még fizetne is a fedélzeti internet-használatért (leginkább saját eszközeiken). A rövidtávú járatok esetében az utasok olvasással, filmnézéssel és evéssel vagy ivással múlatják az időt [21].

A légitársaságok a fedélzeti ellátás kialakításánál figyelembe veszik többek között a kiinduló- és célország konyháját, a járatot igénybe vevők összetételét (üzleti út egyedülálló felnőtteknek; charterjárat nyaraló családoknak), az utasosztályokat, az utazási idő hosszát, a fedélzeti előkészítés egyszerűségét (rövid idő alatt előkészíthető legyen a tálalásra, a melegítés ne okozzon íz- vagy állagromlást stb.), az egyszerű csomagolhatóságot és természetesen az élelmiszerbiztonsági előírásokat illetve a költségeket [23]. A fedélzeti ellátás igen sokféle a járatok függvényében. Az egyik csoportba a jellemzően Boeing 737, Airbus 320, Airbus 321 típusú gépeket üzemeltető fapados járatok tartoznak, ahol nincs ingyenes fedélzeti ellátás, vásárolható azoban hideg-meleg étel és ital (pl.: easyJet, Ryanair, Wizzair, Jet2, Vueling stb.). A Európán belüli hagyományos légitársaságok járatainak turistaosztályain a jegyárban benne foglaltatik kávé, tea, üdítő. A két óránál rövidebb úton snacket szolgálnak fel – sós mogyoró, ropi, szendvics stb. –, az ennél hosszabb ideig tartó úton meleg ételt. Az étkezés típusa a járatindulás függvénye. A tengerentúli és az interkontinentális járatokon gazdagabb a fedélzeti ellátás, néhány nemzeti légitársaság járatainak fedélzetén igazi kulináris élményben lehet része az utasnak. Pl. a KLM légitársaság interkontinentális járatain à la carte étkezés rendelhető, vagy borkóstoló lehetőségét kínálják. A business, de különösen a first class utasainak folyamatos, változatos ellátása olyannyira image-fomáló, hogy pl. az Air France-nál Michelin-csillagos mesterszakácsok által készítetett ételkölteményeket is kínálnak [24].

A légitársaságokat és a géptípusokat is minősítik a biztonság szempontjából. Az Airline Ratings rangsora 1-7 besorolási kategóriát különböztet meg, figyelembe veszi különböző tanúsítványok meglétét, befolyásolják a baleseti statisztikák, a IATA, az EU és a US szabályoknak való megfelelés, a flotta átlagéletkora, az ICAO (Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) Audit megléte. Az első 10 rangsora: Quantas, Air New Zealand, Alaska Airlines, ANA, British Airways, Cathay Pacific, Delta Airlines, Etihad Airways, EVA AIR, Finnair [25]. Az Európai Unió légterébe nem repülhetnek be olyan légitársaságok és azok által üzemeltetett gépek, amelyek nem felelnek meg a közösségi légibiztonsági szabályoknak. A kitiltott vagy korlátozásokkal sújtott légitársaságok zöme afrikai vagy ázsiai székhelyű [26].

Az üvegház hatású gázkibocsátás (széndioxid, szénmonoxid, nitrogén oxidok, szállópor, vízpára, stb.) a közlekedési szektor velejárója [27]. A légiközlekedés klímaváltozásra gyakorolt hatásával az 1960-as évek végén a 70-es évek elején kezdtek el foglalkozni [28]. A légiközlekedés jelenleg mintegy 3,5%-al járul hozzá éves szinten a CO_2 kibocsátáshoz. Előzetes számítások, modellezések alapján 2050-ig ez a 3,5%-os kibocsátási arány 15–40%-ra fog növekedni [29], köszönhetően a növekvő nemzetközi és belföldi utazásoknak.

Az utasok járatválasztási preferenciáiban, a döntési mechanizmusban egyre hangsúlyosabb szerepe van a környezettudatos gondolkodásmódnak a szakirodalom szerint [30]. A légitársaságok, a repülőterek üzemeltetői is felismerték, hogy az utasok megfelelő tájékoztatása az általuk ez idáig megtett környezetvédelmi célú intézkedések, beruházások befolyásoló tényezőként számítanak a döntési folyamat során [31][32]. A környezettudatos, a globális felmelegedésről tájékozott utasok hajlandóak részt venni „tevékenyen” is az üvegházhatású gázok kibocsátásnak csökkentésében, még pedig a légitársaságok által felajánlott önkéntes széndioxid-ellentételezési

rendszereken keresztül [33]

Az utas közvetlenül az árat érzékeli és hasonlítja össze, a műszaki specifikációnak csak közvetett szerepe van. A IATA 2015-ös globális utasfelmérése szerint a jegyvásárlást ez a tényező befolyásolja a legnagyobb mértékben (43%) [21]. Kínálati szempontból az árkialakításnál megjelenő költségtényező az üzemanyagár, aminek változása közvetve még az utazási kedvre is hatást gyakorol [34].

Az utasok a légitársaság vagy az utasosztály vagy a törzsutasszint jellemzői alapján különböző elsőbbségi szolgáltatásokra jogosultak a repülőtéren. Mindezek kiterjedhetnek check-in pultok gyorsabb kiszolgálására, elsőbbségi biztonsági vizsgálatra, VIP és businessvárók használatára, elsőbbségi csomagszállításra, tranzit segítségnyújtásra és külön gyorsított eljárásra, a repülőgépre felszállás elsőbbségére. A diszkont légitársaságok egyes elsőbbségi szolgáltatásokat díjfizetés ellenében minden utas számára elérhetővé tesznek.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A járatválasztásban szerepet játszó tényezők ágazati tapasztalati tényeken alapuló szekunder feldolgozását követően a primer felmérésben skála és rangsoroló kérdésekkel kerültek felmérésre utasszegmensenként a megkérdezettek aktuális (RP) és egy jövőbeli (SP) utazás járatválasztási attitűdjeiről. A felmérés időpontja 2017. február első hete, helyszíne Budapest, Liszt Ferenc repülőtér (BUD), amely 2016-ban 11.442 ezer utast fogadott, utasforgalmi növekedése 11,2%-os volt. A választási lehetőségek a menetrendszerű járatok esetében a hazai, mint indulási repülőtéren is fennállnak. A téli menetrend alapján Budapestről 38 ország 119 városába 61 légitársaság kínál járatokat. A helyszíni felmérés eredményeként kapott SP adatbázis kiegészítésére online kutatást végeztünk a survio.com platformot használva.

Az első kérdésegység az utazóra és az utazásra vonatkozott, főként szociodemográfiai és utazási beállítódásra vonatkozó egyválaszos kérdéseket tartalmazva a csoportképzést célozva. A második egység RP típusú, az adott járathoz kapcsolódó választásokat kérdezte le, a harmadik és a továbbiak már SP jellegűek. A döntési helyzetet bizonyos tényezők változatlansága melletti választással (ceteris paribus) hoztuk létre, valamint négy Budapest-Atlanta viszonylatban kiállított repülőjegy páros összehasonlításával. Collins [10] módszeréhez hasonlóan kutatásunkban csak az odaúti járat alapján történik a választás, a tényezők csak arra vonatkoznak, ugyanakkor az oda-vissza járatárakat nem feleztük meg az egyszerűség érdekében. A rangsoralkotás RP és SP módszerrel megismételve (2. és 5. egység) az eredmények összehasonlításának lehetőségét kínálta.

A napi csúcsidőszaki lekérdezés a két terminálon 92 hiánytalanul kitöltött kérdőívet eredményezett. A mintában a férfiak 39,1%-os arányt képviseltek, a válaszadók 44,6%-a magyar nemzetiségű volt, a külföldiek közül román, szlovák és szerb utasok voltak átlagot meghaladó arányban. A fiatal-középkorú-idősebb utasok kor szerinti megoszlása rendre 43,5–42,4–14,1%, vagyis a 47 év alattiak véleménye hangsúlyos az eredményekben. A minta árérzékenységére utal a jövedelmi szint, átlag alattinak csak 7,6%, átlag felettinek 17,4% vallotta magát, habár 73,9% alacsony költségű „fapados” járattal utazik. Utazási tapasztalattal a megkérdezettek csaknem kétharmada rendelkezett, egyharmaduk különösen gyakran utazik, ugyanakkor jel-

lemzően mégsem vesznek részt törzsutas programokban, a megkérdezettek 13,0%-a rendelkezik legalább egy törzsutas státusszal. A válaszadók 68,5%-a egyszer száll át, a kettőnél többszöri átszállás nem jellemző (2,1%). Az utazás céljaként 44,6%-ban a szabadidős utazást jelölték, ezen kívül fele-fele arányban oszlottak meg az üzleti célú és a barát- vagy rokonlátogatási célú utazások. A válaszadók jellemzően saját maguk foglaltak, 31,5% a légitársaságnál, 52,2% online értékesítőnél. Azonos arányban vették igénybe a hagyományos utazási irodai repülőjegy értékesítési szolgáltatásokat és hagyatkoztak a vállalati foglalásra (7,6%).

Eredmények

A kérdőív két egységében 23 járatválasztási tényező figyelembe vételének minősítése történt az aktuális jegyvásárlás és egy optimalizált, általános jegyvásárlás esetén 5 fokozatú Likert-skálán. A tényező figyelembe vételének átlagos fontossága a választások gyakoriságának súlyozott átlaga alapján került meghatározásra, ami alapján kialakult rangsort a két döntési típusra vonatkozóan az 1. táblázat mutatja.

Járatválasztási tényező	Átlagos fontosság (rangsor)	
	az aktuális jegyvásárlásnál	általában a jegyvásárlásnál
Az ár	44,11 (1)	29,75 (2)
Az érkezési időpont	39,22 (2)	29,25 (4)
Az indulási időpont	37,77 (3)	28,17 (7)
A repülési idő	35,22 (4)	29,50 (3)
A poggyászjellemzők	34,33 (5)	28,75 (5)
Az utazás teljes időtartama	34,11 (6)	29,92 (1)
Az átszállásra szolgáló idő	32,22 (7)	28,33 (6)
Az átszállások száma	28,67 (8)	27,92 (8)
A légitársaság a jó hírneve miatt	23,56 (9)	21,67 (11)
A jegymódosítás plusz költsége	23,22 (10)	23,08 (10)
A légitársaság a biztonságossága miatt	21,78 (11)	23,92 (9)
A légitársaság a kisebb környezeti hatások miatt	18,22 (12)	19,58 (13)
A jegyben foglalt fedélzeti ellátás	16,44 (13)	20,08 (12)
Az ülésválasztás lehetősége	16,22 (14)	19,42 (14)
A járat látható foglaltsága	16,22 (15)	16,50 (18)
A légitársaság a személyzet kedvessége miatt	15,67 (16)	19,00 (15)
A repülőgép típusa	14,44 (17)	15,17 (22)
A légitársaság a flotta összetétele miatt	14,11 (18)	16,00 (19)
Az ülésméret	13,56 (19)	18,17 (17)
Az utasosztály-kínálat	13,22 (20)	18,92 (16)
A törzsutasként élvezhető előnyök	13,11 (21)	16,00 (20)
A fedélzeti szórakozási lehetőségek	11,67 (22)	15,75 (21)
A járat fedélzeti vásárlási lehetőségek	8,11 (23)	13,83 (23)

1. táblázat A járatválasztás preferencia sorrendje aktuális és általános jegyvásárlások esetében

Mindkét módszertan szerint az utasok az adott légijárat kiválasztása során a legfontosabb tényezők között az árat, a poggyászt és az utazás időtényezőit szerepeltetik, a technikai, műszaki jellemzők a rangsorok második felében jelennek meg. A két módszer összehasonlítása során megállapítható, hogy az ár korlátozó szerepet betöltő döntési tényező, mert egyrészt, az általános járatválasztásnál az utazás időtartama megelőzi a rangsorban, másrészt a figyelembe venni

szándékolt szempontok átlagos megoszlása jóval egyenletesebb, kisebb szórást mutat a tényleges *(σ=5,51)*, főként az árat figyelembe vevő aktuális járatválasztásnál *(σ=10,31)*. A kutatás hipotézise ezáltal igazolást nyert.

A kapott adatok az elvégzett Kaiser-Meyer-Olkin- (KMO) kritérium alapján alkalmasak faktoranalízis elvégzésére, a KMO mutató 0,743, ami a 0,7-es megfelelőségi szintet meghaladja. Mivel a változók száma nagy, a főkomponens analízis az alkalmas adatredukcióra, a faktorok tengelyeinek elforgatása varimax módszerrel történt. A 2. táblázatban összesített rotált komponens mátrix 6 faktort különít el, melyek a teljes variancia 69,823%-át magyarázzák, ami eléri a minimumként megfogalmazott 60%-ot.

A faktoranalízis eredménye alapján megállapítható, hogy a turisták választási döntése jól körülhatárolható faktorokkal jellemezhető, melyek között az ár, mint háttérváltozó önálló faktorként szerepel, de beazonosítható két műszaki, technikai feltételekkel összefüggő faktor is, különböző mértékben magyarázva a döntést.

Faktoralkotó tényezők	Faktor neve (variancia %)	Komponens súlyok					
		1	2	3	4	5	6
az ülésméret	**Légitársaság biztosította és flottafüggő választási lehetőségek** (18,087)	**,799**	,059	,021	,216	,029	,158
a fedélzeti szórakozási lehetőségek		**,738**	,174	,088	,402	-,019	-,076
a járat fedélzeti vásárlási lehetőségek		**,722**	,275	,027	,195	-,080	-,301
a törzsutasként élvezhető előnyök		**,659**	,165	,029	,351	-,232	-,410
a repülőgép típusa		**,654**	,246	,037	,032	,361	,117
a légitársaság a flotta összetétele miatt		**,627**	,405	-,044	,047	,021	,146
a légitársaság a személyzet kedvessége miatt	**Légitársaság imázsa, üzemeltetési feltételei** (13,530)	,212	**,726**	,004	,101	-,124	,091
a légitársaság a jó hírneve miatt		-,051	**,723**	,176	,373	,142	-,184
a légitársaság a biztonságossága miatt		,501	**,683**	,097	,016	,171	,193
a járat látható foglaltsága		,370	**,615**	,037	,303	-,246	-,225
a légitársaság a kisebb környezeti hatások miatt		,457	**,591**	-,015	-,018	,079	-,043
az érkezési időpont	**Repülőút időtényezői** (13,459)	-,006	,044	**,884**	,015	-,031	,196
az indulási időpont		,014	,118	**,831**	,183	-,080	,071
az utazás teljes időtartama		-,071	,000	**,799**	,007	,276	-,006
a repülési idő		,111	-,019	**,751**	,019	,206	-,032
a poggyászjellemzők	**Fedélzeti szolgáltatások** (11,715)	,108	,036	,163	**,743**	-,024	-,044
a jegymódosítás plusz költsége		,184	,139	,144	**,707**	-,028	-,083
az ülésválasztás lehetősége		,409	,250	-,120	**,620**	-,197	,276
a jegyben foglalt fedélzeti ellátás		,373	,448	-,052	**,525**	,269	,102
az utasosztály-kínálat		,428	,450	-,106	**,499**	,230	-,004
az átszállások száma	**Tranzit jellemzők** (7,234)	,029	,046	,173	-,144	**,846**	,047
az átszállásra szolgáló idő		,057	-,049	,471	,252	**,574**	,017
az ár	**Ár** (5,797)	,031	,014	,199	,000	,045	**,857**

2. táblázat Rotált komponens (faktor-) mátrix az aktuális jegyválasztási tényezőkre vonatkozóan

Az általános járatválasztásra vonatkozó kérdéscsoport elemzése öt faktort eredményezett az elvárt megfelelőségi szinteken. A faktorok részben egyeznek az aktuális választás faktoraival.

Összehasonlítva, a „légitársaság imázsa, üzemeltetési feltételei” elnevezésű faktor csak egy tényezőben különbözik, ami a nagymértékű átfedés miatt valós faktornak tekinthető. Az időtényezők közé, azokkal azonos súllyal beépül az ár, így komplexen mutatják a szorosan vett utazási jellemzőket. Ebben az eredményben megerősítést nyer az előző, az ár korlátozó szerepét beazonosító megállapítás és egyben a hipotézis. Az áron kívüli tényezők is megjelentek az általános, nem foglalás-specifikus választásnál. Hangsúlyosan műszaki faktor az ülésméretet, géptípust, szórakozást is magában foglaló faktor, melynek harmadlagos befolyásoló szerepe van az általános járatválasztási döntésekben.

A többtényezős járatválasztási döntés fő elemeire bontása bizonyos, változatlan tényezők mellett egy plusz tényező bevonásának megjelölésével történt. A döntést befolyásoló tényezők közül kérdésenként plusz egy rögzítésre került. A tíz tényező közül a rögzítetteket és a rögzítésének sorrendjét az előzetes szekunder információk határozták meg, a leginkább befolyásoló jegyár már kiindulásként rögzítésre került. Ezt követték a feltételezetten csökkenő mértékben szerepet játszó, rögzítésre kerülő tényezők, a légitársaság, az utazási idő, a poggyászjellemzők, a törzsutas előnyök. Az eredmények elemzésére a tényezőnkénti választási lehetőségek számához viszonyított relatív preferenciák alapján került sor, ami alapján a döntést befolyásoló tényezők rangsora az áron kívül a következő:

1. utazási idő (0,3478);
2. jegymódosítási díj (0,2478);
3. poggyászjellemzők (0,2464);
4. ülésválasztás (0,1847);
5. légitársaság (0,1413);
6. fedélzeti ellátás (0,113);
7. géptípus (0,0826);
8. törzsutas előnyök (0,038);
9. szórakoztatás (0,0261).

Döntésenként vizsgálva, azonos jegyár esetén 32,6%-os befolyásolási súllyal, azonos jegyár és légitársaság esetén 37,0%-os befolyásolási súllyal az utazási idő hosszúsága játszott szerepet a választásnál. A jegyár, légitársaság és az utazási idő azonossága esetén a poggyászok paraméterei váltak döntő tényezővé (33,7%), de jelentős szempont lett a jegymódosítási díj is (22,8%), ami a poggyászjellemzők változatlansága esetén vált markáns tényezővé 40,2%-os választási aránnyal. A meghatározónak feltételezett törzsutas előnyök nem bizonyultak relatíve preferált tényezőnek, az árakon és az időn kívül a kényelmi szempontok kerülnek figyelembe vételre.

A páros preferencia vizsgálatokban szereplő négy repülőjegyet nem tényezőkre bontva, hanem összességében kellett összehasonlítani. Mivel a 14 tényező együttes figyelembe vétele a lekérdezés tekintve nehézkes és időigényes, valamint az összehasonlítás módszertanában nem követtük a Ross-féle páros elrendezést, az első helyre kerülés arányosságának elvét. Az első repülőjegy megjegyzése után az erre vonatkozó összes összehasonlítást meg kellett tennie a megkérdezettnek, utána ugyanígy a második, harmadik és a negyedik jegy következett, így hat összehasonlítást végeztek el [$\frac{m\,(m-1)}{2}$]. A tényezők alapján a repülőjegyek az alábbiakban jellemezhetők:

- „A” – a legolcsóbb, legkényelmetlenebb, napokon áthúzódó, hosszú repülési és különösen átszállási idő;

- „B” – 3%-os felárért kényelmes, jól ütemezett út, hátránya, hogy nem cserélhető a jegy, ugyanakkor ennek a jegynek a legmagasabb a műszaki szempontú szolgáltatástartalma a géptípusból következően;
- „C” – 25%-os árkülönbözettel a legdrágább, kényelmes időbeosztás, legjobb poggyászkondíciók;
- „D” – 4%-os felárért egynapos ütemezésű megoldás, de 2 átszállás, normál poggyász, cserélhetőség.

A válaszadás következetessége konzisztencia-vizsgálattal igazolható, a konzisztencia együtthatható $K = 1 - \frac{d}{d_{max}}$, ahol a d az inkonzisztens körhármasok száma [$d = \frac{m(m-1)(2m-1)}{12} - \frac{\Sigma a^2}{2}$], a d_{max} a maximálisan előállítható körhármasok száma [$d_{max} = \frac{m^3-4m}{24}$]. A validálás során *d=0, K=100%* volt, a válaszadók egyéni konzisztencia együtthatójának meghatározásától eltekintettünk, a rangsort jellemző súlyszám enélkül is megállapítható volt.

Az összesített preferencia-mátrix a „B” jegy választásának előnyben részesítését mutatja a rendkívül kényelmetlen menetrendi jellemzőkkel rendelkező „A” jeggyel szemben, haszonáldozati költségként elfogadva a felárat (3. táblázat).

VJ* \ VA**	„A” jegy	„B” jegy	„C” jegy	„D” jegy	Σ	Guilford-féle súlyszám(%)
„A”jegy		43	63	63	169	30,6
„B”jegy	49		80	76	205	37,1
„C”jegy	29	12		41	82	14,9
„D”jegy	29	16	51		96	17,4
Σ	107	71	194	180	552	100

3.táblázat Aggregált páros prefereneciák (VJ*: viszonyított jegy; VA**: viszonyítási alapként figyelembe vett jegy)

Ez a logika ugyanakkor már nem érvényesült a „D” jeggyel szemben, aminek árkülönbözete a „B”-vel szemben minimális, ugyanakkor módosítható a jegy, vagyis nem kell kötni lemondási biztosítást, aminek az ára meghaladja az árkülönbözetet. Ezek alapján a „D” jegy nem foglal el a választási rangsorban a paramétereinek megfelelő pozíciót. A „B” jegy összesített preferálásával a műszaki szempontok is megjelennek, a másodikként preferált jegyben azonban már nem, ebben az esetben már erősebb az ár befolyásoló hatása, elfogadva a jóval alacsonyabb műszaki színvonalat. A hipotézist ez az eredmény sem cáfolja, megerősíti az árkorlát elképzelést.

Következtetések, javaslatok

A primer kutatás preferencia tényezőinek összeállítása során az előzetes járatválasztási valamint a tényleges járatfoglalási szempontok kizárólag a légitársaság kínálta paraméterekre fókuszáltak, összhangban a nemzetközi szakirodalomban fellelhető tanulmányokkal. A kapott eredmények megerősítették a nullhipotézist az ár eltérő szerepére vonatkozóan, ám a vizsgálat kizárólag a légitársaság nyújtotta turisztikai termékre vonatkozott. A turisztikai termékek összetettségét, mint turisztikai integrációs tényezőt még nem mérték, vagyis az egyes turisztikai szolgáltatók termékeinek együttes foglalhatóságából származó azon előnyöket, amelyek pl. légitársaság és szállodavállalat esetében ingyenes repülőtéri transzfert, vagy további törzsvendég/törzsutas jutalmakat, elismeréseket eredményezhetnek. Ezt a saját online foglalási rendszerek tudják kezelni, de a GDS-ek és az online utazási irodák még nem. A primer kutatásba bevontak magas légitársasági

weboldalon vagy OTA oldalán történt foglalási aránya miatt javasoljuk a mérésbe bevonni a több szolgáltató által együttesen nyújtott előnyöket, mint járatválasztási tényezőt.

Az RP és SP járatválasztási preferenciák fenti továbbgondolása mellett a kutatás további kibővítésére a többtényezős járatválasztási döntések vizsgálatában a foglalási jellemzők többlépcsős kiegészítésével nyílik mód. Az utasok számára a rögzített járatjellemzők olyan döntési szituációt eredményeznek, amely a járatfoglaláshoz hasonló mérlegelési feladatot ró a megkérdezettre.

A tanulmány kiváltképp a faktorelemzés, illetve a többtényezős járatválasztási döntés elemzésének eredményét javasolja megfontolásra a járatüzemeltetést és a jegyértékesítést érintő stratégiai döntéshozók számára.

Köszönetnyilvánítás

Ez úton szeretnénk megköszönni a Budapest Airport Zrt. kérdőíves lekérdezéshez nyújtott támogatását és együttműködését.

A tanulmány az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Pallasz Athéné Egyetemen” című pályázat támogatásával jött létre.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] IATA Annual Review 2016. (online) url: http://www.iata.org/publication/Pages/annual-review.aspx (2017.01.20.)

[2] Hess, S., Adler, T.,Polak, J.W.: Modelling airport and airline choice behavior with the use of stated preference survey data, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 43, 221–233. ISSN 1366-5545 2007. (online) url: http://eprints.whiterose.ac.uk/5435/1/Hesss6pdf.pdf (2017.01.11.)

[3] Proussaloglou, K.,Koppelman, F.S.: The choice of air carrier, flight, and fare class., Journal of Air Transport Management 5 (4), pp. 193-201. 1999. (online) url: http://www.sciencedirect.com/science/journal/09696997 (2017.01.11.)

[4] Louviere, J., Hensher, D., Swait, J.: Stated Choice Models: Analysis and Application, Camrbridge University Press, Cambridge. 2000. (online) url: http://assets.cambridge.org/97805217/82753/sample/9780521782753ws.pdf (2017.01.15.)

[5] Basar, G.,Bhat, C. R.: A Parameterized Consideration Set model for airport choice: an application to the San Francisco Bay area, Transportation Research Part B: Methodological 38(10), 889–904. 2004. (online) url: https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/23864/TRPB_Basar_TR_REVISED.pdf?sequence=1&isAllowed=y (2017.01.18.)

[6] Hess, S., Polak, J. W.: Airport, airline and access mode choice in the San Francisco Bay area, Papers in Regional Science, 85 (4). 543 - 567. ISSN 1056-8190, 2006. (online) url: http://eprints.whiterose.ac.uk/43626/5/Hess14.pdf (2017.01.19.)

[7] Pels, E., Nijkamp, P., Rietveld, P.: Airport and airline choice in a multi-airport region: an empirical analysis for the San Francisco bay area, Regional Studies 35(1), 1–9. 2001. (online) url: http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00343400120025637?needAccess=true (2017.01.16.)

[8] Lijesen, M. G.: A mixed logit based valuation of frequency in civil aviation and from SP-data, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 42(2), 82–94. 2006. (online) url: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554505000736 (2017.01.22.)

[9] Hess, S., Polak, J. W.: Mixed logit modelling of airport choice in multi-airport regions, Journal of Air Transport Management 11(2), 59– 68. 2005. (online) url:http://eprints.whiterose.ac.uk/5430/1/hesss4.pdf (2017.01.20.)

[10] Collins, A., Hess, S., Rose, J.: Stated Preference survey design in air travel choice behaviour modelling. In: AET Paters Repository. Association for European Transport. 18.p. ISSN 2313-1853, 2007. (online) url: http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/2618/confid/13 (2017.01.10.)

[11] Collins, A., Rose, J., Hess, S.: Interactive stated choice surveys: a study of air travel behavior. Transportation 39(1) pp.55-79. ISSN 0049-4488, 2012.

[12] IATA: Departing passengers – 2015 airport rankings, (online) url: http://www.iata.org/whatwedo /Documents/economics/chart-of-the-week-1-Apr-2016.pdf (2017. 01. 26.)

[13] Award. Airline Rating. The West Australian. (online) url: http://www.airlineratings.com/awards.php, (2017. 01. 05.)
[14] https://www.planespotters.net/airline/ adatbázisa alapján (2017.01.26.)
[15] Eurocontrol: All-Causes Delay to Air Transport in Europe, (online) url: https://www.eurocontrol.int /sites/default/files/publication/files/flad-august-2016.pdf (2017. 01.26.)
[16] A320 Setting the single-aisle standards, (online) url: http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/ (2017.01.26)
[17] Cabin design. Family-wide innovations from Airbus, (online) url: http://www.airbus.com/innovation/proven-concepts/in-design/cabin-design/ (2017.01.26.)
[18] Kerry Reals: Interiors: spice galley concept proved too hot for airlines (online) url.: https://www.flightglobal.com/news/articles/interiors-spice-galley-concept-proved-too-hot-for-a-411152/ (2017.01.24.)
[19] What does a passenger aircraft galley ('kitchen') look like? (online) url.: http://aviation.stackexchange.com/questions/13860/what-does-a-passenger-aircraft-galley-kitchen-look-like (2017. 01.24.)
[20] Flight catering by Professor Peter Jones (2004) (online) url: http://elibrary.com.ng/UploadFiles/file0_1782.pdf , from pg.244 (2017.01.24.)
[21] IATA: 2015 IATA Global passenger survey, (online) url: http://www.iata.org/publications/ Documents/Highlights%202015-Global-Passenger-Survey-Final.pdf (2017.01.12.)
[22] IATA: 2016 Global passenger survey results highlights, (online) url: http://www.iata.org/publications/store/ Documents/GPS-2016-Highlights-Final.pdf (2017.01.12.)
[23] Saverio Mongelli : How to Choose the Best In-Flight Catering Options Based on the Length of Your Flight http://www.universalweather.com/blog/2012/06/how-to-choose-the-best-in-flight-catering-options-based-on-the-length-of-your-flight/ (2017.01..25.)
[24] Szabó László: Milyen a fedélzeti ellátás (online) url: http://utazz.ujszo.com/2015/07/21/milyen-a-fedelzeti-ellatas (2017. 01.22.)
[25] Safety rating per airline. Airline Rating. The West Australian (online) url: http://www.airlineratings.com/safety_rating_per_airline.php (2016. 12. 18.)
[26] Európai Tanács: Az EU-n belül működési tilalom alá tartozó légitársaságok listája. (online) url: https://ec.europa.eu/transport/modes/air/safety/air-ban_hu (2017.01.26.)
[27] IPCC, 1999. Aviation and the global atmosphere. In: E Penner, J., Lister, D.H., Griggs, D.J., Dokken, D.J., McFarland, M. (Eds.), Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. (online) url: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf (2017.01.23.)
[28] Kuhn, P.M.: Airborne observations of contrail effects on the thermal radiation budget. J. Atmos. Sci. 27, 937–942. (online) url: http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469(1970)027%3C0937%3AAOOCEO%3E2.0.CO%3B2 (2017.02.01.)
[29] Cohen, S., Higham, E.,: Eyes wide shut? UK consumer perception of aviation climate impacts and travel decisions to New Zealand. Curr. Issues Tour. 14, 323e335. (online) url: http://dx.doi.org/10.1080/13683501003653387. (2017.01.23.)
[30] Davison, L., Littleford, C., Ryley, T.: Air travel attitudes and behaviours: The development of environment-based segments. Journal of Air Transport Management,36,13-22. (online) url: https://www.researchgate.net/publication/260012864_Air_travel_attitudes_and_behaviours_The_development_of_environment-based_segments (2017.01.09.)
[31] Baumeister, S., Onkila, T.: An eco-label for the airline industry?. Journal of Cleaner Production, 142 (Part 4), 1368-1376. (online) url: https://jyx.jyu.fi/dspace/handle/123456789/52466 (2017.01.09.)
[32] Hagmann, C., Semeijn, J., Vellenga, D.,: Exploring the green image of airlines: passenger perceptions and airline choice. J. Air Transp. Manag. 43, 37e45. (online) url: http://dx.doi.org/10.1016/j.jairtraman.2015.01.003. (2017.01.10.)
[33] McLennan, C. J., Becken, S., Battye, R., So, K. K. F.: Voluntary carbon offsetting: Who does it? Tourism Management, 45, 194-198. (online) url: https://www.researchgate.net/publication/262401513_Voluntary_carbon_offsetting_Who_does_it (2017.01.26.)
[34] Kevesebb profitra számítanak a légitársaságok. Business Traveller Hungary, (online) url: http://businesstraveller.hu/bt_kozlekedes/kevesebb-profitra-szamithatnak-a-legitarsasagok-1140674 (2016.12.15.)
[35] Minden Budapestről induló légi járat egy helyen. (online) url: http://azutazo.hu/ferihegyi-utvonalkalauz/ (2017.01.08.)

THE ROLE OF TECHNICAL SPECIFICATIONS IN CIVIL AVIATION – HOW DO PASSENGERS CHOOSE A FLIGHT?

Airline communication toward passengers generally remarkably focuses on factors like available destinations, number of passengers, size and quality of the fleet, procurement and scheduling new aircrafts, reducing environmental impact, safety parameters, differentiated services to different classes and passengers segments. The diversity in supply – range of supply to a destination or spectrum of prices available – repeatedly raises the question that what attitudes influences the flight choice and how the passengers are influenced by the communicated and real technical parameters of an aircraft. Factors of choice are limited by the primary parameters of searching lists; however, additional information may be obtained mostly regarding to the technical specifications, equipment, services and travel experience from the aircraft suppliers' or airlines' communication. The study exploring the interrelation between factors as technical specification, communication and travel experience of scheduled civil aviation consists of a summary based on secondary research and a summarising finding containing the key results of a survey on flight preferences and decisions.

Keywords: *tourism, air transport, travel decision, flight choice, flight preference, sustainability*

Bakos Róbertné (MSc) mestertanár Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék bakosne@szolf.hu orcid.org/0000-0002-8890-0710	Bakos, Róbertné (MSc) Master Teacher Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department bakosne@szolf.hu orcid.org/0000-0002-8890-0710
Dr. Kóródi Márta, PhD főiskolai tanár Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék korodi@szolf.hu orcid.org/0000-0002-7214-3815	Dr. Kóródi, Márta, PhD College Professor Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department korodi@szolf.hu orcid.org/0000-0002-7214-3815
Dr. Mondok Anita PhD főiskolai docens Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék mondoka@szolf.hu orcid.org/0000-0002-6444-970X	Dr. Mondok, Anita PhD College Associate Professor Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department mondoka@szolf.hu orcid.org/0000-0002-6444-970X
Dr. Szabó Attila PhD főiskolai docens Pallasz Athéné Egyetem Gazdálkodási Kar Turizmus-Vendéglátás tanszék szaboattila@szolf.hu orcid.org/0000-0001-5086-7305	Dr. Szabó, Attila PhD College Associate Professor Pallasz Athéné University Faculty of Business Administration Tourism & Catering Department szaboattila@szolf.hu orcid.org/0000-0001-5086-7305

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-13-0369_Szabo_Attila_et_al.pdf

Márk Venczel, György Bicsák, Árpád Veress

COUPLED FLUID DYNAMIC AND HEAT TRANSFER ANALYSIS OF A SMALL-SIZED RESEARCH GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER

In phase of design and development of gas turbine jet engines, it is indispensable to be aware of the complex physical, chemical, fluid dynamic, heat transfer and thermodynamic phenomena occurring inside the main engine parts. With use of CFD tools and visualisation techniques, engineers are able to reveal and better understand the elaborate and hidden processes in gas turbine engines. The aim of this study is to perform a coupled fluid dynamic and heat transfer analysis on a small-sized research gas turbine combustion chamber with special care for the accuracy of combustion process and outlet temperature distribution compared to the combustion-theory requirements and to available and suitable data for verification. The plausibility check was accomplished with the results of a MSc thesis and an ongoing PhD dissertation with same geometry and similar conditions and objectives.

***Keywords**: CFD, combustion modelling, combustor, gas turbine jet engine, turbine inlet temperature*

1. INTRODUCTION

Nowadays, gas turbine jet engines are considered to be not only the relevant propulsion systems of the high power commercial and military aircrafts but the most practicable and economical machineries for energy production in gas and oil sectors. Their unprecedented advantages are the high power-weight index, few moving components, high reliability and availability, little sensitivity for overload and the fact that their operation does not require such type of liquid-based cooling system. Nevertheless, the maximum allowable temperature in the combustion chamber and at the turbine inlet section must be limited due to metallurgical reasons. To measure and monitor this temperature date in an operating combustor is always a difficult task due to the high temperature ranges and sudden heat loads, which do not allow the application of conventional thermometers. Additionally, the presence of measuring equipment can have a remarkable effect on the streamlines (wakes), pressure drop, heat transfer, mixing and combustion process which can lead to significant errors in the measured results. Thus the obvious solution is to use well validated CFD tools in order to perform virtual tests on a combustion chamber operation in more cost-, time- and capacity-efficient ways.

1.1 Gas turbine jet engine performance

Gas turbine jet engines involve three types of energy in a two-step energy transformation. The power of matter is stored in the fuel in form of chemical energy. A certain proportion of chemical energy is released during combustion as thermal energy and raises the power capacity of compressed air entering the combustion chamber. After this, during expansion the uniformly heated gas mixture with higher enthalpy (compared to ambient) leaves the combustor and drives the turbine. As a result, thermal energy is transferred into mechanical energy on the turbine blades and the engine generates shaft power or thrust.

As far as performance is concerned, the most important parameter of the engine, after the pressure ratio of the compressor, is the turbine inlet temperature (TIT). One way to enhance the thermal efficiency and specific power of the engine is to increase TIT. This can be realized by less intermediate, dilution and cooling air and/or increasing the pressure ratio which will result higher thermal load on the first set of rotor blades and decreases the lifetime of turbine.

The very first gas turbines managed to reach the turbine inlet temperature value of only 400 °C but between the world wars, technology allowed to raise this number to 775 °C. In the late 1960s, aviation industry achieved a TIT of 1010 °C at the use of JT9D-7 gas turbine in the iconic Boeing 747-100. Nowadays, Rolls Royce Trent 1000 engine of Airbus 380 or the GE NX engine of Boeing 787 operate with 1500–1600 °C TIT. This performance could not be reached without a sophisticated cooling system as the result of thorough blade cooling and metallurgical developments with theoretical support of advanced material science (see **Figure 1**). On the one hand, high performance alloys (called superalloys) are used for turbine blades, which are capable of withstanding high temperature and stress in extremely oxidizing atmospheres and show favourable creeping properties with low cycle fatigue [1].

On the other hand, turbine blades can be cooled with fuel or with film cooling which provides thermal protection by forming a layer of cold air around the blades. In terms of combustor, the best way of cooling is called transpiration cooling, where the chamber wall is made of porous material that allows air to pass through it. Together with Thermal Barrier Coating system and air cooling passages the combustor and turbine blades are protected from prompt thermal fatigue. [2]

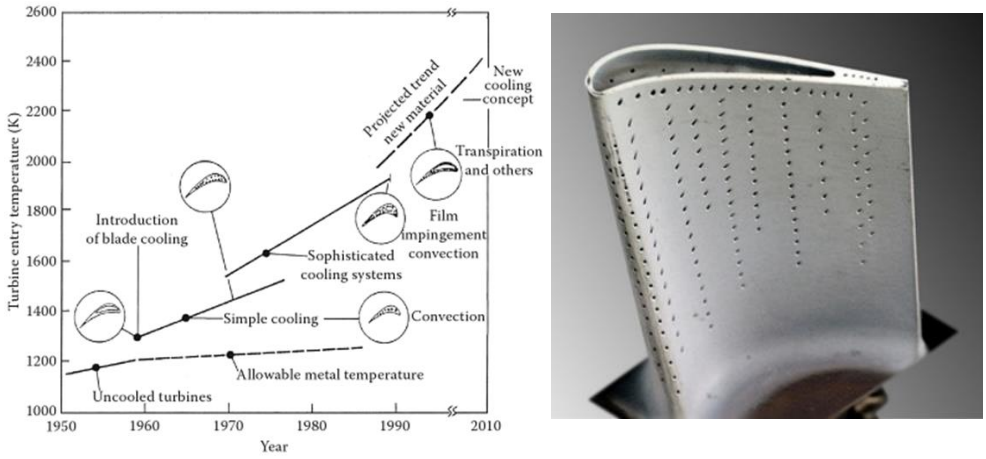


Figure 1 Development of turbine blade cooling (left) and film cooling holes on a turbine blade (right) [3][4]

It is clearly seen, that combustion is the key phenomenon which governs the engine performance. Because of its critical role, an accurate turbulent flame control is demanded so that we will be able to burn fuels more efficiently, raise performance by TIT and reduce pollutants in the exhausted gas. It appears as a real challenge to find accurate solution with help of CFD in the production of power.

1.2 The combustion process

Combustion is believed the oldest and fundamental technology of humanity, which has been used for more than one million years in order to keep our world in development. It is a certain type of oxidation that can be described as a rapid chemical reaction between fuel (which con-

serves huge amount of energy stored in material) and oxidizer (which creates proper environment for burning). An activation energy is also needed for reactants to begin an exothermal process in form of self-propagating flames. In terms of gas turbine engines, combustion is a continuous phenomenon, where Jet-A (kerosene) plays the role of fuel while oxygen in the air is the oxidizer and activation energy is added as spark ignition.

Flame can be determined as the rapidly reacting body of hot gases, where the released chemical energy is emitted in the visible spectrum. The flame front or reacting zone is a small region where chemical reactions take place. Other physical phenomena can also accompany the combustion such as explosion and detonation depending on the reaction velocity and the surrounding pressure [1][5].

Combustion is usually approached by reaction kinetic equations which describe the chemical reaction mechanism among the initial components and the newly generated products. In case of burning kerosene, a detailed list of kinetic equations can be found in [6] but to mention only the most important processes in ideal condition, one can find the followings:

$$2C_{10}H_{22} + 31O_2 \rightarrow 20CO_2 + 22H_2O \quad (1)$$

$$C_9H_{12} + 12O_2 \rightarrow 9CO_2 + 6H_2O \quad (2)$$

Considering the products CO and NO due to incomplete combustion:

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad (3)$$

$$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO \quad (4)$$

Furthermore, to make combustion more realistic, some more phenomena must be taken into account simultaneously as we can see in **Figure 2**.

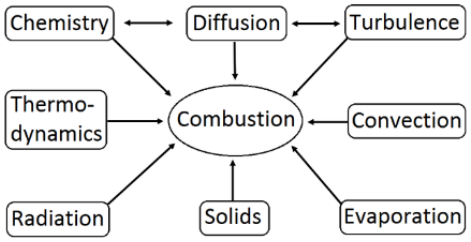


Figure 2 Phenomena related to combustion [7]

The following part of this subchapter provides a deeper insight into the complex fluid dynamic and thermodynamic processes in a combustion chamber. As in 1.1 subchapter turned out, combustor is the heart of gas turbine engines and it has the challenging task of preparing air by raising its power capacity before turbine extracts the energy from the flow of heated gas. Since the air from compressor enters the combustor at around 150 m/s, which is a high velocity for stable flame, the first step is to decelerate it and rise its static pressure in the diffuser. After this, the airflow is split up by the liner. One part of the stream flows through the liner and casing towards the dilution holes, this region is called annulus. The leftover part of the flow enters the mixing chamber. The maximum speed in which kerosene can burn at normal fuel-air ratio is only between 5–10 m/s. If the fuel is in liquid phase, it must be atomized and vaporized with use of special injectors to ensure uniform, homogenous flames and to keep the burning efficiency high. Fuel and air is assumed to be mixed in molecular level and they share same mean velocity, pressure and temperature field. Applying swirler in the mixing chamber, the airflow,

around the fuel nozzle, is further decelerated, the air-fuel mixing is more efficient and a stabilized zone is created, where the enthalpy of hot recirculating gas maintains the flame without using spark ignition again. After mixing, fuel is partially burned in the recirculation zone, but some amount of fuel will not burn completely. The remained fuel quantity will finally burn in the intermediate zone. The hot gases will be then mixed with cooling air in the dilution zone and provide a suitable TIT at the exit of combustor. Dilution holes protect the chamber wall with entering fresh air from severe heat damage, feed and guide the flames towards the outlet.

Considering the mentioned processes above, combustion chamber can be divided into three main sections as shown in **Figure 3**:

- Primary zone (mixing chamber) provides enough time and space for the fuel and air to mix and ignite;
- Secondary zone (intermediate zone) helps to achieve full combustion, thus the level of CO, NOx and UHC (unburned hydrocarbons) can be reduced;
- Tertiary zone (dilution zone) reduces sufficiently the temperature of hot gases for the turbine blades [1][8].

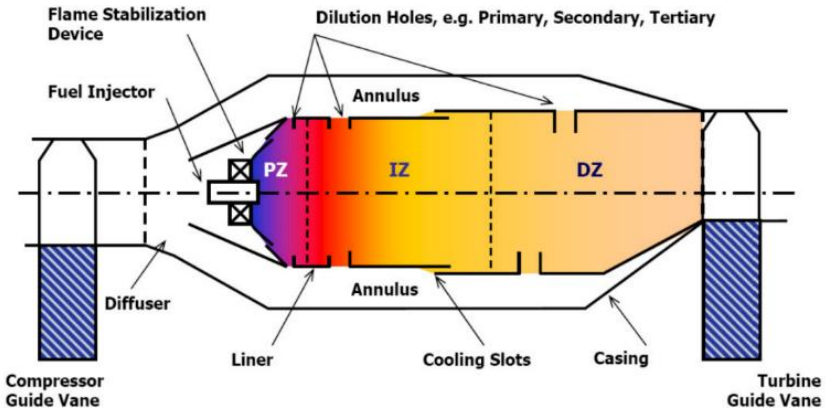


Figure 3 Cross-section scheme of a combustion chamber [8]

After these considerations, we can make the following assumptions as combustion-theory requirements:

- Fuel will ignite only after the injection and evaporation;
- Primary zone is for injection and mixing while the secondary zone is the main region of combustion where the highest proportion of fuel is consumed by the flames;
- Inner wall of combustor is protected against heat damage by cooling air entering through dilution holes along the chamber wall;
- Combustion occurs only in the inner region of combustor and the outer casing remains at ambient temperature;
- Temperature outlet profile is almost uniform and homogenous;
- Temperature of combusted gases leaving the chamber is low enough to avoid the structural disintegrity of turbine blades;

As we can see, combustion is a complex subject which requires the knowledge of many subdisciplines such as physics, chemistry, fluid dynamics and thermodynamics. Thus engineers have to take into account a wide range of complex phenomena presented in **Figure 2**. Although,

theories and empirical models for turbulent combustion have been created since many decades, the practical use was restricted by the limited computational resources available [9].

1.3 Computational Fluid Dynamics and combustion modelling

From the second part of the 20th century, due to the fast evolution of computer technology and the expectations from the side of industry, the numerical techniques for fluid flow, or in other words Computational Fluid Dynamics (CFD), have become the primary method for solving fluid dynamic problems in engineering sciences. It was originally developed for nuclear and aerospace purpose, but nowadays this the most efficient way of saving cost, capacity and time not only in case of nuclear, aerospace or automotive industry but also in the field of turbo machinery, manufacturing processes, security and building technology, nuclear power, meteorology, environmental protection, astronomy and even in medicine [1][8][10].

CFD solvers are based on the finite volume method in most of the cases which means, the investigated fluid domain is discretized into a set of control volumes (called cells). The general conservation or transport equations for mass (continuity equation), momentum (Navier-Stokes equation), energy, etc. are discretized into a system of algebraic equations which is then solved numerically on this set of control volumes to render the solution field. The need for such and approximated solution is that although the mentioned governing equations, which form a system of nonlinear partial differential equations, have been already known since 150 years, they do not have closed form solution over any kind and size of general and complex flows. Because of this fact, CFD intends to replace the governing equations with numbers, and advance these numbers in space and time in order to obtain a numerical representation of a given flow field but this method usually requires high performance computational technique [10][11].

Turbulence is a chaotic phenomenon in the flow field, when the flow characteristics fluctuate in time and space. This can have a significant effect on the results and can be fully described by the Navier-Stokes equations. Taking into account the turbulence, with statistical averaging and with different turbulence models, the nonlinear partial differential equations can be closed, following the Boussinesq approximation, and numerically solved.

The combustion process can be simulated in CFD, but to describe the fluid accurately, some data such as temperature, pressure, density, velocity and mass flow must be known. Basically, they can be calculated by the governing equations but in case of realistic combustion approach, they have to be completed with reaction kinetic models for the correct flame formation, pollutant models for incomplete combustion, discrete phases models for multiphase flow and particle tracking, heat transfer and radiation models for thermal phenomena and in certain cases with ignition models to initiate the combustion. In terms of reaction kinetic models, combustion depends directly on the mixing process and chemistry. Fast chemistry is limited by the mixing whereas slow reactions are restricted by chemical kinetics. Damköhler-number (D_a) relates the reaction time scale to the convection time scale but it is also defined as the ratio of flow time scale to the chemical time scale [8][10].

If $D_a >> 1$ chemical reaction is faster than the turbulent mixing but in case $D_a << 1$ turbulent mixing plays the main role. In combustion modelling premixed and non-premixed flames can be distinguished regarding when do oxidizer and fuel meet. In case of premixed flame, the

reagents meet each other before the combustion and are used in smaller applications such as internal combustion engines or ovens, however, non-premixed flames occur rather in industrial applications for example in gas turbine engines. [1] Based on the considerations above, CFD offers a huge variety of combustion models and some of them are presented and compared in **Table 1**. PDF Flamelet Model has been used in the present work due to its favourable characteristics for modelling reaction kinetics in gas turbine combustion chamber.

	Volume models			Flame models		
Reaction models	**Eddy Dissipation Model**	**Finite Rate Chemistry Model**	**Combined EDM-FRCM Model**	**PDF Flamelet Model**	**Burning Velocity Model**	**Extended Coherent Flame Model**
Flow	turbulent	laminar or turbulent	turbulent	turbulent	turbulent	turbulent
Reaction speed	fast (Da>>1)	slow (Da<<1)	fast and slow	fast (Da>>1)	fast (Da>>1)	fast (Da>>1)
Mixing	non-premixed	premixed	premixed or non-premixed	non-premixed	non-premixed or partially premixed	premixed and partially premixed
Model features	• Reaction speed depends on mixing time • Mixing time influenced by vortices • Mixing at molecular level • No kinetic control • Avoid expensive Arrheinus equation calculation	• Reaction speed depends on chemistry • Reaction rates are described by component interactions • Reaction rates are determined by Arrheinus equation calculation	• Mixing time and reaction rates are computed and the smaller is utilized	• Combustion on a thin surface called flamelet • No influence of chemical reaction • Use of probability density function (PDF) • Use of precalculated modes	• Flow field is split up burnt and unburnt mixture • Turbulent flame speed correlation • Flame position is determined directly • Turbulent fluctuations • Use of PDF • Use of flamelets	• More sophisticated • Describes extensive and coherent flame, transient combustion process • Transport equation for flame surface • Steady flame
Application	gas phase and coal combustion	gas furnace	liquid combustion	gas turbine combustion chamber	Bunsen burner flame	internal combustion engine

Table 1 Comparison of different combustion models available [7][12][13]

The difficulty of combustion modelling lies in the size. It is called "the computational spatial-scale dilemma" which implies the dynamic range of scales that must be resolved accurately [14]:

- scale of combustor: 10–100 cm;
- large eddies in real combustors: 1–10 cm;
- small-scale mixing occurs at: 0.1–10 mm;
- droplets with distinct identity: 1–100 μm;
- molecular or chemical processes: 0.1–1 nm;

Research and development studies are being released more and more frequently which show the importance and increasing spread of CFD tools in the field of combustion analysis:

In [15] a 2D axisymmetric model of gas turbine combustion chamber was used to investigate the effect of Swirl-number on different multi-objective optimization process such as combustion efficiency, emission, pattern factor and entropy generation minimization. The design criteria of selecting the optimal Swirl-number was discussed in detail and the results were validated with Sydney Swirl Flame Database SM1. According to the results, a region of high swirling flow inside the combustor was identified which is attached to the swirler and characterized with high Swirl-number. Inside this structure there is a region of negative axial velocity and this region is called the internal recirculation zone. High Swirl-number causes high shear zones near the dome walls, hence flame surface is anchored to this region.

In [16] the possibilities of hydrogen fuel, as alternative, renewable and environmentally friendly energy source, was investigated in gas turbine combustion chamber, which does not cause greenhouse gases, ozone layer depleting chemicals, acid rain ingredients or pollution. As it turned out from the results, contrary to the conventional fuel combustion, the high temperature zones are all at the rear of combustion chamber and formation of NOx happened there, and not near the flames in the middle of the chamber.

In [17] the emission formation using Large Eddy Simulation was successfully reproduced in an industrial gas turbine burner at pressure under laboratory conditions. Large Eddy Simulation turbulence approach allows the analysis of a more detailed turbulent combustion close to the reality. Also the influence of radiation heat losses was investigated and the impact of an alternative four-step chemical mechanism was discussed. The results clearly showed that the thermal radiation has a significant effect on the NOx formation rates as well as on the flame width and structure.

[18] describes an investigation of "micromix" hydrogen combustion with different combustion models. In this technology, gaseous hydrogen is injected through miniaturized injector nozzles perpendicularly into the air flow. This study helps understanding the flow phenomena related to micromixing, reaction zone, flame and NOx formation in the combustor. According to the results, miniaturized micro flames developed and anchored at the burner edge of injector nozzle. Reacting time and averaged molar formation of NOx can be reduced significantly with this type of injection technic. In comparison of different combustion models, Eddy Dissipation Concept showed better agreement against Eddy Dissipation Model or Eddy Dissipation Model – Finite Rate Chemistry model results.

[19] presents a method of experimentally analysed non-stationary thermoacoustic oscillations that can be applied in high-pressure liquid-fuelled gas turbine combustors. The objective of this study was to identify transient regions in which oscillations are being driven or damped based on the dynamics of phase difference between heat release rate and pressure fluctuation. The results allow to study the combustion behaviour inside a liquid-fuelled gas turbine combustor and the temporal evolution of the local phase difference between heat release rate and pressure.

In [20] the focus of the numerical analysis was the fluid dynamics at the combustor – turbine interface and its impact on the turbine blades in case of Cyclone gas turbine. Results were evaluated in

terms of their consistency with temperature indicating point observations obtained during the engine development tests. According to the results, the presence of a highly rotating vortex core was indicated in the combustor. This core is in strong relationship with high temperature peak which is seen to be drawn over the suction surface of the first turbine blades. It is being attracted by the low static pressure in this region but migrates towards the hub through the vane passage.

In [13] a three-dimensional gas phase combustion was modelled in a tubular combustion chamber. The main goal of this investigation was to compare the effect of four different combustion models such as Eddy Dissipation Model, PDF Flamelet model, Burning Velocity Model and Fluent Non-Premixed with real tests. The most accurate results were calculated by Fluent Non-Premixed model and the time-consumption of this combustion model was nearly ten times less than in case of the other models.

2. PROBLEM SOLVING IN CFX

Ansys CFX has been used in the present work to perform coupled fluid dynamic and heat transfer simulations. It is a high-performance fluid dynamics software for general purpose, which has been used for over 20 years to solve a wide range of continuum based engineering problems. The mesh has been generated in the software environment also which provides more opportunities and high level of flexibility for creating appropriate mesh even for a complex geometry such as an annular gas turbine combustion chamber. CFD tools for analysing fluid flow problems can be applied only in case the flow characteristics meet the continuum mechanic requirements. In other words, the Knudsen-number should be smaller than 0.01. In this study the Knudsen-number has been estimated by using the flame temperature and related pressure values (marked by *), based on the results of a very similar CFD analysis [1], in the following way [21][22]:

$$\boldsymbol{Kn} = \frac{\lambda}{L} = \frac{2.005 \cdot 10^{-7}}{0.0001} = \mathbf{0.002} < 0.01 \tag{5}$$

where

mean free path of molecules:

$$\lambda = \frac{R \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot {d_a}^2 \cdot A \cdot p} = \frac{8.3145 \cdot 2090}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot (3.57 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 254200} = 2.005 \cdot 10^{-7}\, m \tag{6}$$

smallest size of mesh elements: L = 0.0001 m gas low constant: R = 8.3145 $\frac{J}{mol \cdot K}$ *flame temperature: T = 2090 K *total pressure (related to flame temperature): p = 254200 Pa averaged molecule diameter: $d_a = 3.57 \cdot 10^{-10}\, m$ Avogadro's number: $A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$

2.1 Geometry and mesh

The investigated model (see **Figure 4**) is the annular combustion chamber of a modified TSz-21 starting gas turbine for MiG-23 or Szu-22 military aircrafts used in the Hungarian Army. Nowadays it is used for research purpose under the name of TKT-1 gas turbine on the Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles at the Budapest University of Technology and Economics. The CAD model of this engine component was available by [1].

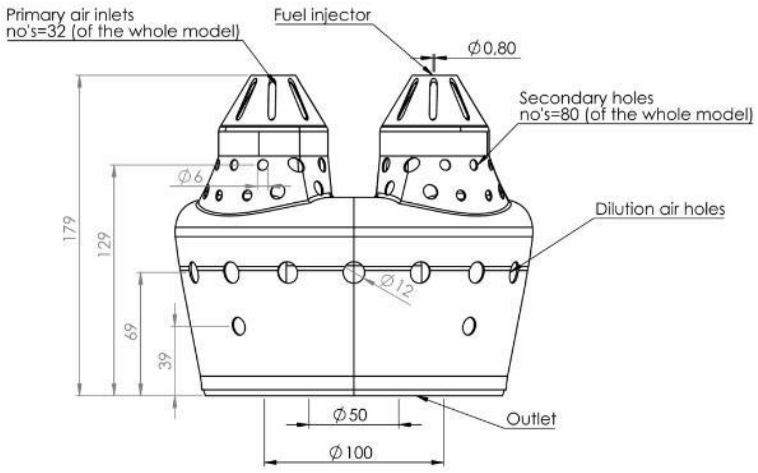


Figure 4 Geometry of investigated combustion chamber [1]

There are several possibilities for selecting the suitable segment of investigated geometry:

- ✈ analysis in 2D in the cross-section plane of injector;
- ✈ analysis in 3D with a segment angle smaller than 90°;
- ✈ analysis in 3D with segment angle 90° (quarter geometry);
- ✈ analysis in 3D with segment angle 180° (half geometry);
- ✈ analysis in 3D with segment angle 360° (whole geometry).

It is obvious, that the whole geometry would provide the most realistic results and considering the lower and lower sizes model in the list more and more simplification, inaccuracy and error will be involved in the simulation. Due to time and computational capacity restrictions, only the quarter and half geometry cases have been profoundly investigated in this work.

The numerical mesh must be able to handle the various phenomena related to combustion mentioned in 1.2 subchapter. Tetragonal, non-structured mesh has been generated in order to capture the complexity of the geometry (thin metal sheets close to each other with small holes) and reduce the meshing time. The fuel is injected on a small circular surface so there must be used the smallest mesh elements with maximal edge length of 0.1 mm. There will be generated enough cells (more than 30) for the entering the fluid phase. In primary and secondary zone the mesh must be fine (1 mm) so that the mixing and combustion process can be simulated with high accuracy. Near the solid walls the effect of boundary layer must be taken into account to describe the flow correctly. It demands a short preliminary calculation [21] with volume-averaged temperature (880 K), volume-averaged total pressure (259,784 Pa) and averaged stream velocity (50 m/s) values originated from [1]. The length of combustion chamber is 0.18 m and the target of dimensionless distance of the wall in the first cell is 1. Thus the Reynolds-number:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{50 \cdot 0.18}{4.33 \cdot 10^{-5}} = 207971.57 \tag{7}$$

the first cell height:

$$y = \frac{y^{+} \cdot \nu}{U_{\tau}} = \frac{1 \cdot 4.33 \cdot 10^{-5}}{2.5} = 1.73 \cdot 10^{-5}\, m = 0.0173\, mm \tag{8}$$

and the boundary thickness:

$$\delta = 0.035 \cdot L \cdot Re^{-\frac{1}{7}} = 0.035 \cdot 0.18 \cdot 207971.57^{-\frac{1}{7}} = 0.0011\, m = 1.1\, mm \qquad (9)$$

In case of quarter geometry, the global volume was meshed with 5 mm large mesh elements but at certain parts of the domain, such as primary zone, secondary zone and dilution holes, mesh refinement (1 mm) was applied. An inflation layer was added near the wall with 1.2 mm height (calculated by (9)) and consists of 7 sublayers with 1.5 growth rate. From the simulation results turns out that the real thickness of boundary layer near the wall is corresponding with the calculated value (1.2 mm). The final mesh (see **Figure 5**) was built up from 7,503,619 elements and contains 2,173,562 nodes.

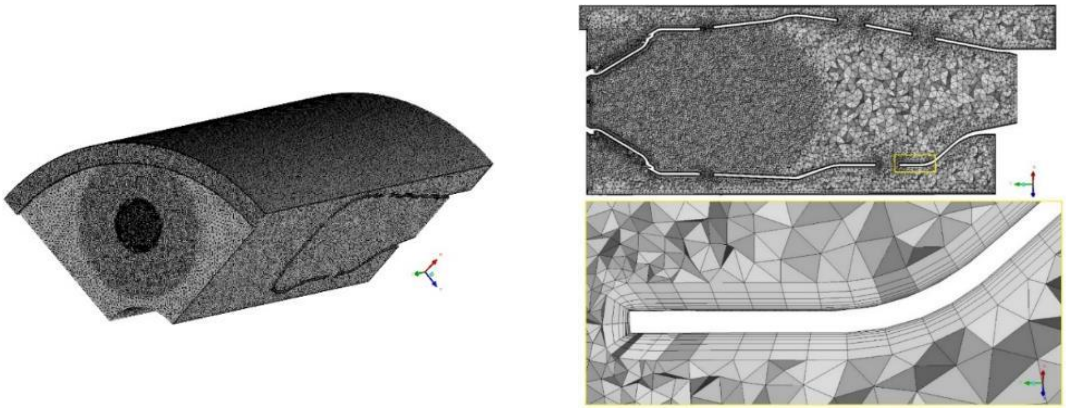


Figure 5 Final mesh of quarter geometry (left) with refinement and inflation layers (right)

The quality of mesh was rated by the worst angle of each mesh element on a scale [0-1], where the accepted angle is considered to be between 30° and 150°. According to the mesh qualification, the mean quality is 0.74 which is acceptable for further investigation. The worst elements are situated in the primary zone, concerning the inlet air holes and swirler sheets. This area is the critical part of the geometry which requires really fine mesh with higher computational capacity. Although mesh sensitivity analyses are going to be completed as a next step of the present work, the used mesh has the best quality that could be reached at this time with considering the available computational resources.

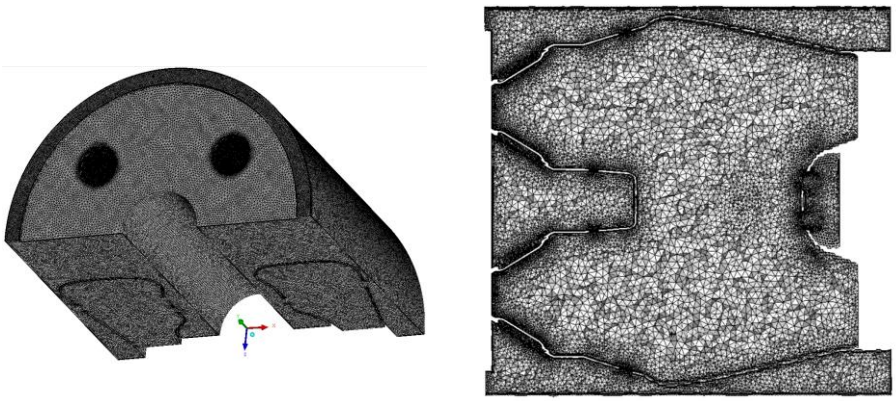


Figure 6 Final mesh of half geometry (left) without refinement (right)

In case of half geometry, the same mesh element-sizes were used with one difference: due to computational capacity limits, mesh refinement could not be applied in the primary and secondary zone and the boundary layer near the walls was split up only for 5 sublayers. Sensibility investigations should be carried out in this case also with higher computational capacity to reveal the

effect of different mesh configuration on the results. The final mesh (see **Figure 6**) was built up from 9,767,342 elements and contains 2,801,512 nodes. The mean quality is 0.7 thus the mesh is in the acceptable range.

2.2 Setting up the simulation

The first step is to define the fuel and the reaction kinetic mechanism. Jet-A (kerosene) was selected for fuel, which can be describe in CFX as a surrogate: 60% n-decane (N $C_{10}H_{22}$) and 40% trimethylbenzene (TMB C_9H_{12}). An ideal combustion was assumed without NOx emission. The reaction kinetic equations, which govern the complex kerosene combustion processes and involve every single element and side product, are collected in [6]. The software performs a short calculation (oxidizer-fuel fraction, stoichiometric mixture ratio and composition of combustion product) with use of Flamelet Library and writes the reaction kinetic results in a file.

The second step is to create a gaseous reacting mixture to make burning happen. The file of preliminary calculations, written in the previous step, here can be referred to specify the burning process.

Next step is to couple the liquid and gaseous phases of the fuel by creating a homogenous binary mixture and define the evaporation process with the Antoine-equation coefficients. Evaporation has a significant influence on the combustion since the fraction of each reagents depends on it. In other words, the behaviour of combustion and the flame position is determined by these values. Instead of wasting time to find experimentally the proper coefficients through numerous tests and sensibility simulations, the estimated values have been taken from [23]. With the use of Liquid Evaporation Model, one of the two mass-transport equations will be solved depending on the case if the droplets are above or below the boiling point.

Type of domain	Fluid
Content	Gas mixture and vaporized fuel droplets
Reference pressure	99.75 kPa
Turbulence model	k-ε
Turbulence intensity	5 %
Heat transfer model	Total enthalpy
Combustion model	PDF Flamelet
Thermal radiation model	P 1
Primary break up	Blob method
Secondary break up	Schmehl
Droplet surface tension coefficient	0.026 N/m
Droplet and gas mixture interaction	Fully coupled
Drag force model	Schiller Neumann

Table 2 Applied models and properties of the domain

The Antoine-equation (see equation (10)) determines that the state is above or below the boiling point. Droplets change their phase if the vapour pressure (P_{vapour}) is higher than the ambient pressure:

$$P_{vapour} = P_{scale}^{\left(A-\frac{B}{T+C}\right)} \tag{10}$$

where

- P_{scale}: pressure scale to adjust the pressure unit (1 Pa);
- A: Antoine reference state constant (53.3);

- B: Antoine enthalpy coefficient (5600 K);
- C: Antoine temperature coefficient (25 K);
- T: vaporization temperature.

Afterwards, material properties, reference values, physical settings and boundary conditions are applied on the model (see **Table 2**).

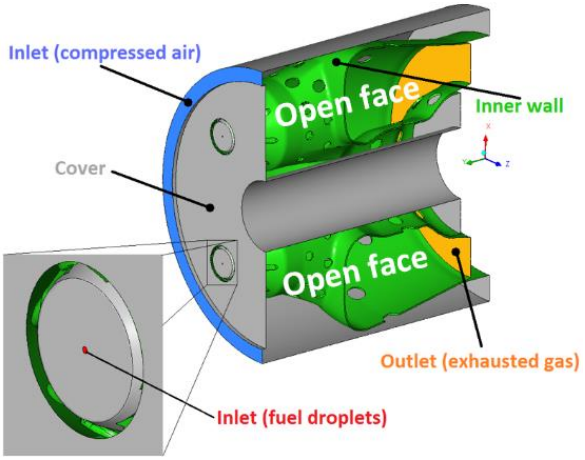


Figure 7 Defined boundary surfaces of the domain

K-epsilon turbulence model is used in this work based on the results of [8]. In this thesis, the effect of different turbulence models, such as k-ε, k-ω, SST-k-ω and RSM, were investigated on a 3D, swirling, recirculating combustion process in a can type of experimental combustor. The results were compared to measurement data as well. As it turned out, k-ε model is the most acceptable approximation of the combustion process with same boundary conditions. In addition, k-ε model provides converged results in less iteration steps than the other models.

Boundary name	Type	Condition
Air inlet	Inlet	Subsonic flow Total pressure: 171723 Pa Flow direction vector: [0.418; –0.82; 0.387] Total temperature: 421.7 K Material: oxidizer
Fuel inlet	Inlet	Subsonic flow Flow direction: Normal to boundary Flow velocity: 12 m/s Mass flow rate: 4.84 g/s Particle diameter: 0.0001 m Static temperature: 299.6 K Material: fuel
Outlet	Outlet	Subsonic flow Mass flow rate: 0.25 kg/s (quarter geometry) Mass flow rate: 0.5 kg/s (half geometry)
Inner wall	Wall	No slip Smooth Adiabatic heat transfer
Cover	Wall	No slip Smooth Heat transfer coefficient: 8 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ Outside temperature: 299.6 K
Open faces	Interface	Rotational periodicity around the longitudinal axis (Y)

Table 3 Applied boundary conditions of the domain

The next step was defining the boundary conditions (see **Table 3**) on each boundary surface (see **Figure 7**) based on [1] and [24].

The last step is setting up the solver (see **Table 4**), completing the initialization and running the calculations.

Advection Scheme	High resolution
Turbulence Numerics	First order
Number of iteration	Maximum 1000
Timescale	At beginning: physical (0.01 s); With stabilized results: local (factor 30)
Residual type	RMS
Residual target	10^{-4}
Convergence criteria	1%

Table 4 Applied settings for the solver

Four parameters are created as monitoring points which provide useful information about the fluid flow, thermodynamic processes and convergence during calculation: Maximal temperature (Tmax), Volume-averaged temperature (Tvolume), Area-averaged temperature in the outlet surface (Toutlet) and Area-averaged temperature on the inner wall (Twall).

At combustion analysis, cold flow simulation is a commonly used step before main simulations. In this case, every boundary condition is applied similarly to the main simulation, but combustion and thermal radiation model are switched off. On the one hand, switching on boundary conditions gradually, makes convergence easier and faster. On the other hand, having a closer look at the streamlines without combustion, can reveal any anomaly or discrepancy in the flow field. It can imply incorrect geometries or mesh and even a wrongly defined or missing boundary condition. Because of these reasons, also a cold flow simulation was implemented in this work with quarter geometry before the main calculations.

2.3 Presentation of results

Consistency, stability and convergence play an important role in verification of numerical results. The outcome of a CFD simulation is acceptable for further engineering application if these three properties are proved mathematically. Consistency means that the simplified algebraic equations, which are solved during numerical calculations, capture the content of original nonlinear partial differential equations. Stability proves the fact, that during calculation the numerical result approaches certain values and the difference between each resulted parameters, during the iteration steps, if they are the cases, tends to zero. Convergence ensures that the difference between the exact and numerical solution stays limited during calculation (numerical error does not increase) [11].

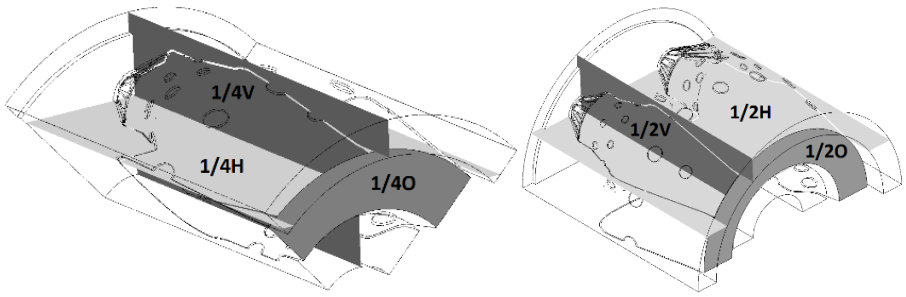


Figure 8 Defined inspections planes for quarter (left) and half geometry (right)

In the following sub-subchapters, the outcome of each CFX simulation will be presented. The results are displayed in 3D view and also with use of perpendicular inspection planes defined in **Figure 8**.

2.3.1 Cold flow results

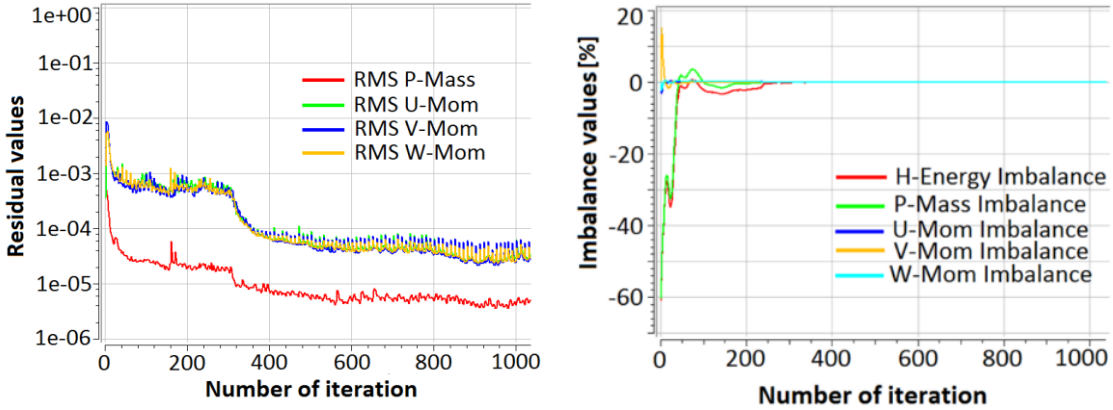


Figure 9 Residual (left) and imbalance curves (right) of cold flow simulation

According to **Figure 9** the imbalance curves ascertain the convergence: each parameter went well below 1% which means the mass, momentum and energy conservation target (after 250 iteration steps) are reached. The residual target of 10^{-4} (after 380 iteration steps) is also reached as well.

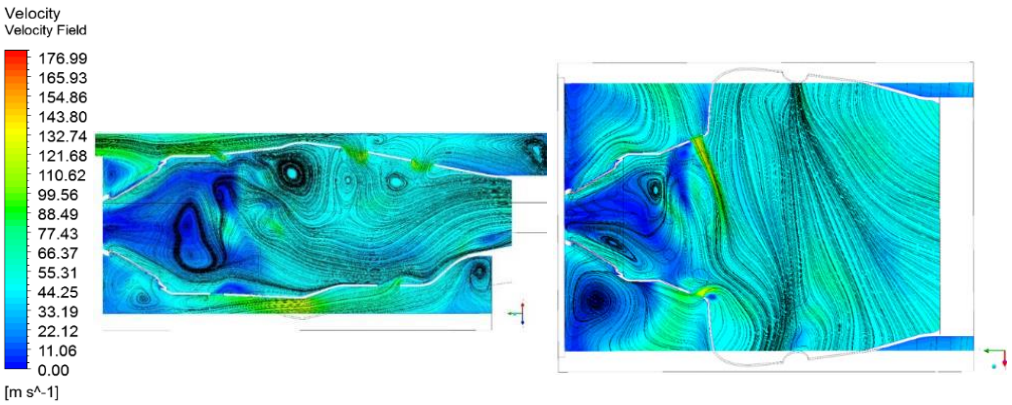


Figure 10 Surface streamlines in 1/4V (left) and in 1/4H (right) planes in case of cold flow

Figure 10 shows the surface streamlines and the velocity field in the background. The prominent feature of this view is the vortex system caused by the complex geometry. The biggest vortices in the primary and secondary zones help the compressed air to slow down (from 100 m/s to 10–20 m/s) and to mix with the vaporized fuel droplets however, the smaller vortices in the corners, between casing and inner wall, are unwanted since they cause pressure loss. There is a temporary velocity increase (130 m/s) around the holes as the air flows through them. It can be clearly seen that the incoming air from compressor is divided correctly into different passages and provides sufficient supply for the chamber in each zone. Due to the lack of combustion and expansion, a dominant flow direction is missing.

2.3.2 Quarter geometry results

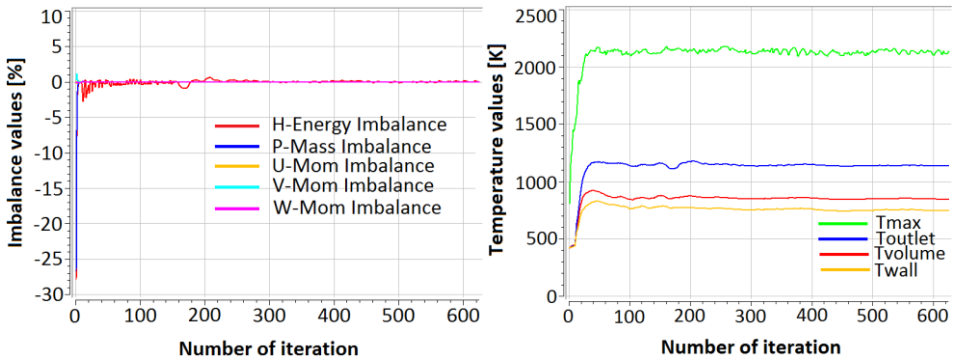


Figure 11 Imbalance (left) and temperature curves (right) of quarter geometry simulation

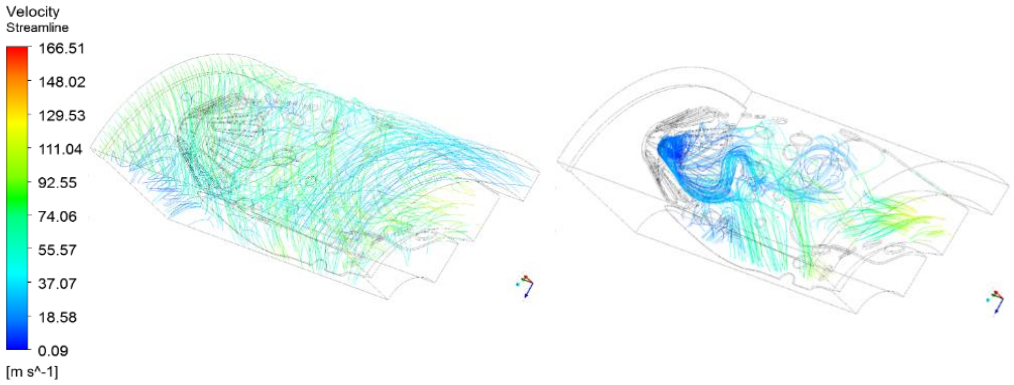


Figure 12 Spatial streamlines of air (left) and fuel (right) of quarter geometry simulation

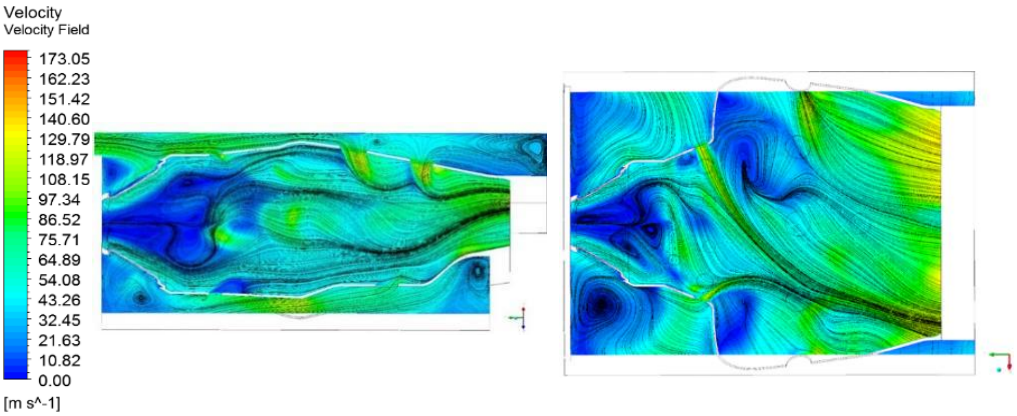


Figure 13 Surface streamlines in 1/4V (left) and in 1/4H (right) planes

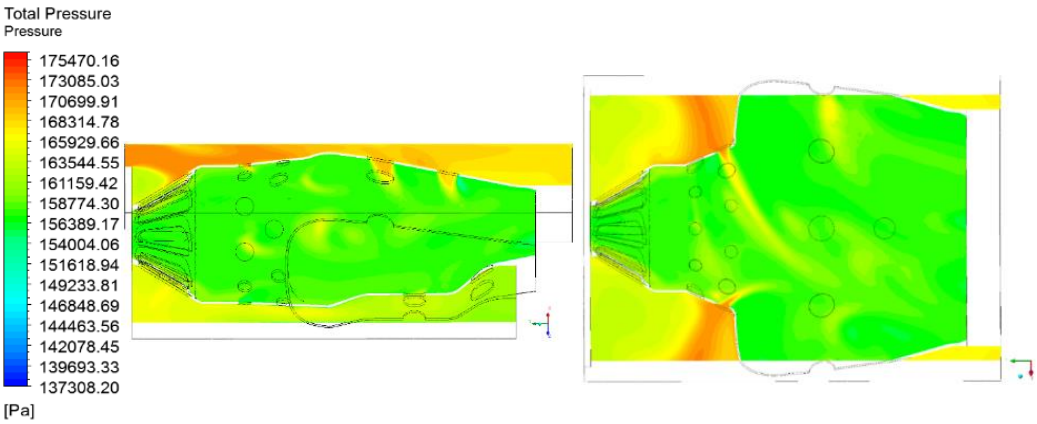


Figure 14 Relative total pressure distribution in 1/4V (left) and in 1/4H (right) planes

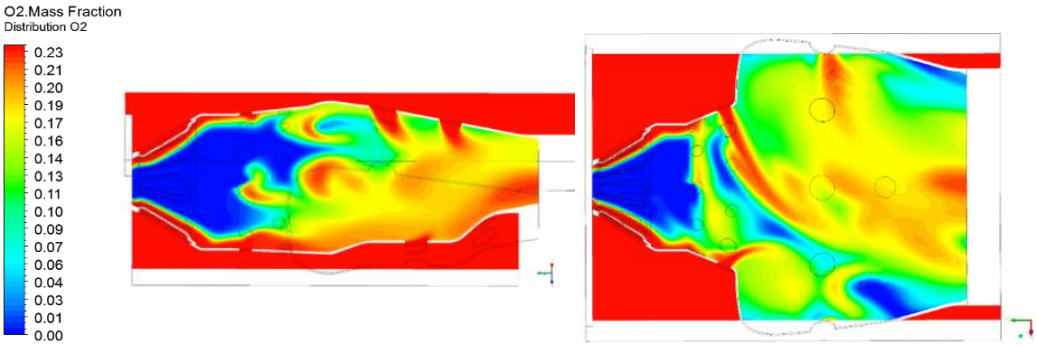


Figure 15 Oxygen distribution (mass fraction in %) in 1/4V (left) and in 1/4H (right) planes

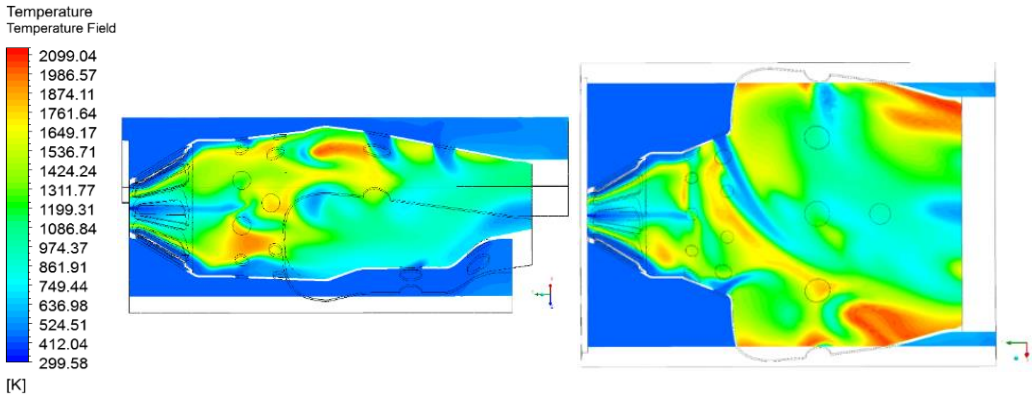


Figure 16 Temperature distribution in 1/4V (left) and in 1/4H (right) planes

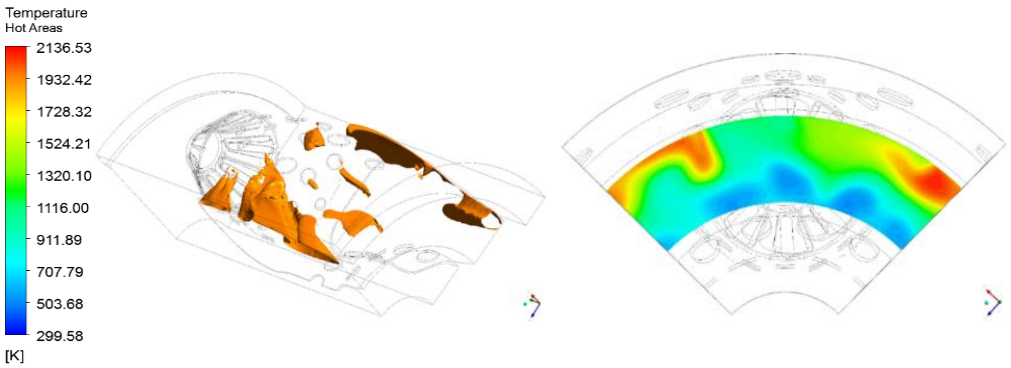


Figure 17 Hot areas (left) and temperature distribution in 1/4O plane (right)

In **Figure 11** the imbalance curves of mass, momentum and energy went below 1%. The area-averaged temperature of inner wall, outlet section and the volume-averaged temperature show clear convergence, the maximal temperature has some minor, continuous fluctuation. In spite of this minor uncertainties, the residual curves converged under the value of 10^{-4} (after 180 iteration steps). The outcome of this simulation is found to be acceptable considering the results as a snapshot of the transient combustion process which is always in change.

Figure 12 shows the spatial streamlines of compressed air and fuel coloured by velocity magnitude in the combustor. The swirler sheets in the primary zone seem to work efficiently as it causes the air slowing down, swirling and helping the vaporized fuel and air to mix each other.

Figure 13 displays surface streamlines and the velocity field in the background. The important bigger vortices and the unwanted smaller vortices can be localized similarly to the cold flow results. The flow shows dominantly axial direction with remarkable velocity increase (around 100 m/s) at the outlet due to the expansion process.

Figure 14 presents the pressure field and gives an explanation for the presented streamlines. As the fluid moves from the higher-pressure inlet to the lower-pressure outlet, it suffers from pressure loss due to collision, friction, separation and swirling. It can be taken into account as $\sigma_{\frac{1}{4}}$ pressure loss factor or $r_{\frac{1}{4}}$ pressure recovery factor which are one of the most important aerodynamical features of a combustion chamber:

$$\sigma_{\frac{1}{4}} = \frac{(\text{surface-averaged total pressure at inlet}) - (\text{surface-averaged total pressure at outlet})}{(\text{surface-averaged dynamic pressure at inlet})} = \\ = \frac{271430\ Pa - 256958\ Pa}{8493\ Pa} = 1.704 \tag{11}$$

$$r_{\frac{1}{4}} = \frac{(\text{surface-averaged total pressure at outlet})}{(\text{surface-averaged total pressure at inlet})} = \frac{256958\ Pa}{271430\ Pa} = 0.947 \tag{12}$$

Figure 15 reveals the O_2 mass fraction along the flow domain. It confirms the fact that the fuel-air mixing happens sufficiently in the primary and secondary zone and allows to localize the flames where the stoichiometric mixture appears and O_2 mass fraction has a sudden change to zero. Burning occurs on the periphery of blue areas where O_2 is consumed by the flames. The lack of enough amount of cooling air can also be clearly seen in the dilution zone which will cause too high temperature at the outlet.

Figure 16 provides more information about combustion and flame structure in the combustor. The cooling air entering through the dilution holes contributes to the wall protection against heat loads. Even though combustion occurs not only in the secondary zone, the highest temperature flames are anchored to the wall and touching the outlet section as well. Another interesting feature is that the flames return almost to the fuel injection point along the swirler sheets. This implies the fact, that the Antoine-equation coefficients need more refinement in order to delay and describe the combustion process more accurately. The maximal flame temperature of the domain is 2137 K.

Figure 17 shows the flame position near the wall and localizes the high-temperature (2000 K) regions close to the interfaces with rotational periodicity. The temperature distribution in the outlet section is found to be less uniform due to the high temperature peaks. The area-averaged temperature on this surface is 1136.97 K and considering the almost constant tendency of its convergence line, the relative error is 13.7% compared to the expected value of 1000 K used in the preliminary redesign phase. [1]

2.3.3 Half geometry results

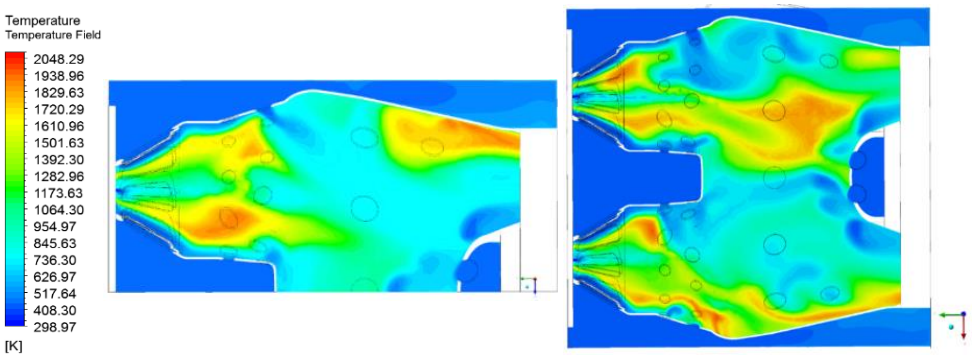


Figure 18 Temperature distribution in 1/2V (left) and in 1/2H (right) planes

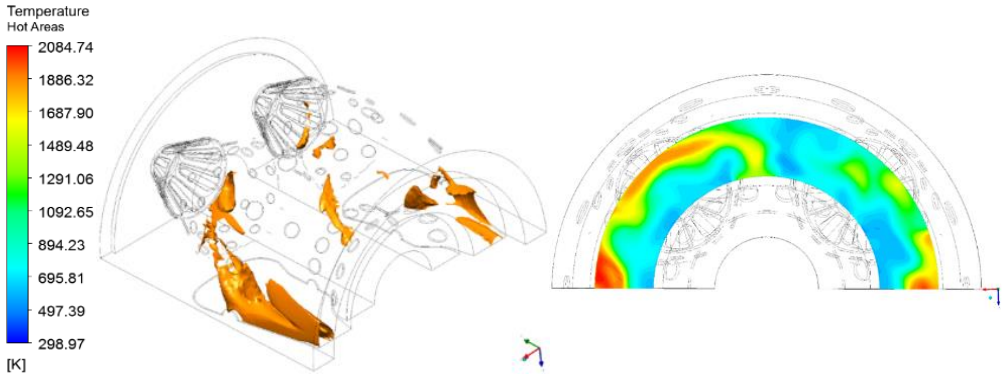


Figure 19 Hot areas (left) and temperature distribution in 1/2O plane (right)

The geometry is doubled, it has rotational periodicity with 180° in the presented simulation case. Spatial streamlines of air and fuel, surface streamlines with velocity field, pressure field and Oxygen mass fraction along the fluid domain show similarities to the quarter geometry results. Bigger amount of cooling air remains in the secondary and dilution zones thus there will be lower temperature peaks at the outlet. The pressure loss factor and recovery factor are:

$$\sigma_{\frac{1}{2}} = \frac{271420\ Pa - 255470\ Pa}{8498\ Pa} = 1.877 \tag{13}$$

$$r_{\frac{1}{2}} = \frac{255470\ Pa}{271420\ Pa} = 0.941 \tag{14}$$

Figure 18 displays a more concentrated flame structure which is closer to the ideal combustion features described in 1.2 subchapter. However, combustion develops in the secondary zone, the flames return almost to the injection point thus the combustion process must be fined by the coefficients of Antoine-equation. The maximal flame temperature of the domain is 2085, it is more than 50 K lower than in case of quarter geometry.

Similarly to the quarter geometry results in **Figure 19**, flames are anchored to the wall and the high-temperature (2000 K) regions are situated close to the interfaces of rotational periodicity. The temperature distribution in the outlet section is found to be more uniform due to the lower temperature peaks. The area-averaged temperature in this section is 1037.55 K thus the relative difference is only 3.8% compared to the expected value of 1000 K used in the preliminary redesign phase [1].

2.4 Plausibility check and verification of the results

The goal of the plausibility check and verification is to ensure the correctness of the used method and decide whether the quarter or half geometry simulation provides closer result to a combustion process in a gas turbine engine. Due to the lack of detailed combustion chamber measurement, three different sources have been used to check and verify the presented results.

The video of Yyang CFD Studio [25] gives an insight into a transient combustion process with a very detailed Large Eddy Simulation. All characteristics of an expected combustion (see in 1.2 subchapter) can be found in this video thus it is suitable to check the plausibility of the presented results.

In the both simulations presented in this article, there is a pair of remarkable vortex in the secondary zone that enhances the fuel-air mixing and maintains the flame. The cooling air entering through dilution holes form typical cooler air-sleeves in the hot gases. Additionally, it protects

the wall efficiently against heat damage however, flames tend to anchor to the wall. The combustion occurs only in the inner part of the chamber and flames do not reach the outer regions so casing is not loaded thermally. In case of half geometry simulation, flames have a more concentrated structure similarly to the video. The temperature distribution at the outlet is more uniform with lower temperature peaks and smaller hot-spot areas close to the video results.

As far as concrete temperature and pressure values are concerned, the results of [10] must be considered. In this Master thesis, the quarter geometry of main parts of the original TKT-1 research gas turbine engine was separately investigated with CFD tool and measurements. Methane was used as fuel that shows similar burning characteristics to kerosene.

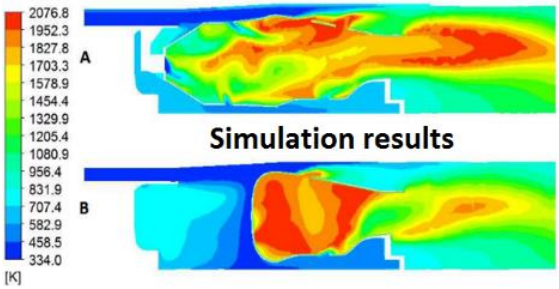


Figure 20 Temperature distribution for verification [10]

Measured and simulated results [10]		
Interfaces	Total Temperature [K]	Total Pressure [Pa]
Ambient-Intake (Measured)	299.6	99755.6
Intake-Compressor (Measured)	299.5	99409.5
Compr.-Combustor (Measured)	414.2	256910
Combustor-Turbine (Simulated)	1008.08	241390
Turbine-Nozzle (Measured)	905.4	114442
Nozzle-Ambient (Measured)	299.6	99755.6

Table 5 Temperatures and pressures for verification [10]

From the view "**A**" of **Figure 20**, as the cross-section of the combustor, it turns out that flames touch the outlet even in this simulation and causes less uniform temperature distribution in that section. Similarly to the presented results, the high-temperature regions are situated near the interfaces and flames are anchored to the wall, as view "**B**" the interface section shows. The maximal flame temperature of the domain is 2076.8 K which means only a 2.9% relative difference compared to quarter geometry whereas half geometry results only 0.4% deviation. The area-averaged simulated temperature at the outlet of the combustor is 1008.08 K (see **Table 5**) thus the relative difference is 12.7% with quarter geometry and only 2.9% with half geometry result. According to **Table 5** the pressure loss factor and pressure recovery factor are better than in the present results which can be explained by the modified geometry and slightly different boundary conditions.

$$\sigma_{ver_[10]} = \frac{256910\ Pa - 241390\ Pa}{8100\ Pa} = 1.92 \tag{15}$$

$$r_{ver_[10]} = \frac{241390\ Pa}{256910\ Pa} = 0.94 \tag{16}$$

In PhD dissertation of [1] the TKT-1 research gas turbine jet engine was redesigned, profoundly CFD analysed, the vanned diffuser is optimized with inverse design method and validated with available measured data. The quarter geometry of combustion chamber is the same that it was

used in this work. Applying similar boundary conditions and fuel, the results are summarized and presented in **Figure 21** and **Figure 22**.

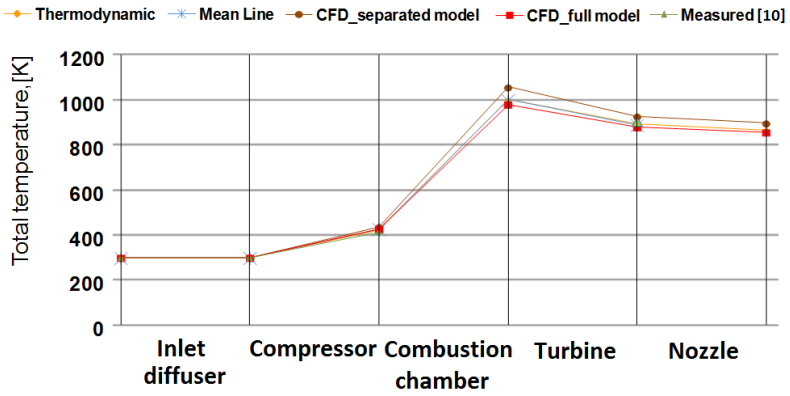


Figure 21 Total temperatures along the TKT-1 research jet engine by [1] for verification

The maximal flame temperature of the domain is 2247 K, thus the relative difference is 4.9% with quarter geometry result, whereas the case of half geometry causes 7.2% deviation. The area-averaged temperature at the outlet is 1056 K which means 7.7% relative difference compared to the quarter geometry simulation but in case of half geometry this difference is 1.8 %.

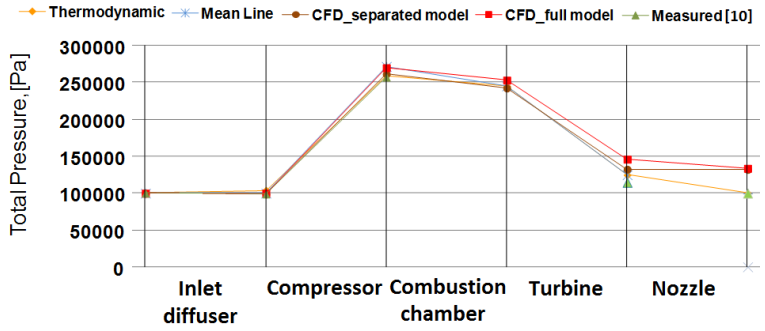


Figure 22 Total pressures along the TKT-1 research jet engine by [1] for verification

Pressure loss factor and pressure recovery factor show similarities with the presented results:

$$\sigma_{ver_[1]} = \frac{271750\ Pa - 254750\ Pa}{8694\ Pa} = 1.955 \tag{17}$$

$$r_{ver_[1]} = \frac{254750\ Pa}{271750\ Pa} = 0.94 \tag{18}$$

Based on the results discussed above, it can be concluded that the presently simulated results are plausible, they are verified by three different approaches. A far as relative differences of the outlet area-averaged temperature of combustion chamber are concerned, the average differences are below 11 %. In case of quarter geometry, this value is

$$\frac{12.7+7.7}{2} = 10.2\% \tag{19}$$

whereas for half geometry it is

$$\frac{2.9+1.8}{2} = 2.4\% \tag{20}$$

Hence, since the later one shows better agreement with the outcomes of the mentioned investigations, it is proposed for future use. However, mesh size and configuration with model and

solver parameter sensitivity analyses should be completed beside measurement based validation as next step of this investigation to recover better the limitations of the present method.

3. CONCLUSION

Coupled fluid dynamic and heat transfer simulations were completed on an annular combustion chamber of a TKT-1 small-sized research gas turbine engine with CFD tool. The main goal of this study is to analyse the combustion process and to find the suitable geometrical configuration which describes accurately and in realistic way the phenomena in gas turbine combustion chamber. Quarter and half segments of the chamber geometry was investigated with same boundary conditions. Considering the summarized results in **Table 6**, the quarter and also the half geometry calculations provided acceptable results as well. However, the outcome of half geometry simulation is found to be more realistic approximation of combustion process regarding verification data and preliminary redesign values. Nonetheless, the weaknesses of the applied mesh, interface boundary condition and evaporation model were also highlighted. The need for mesh refinement and sensibility studies with higher computational capacities were emphasized. It also turned out that not only the properly selected boundary conditions but also the size of the investigated geometry segment has significant influence on the turbine inlet temperature. Hence, further investigations and measurements are desirable to improve the actual results.

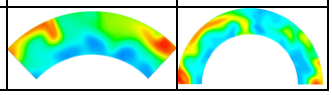
	Quarter geometry	Half geometry	Relative differences for verification by [10] (see Table 5)		Relative differences for verification by CFD results of [1]	
			Quarter	Half	Quarter	Half
Pressure loss factor	1.704	1.877	11.3 %	2.2 %	12.8 %	4 %
Pressure recovery factor	0.947	0.941	0.8 %	0.1 %	0.8 %	0,1 %
Maximal flame temperature	2137 K	2085 K	2.9 %	0.4 %	4.9 %	7.2 %
Outlet area-averaged temperature	1136.97 K	1037.55 K	12.7 %	2.9 %	7.7 %	1.8 %
Relative difference to 1000 K	13.7 %	3.8 %				
Number of mesh elements	7503619	9767342				
Temperature distribution at outlet						

Table 6 Summary of the results with the relative differences

ACKNOWLEDGEMENTS

The present research is partially supported by the Hungarian national EFOP-3.6.1-16-2016-00014 project. The introduced and verified calculation method is carried out to be applied in small aircraft hybrid propulsion system development supported by Hungarian national EFOP-3.6.1-16-2016-00014 project entitled by “Investigation and development of the disruptive technologies for e-mobility and their integration into the engineering education”.

BIBLIOGRAPHY

[1] Foroozan Zare, Dr. Veress Árpád: Advanced Research on Gas Turbine Components – Virtual Prototyping of Jet Engines, PhD dissertation, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2017

[2] Vinod Srinivasa: CFD for Aero Engines, HCL Technologies, 2011, (online), url: https://www.hcltech.com/sites/default/files/resources/whitepaper/files/2011/07/19/CFD_for_Aero_Engines.pdf (04.03.2017.)

[3] P. Meherwan: Gas turbine engineering handbook, Elsevier’s Science&Technology Rights, Texas,USA, 2011

[4] YXLON: Inspecting turbine blades non-destructively, (online), url: http://www.yxlon.de/Applications/Cast-parts/Turbine-blades (04.03.2017.)
[5] Md Abdul Alim: CFD Modelling of Turbulent Combustion and Heat Transfer, Loughborough University Institutional Repository, Loughborough, 2004, (online), url: https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/7639/2/Thesis-2004-Alim.pdf (04.03.2017.)
[6] S. Honnet, K. Seshadri, U. Niemann, N. Peters: A Surrogate Fuel for Kerosene, Mc Gill University, Montreal, 2008, (online), url: https://www.itv.rwth-aachen.de/fileadmin/Downloadbereich/Comb_Symp08_Kerosene_Honnet_et_al_App.pdf (04.03.2017.)
[7] Carlos Eduardo Fontes, Raphael David A. Bacchi: Best Practice Guidelines for Combustion Modelling, Ansys South American Conference & ESSS Users Meeting, Atibaia, 2010, (online), url: http://www.esss.com.br/events/ansys2010/pdf/20_2_1630.pdf (04.03.2017.)
[8] Tajti József, Bicsák György: The Influence of Different Turbulence Models on Gas Turbine Combustion Process with Particular Regard to the Temperature Distribution, BSc. Thesis, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2015
[9] Ali Hussain Kadar: Modelling Turbulent Non-Premixed Combustion in Industrial Furnaces, MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 2015, (online), url: http://ta.twi.tudelft.nl/users/vuik/numanal/kadar_afst.pdf (04.03.2017.)
[10] Pallag Nándor, Beneda Károly: A TKT-1 gázturbinás sugárhajtómű áramlástani vizsgálata, diplomaterv, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2013
[11] Dr. Veress Árpád: Bevezetés az áramlástan numerikus módszereibe, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, tanszéki oktatási segédlet, Budapest, 2002, (online), url: http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Dr.Veress_Arpad_anyagai/Oktatott_targyak/Bevezetes_a_numerikus_aramlastanba_CFD/CFD-jegyzet.pdf (04.03.2017.)
[12] Dr. Veress Árpád: CFD számítási sablon, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2014, (online), url: http://www.vrht.bme.hu/hu/hallgatoinknak/letoltesek.html (04.03.2017.)
[13] György Bicsák, Anita Hornyák, Dr. Árpád Veress: Numerical Simulation of Combustion Processes in Gas Turbine, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2012, (online), url: http://tehetseg.bme.hu/?letoltes/ecc166f70b53c784c4f4dbfb27f8ba029b6fbb8c/a438906f8e3a0fb2b29835505ef39c41c4cb036f/1423/47b0b717d84c1f0c70c264262153ad18f9e3430f (04.03.2017.)
[14] Heinz Pitsch, Suresh Menon: CFD for Combustion Modeling, Lecture PPT, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2015, (online), url: http://www.ccl.gatech.edu/sites/default/files/CCL/Papers/2011/Reports/CFD11-Day2-Lecture1.pdf (04.03.2017.)
[15] M.M. Torkzadeh, F. Bolourchifard, E. Amani: An Investigation of Air-Swirl Design Criteria for Gas Turbine Combustors Through a Multi-Objective CFD Optimization, Amirkabir University of Technology, Teheran, 2016, (online), url: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236116308791 (04.03.2017.)
[16] Jianzhong Li, Li Yuan, Hukam C. Mongia: Simulation of Combustion Characteristics in a Hydrogen Fuelled Lean Single-Element Direct Injection Combustor, Elsevier Ltd, 2016, (online), url: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916332517 (04.03.2017.)
[17] G. Bulat, W.P. Jones, A.J. Marquis: NO and CO Formation in an Industrial Gas-Turbine Combustion Chamber Using LES with the Eulerian Sub-Grid PDF Method, Elsevier Ltd, 2014, (online), url: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218014000042 (04.03.2017.)
[18] A. Haj Ayed, K. Kuserer, H.H.-W. Funke, J. Keinz, C. Striegan, D. Bohn: Experimental and Numerical Investigations of the Dry-Low-NOx Hydrogen Micromix Combustion Chamber of an Industrial Gas Turbine, Elsevier Ltd, 2015, (online), url: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212540X15000504 (04.03.2017.)
[19] S. Kheirkhah, B.D. Geraedts, P. Saini, K. Venkatesan, A.M. Steinberg: Non-Stationary Local Thermoacoustic Phase Relationships in a Gas Turbine Combustor, Elsevier Ltd, 2016, (online), url: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1540748916304217 (04.03.2017.)
[20] Mark D. Turrell, Philip J. Stopford, Khawar J. Syed, Eoghan Buchanan: CFD Simulation of the Flow Within and Downstream of a High-Swirl Lean Premixed Gas Turbine Combustor, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 Power for Land, Sea and Air, Vienna, 2004, (online), url: https://pdfs.semanticscholar.org/10dd/16fe068c64189894e2e79ae2399ec29b5916.pdf (04.03.2017.)
[21] Dr. Veress Árpád: Hő-és áramlástani számítások, Előadásjegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2016, (online), url: http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Dr.Veress_Arpad_anyagai/Oktatott_targyak/Ho-_es_aramlastani_szamitasok/CFD_v1.pdf (04.03.2017.)

[22] Widener University: Mean Free Path vs Pressure Altitude, (online), url: http://science.widener.edu/~svanbram/chem332/pdf/menfpath.pdf (04.03.2017.)
[23] Matej Zadravec, Bostjan Rajh, Niko Samec, Matjaz Hribersek: Numerical Analysis of Oil Combustion in a Small Combustion Device, University of Maribor, Maribor, 2014, (online), url: http://www.anali-pazu.si/sites/default/files/Separat_Numerical_analysis_of_oil_combustion.._0.pdf (04.03.2017.)
[24] G. Manoj Kumar, J. Bruce Ralphin Rose: Numerical Comparative Study on Convective Heat Transfer Coefficient in a Combustor Liner of Gas Turbine with Coating, International Journal of Mechanical Engineering and Research, Tamil Nadu, 2015, (online), url: https://www.ripublication.com/ijmer_spl/ijmaerv5n1spl_03.pdf (04.03.2017.)
[25] YYang CFD Studio: Gas Turbine Combustor LES Simulations, video, (online), url: https://www.youtube.com/watch?v=Mim33CvQTUQ (04.03.2017.)

KISMÉRETŰ KISÉRLETI GÁZTURBINÁS SUGÁRHAJTÓMŰ ÉGÉSTERÉBEN LEJÁTSZÓDÓ FOLYAMATOK CSATOLT ÁRAMLÁSTANI ÉS TERMIKUS VIZSGÁLATA

Gázturbinás sugárhajtóművek tervezési és fejlesztési fázisában elengedhetetlen a hajtómű főbb részeiben lejátszódó összetett fizikai, kémiai, áramlástani és termikus jelenségek ismerete. Numerikus eszközök és vizualizációs technikák alkalmazásával a mérnökök képesek feltárni és jobban megérteni a gázturbinás sugárhajtóművek belsejében zajló összetett és rejtett folyamatokat. Ezen tanulmány célja egy kisméretű kísérleti gázturbina égésterében lezajlódó csatolt áramlástani és termikus folyamatok szimulációja és vizsgálata numerikus eszközökkel különös tekintettel az égési folyamat helyességére és a kilépési hőmérséklet eloszlására összevetve égéselméleti követelményekkel és a rendelkezésre álló, verifikációra alkalmas adatokkal. A plauzibilitás ellenőrzésére egy korábbi MSc diplomaterv és egy folyamatban lévő doktori disszertáció eredményei felhasználásra kerültek azonos geometria és hasonló vizsgálati körülmények és célok mellett.

Kulcsszavak: *égéstér, égésmodellezés, gázturbinás sugárhajtómű, numerikus áramlástan, turbina belépő hőmérséklet*

Venczel Márk (BSc) MSc. hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem venczelmark@freemail.hu orcid.org/0000-0002-4319-1463	Venczel Márk (BSc) MSc. Student Budapest University of Technology and Economics venczelmark@freemail.hu orcid.org/0000-0002-4319-1463
Bicsák György (MSc) tanársegéd Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék gybicsak@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-3427-3918	Bicsák György (MSc) Assistant lecturer Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles gybicsak@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-3427-3918
Dr. Veress Árpád (PhD) docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék averess@vrht.bme.hu orcid.org/ 0000-0002-1983-2494	Dr. Veress Árpád (PhD) Associate professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles averess@vrht.bme.hu orcid.org/ 0000-0002-1983-2494

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-14-0391_Venczel_M-Bicsak_Gy-Veress_A.pdf

Beneda Károly Tamás, Simon Dávid István

TENGELYTELJESÍTMÉNYT ADÓ GÁZTURBINÁS PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE

Cikkünk a BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszékén üzemben álló Deutz T216 tengelyteljesítményt leadó gázturbinán alapuló próbapad fejlesztési folyamatáról szól. Bemutatja azokat a körülményeket, melyek indítóokként elvezettek a munkálatok megindulásához, egyben részleteket is közöl a régi rendszer képességeiről, melyek jelentős mértékben igényelték az effajta beavatkozást. A cikk központi része az új mérő-adatgyűjtő és vezérlő rendszernek a bemutatása, melyben a részletes leírásnak köszönhetően képet alkothatunk a létrehozott és az eredeti közötti különbségekről. A berendezés hosszú idő után újfent üzemképessé vált a vezérlések véglegesítésével, így a szerzők a mérőérzékelők kalibrálását követően már éles méréseket is lefolytattak. Ezt követően, főként a mért adatokra, a gázturbina üzemi viszonyaira támaszkodva összegezzük a megvalósult eredményeket, és rámutatunk a közeljövő fejlesztési lehetőségeire is.

Kulcsszavak: *tengelyteljesítményt leadó gázturbina, fékpad, mérő-adatgyűjtő rendszer, LabVIEW, Deutz T216, légcsavaros gázturbina*

BEVEZETÉS

Gázturbinás sugárhajtóműveket széleskörűen alkalmaznak a légi közlekedésben, leggyakrabban kétáramú sugárhajtóművek működnek a mind a polgári, mind a katonai repülőgépek propulziós rendszereiben [1]. Emellett azonban, leginkább mérsékelt repülési sebesség- és hatótávolság-tartományban a légcsavaros gázturbina is megfelelő alternatíva, akár már néhány száz kW teljesítmény esetén is [2], habár a legtöbb ilyen egység az 1-10MW tartományba esik [3].

Elterjedésük indokolja, hogy a felsőoktatási intézményekben mind oktatásra, mind kutatási célokra szükséges efféle berendezéseket létrehozni, fenntartani [4]. A VRHT a 2000-es évek fordulóján jutott el a Deutz T216-os típusú tengelyteljesítményt leadó gázturbinán alapuló próbapad megépítéséhez. Az akkor létrehozott rendszer azonban már a megvalósulás idején is jócskán elavultnak számított, ezért a 2010-es évek közepére igencsak időszerűvé vált a továbbfejlesztés. Ezen felül a kezelőpult helyigényének jelentős mértékű csökkentése is kívánatossá vált. A berendezés tengelyteljesítményt leadó gázturbinája a légcsavaros gázturbina modelljeként nemcsak az oktatásban, hanem a kutatási folyamatokban is jelentős szerepet kaphat, hiszen a közelmúltban igen erősen nőtt az érdeklődés a mikrogázturbinák ilyen felhasználási lehetőségei iránt (mint pl. [5], [6] vagy [7]), egyre kisebb teljesítménytartományokban megközelítvén a dugattyús motorok által kínált hatásfokot, miközben a felhasználható tüzelőanyagok széles skáláját nyújtják [8].

Jelen cikk célja, hogy bemutassa a BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszékén (VRHT) az elmúlt években lefolytatott fejlesztői munkát, melynek keretében a tengelyteljesítményt leadó Deutz T216 típusú gázturbinás próbapad mérő-adatgyűjtő és vezérlő rendszereinek teljes felújítását végezték a szerzők. A létrehozott új rendszer messzemenőkig felülmúlja a korábbinak a teljesítményét, melynek elavultsága azonban csak egy indok volt a munkálatok megkezdésére. Számos más indok is felmerült, melyek együttesen indították meg ezt a fejlesztést.

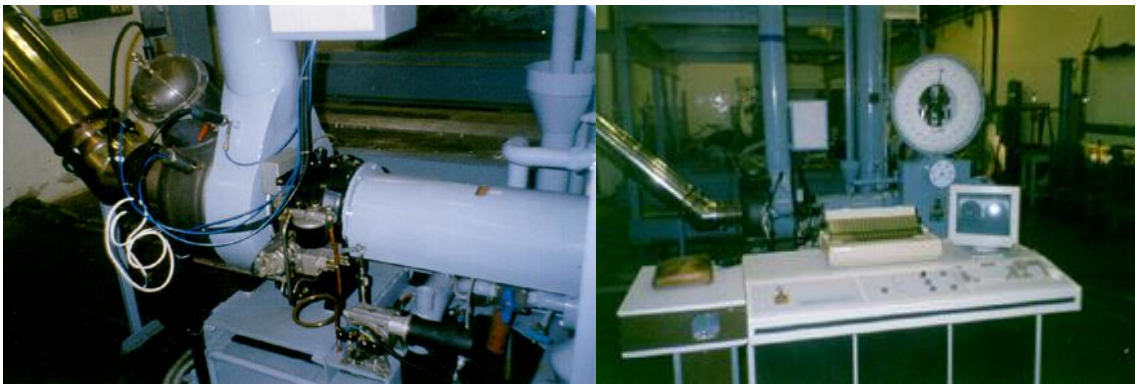
Cikkünk nemcsak a próbapad fejlesztésének lépcsőit kívánja bemutatni, hanem mintegy kritikát is óhajt adni a korábbi rendszerről, bízván abban, hogy az ott nyert tapasztalatokból mások is le tudják szűrni a megfelelő következtetéseket.

A PRÓBAPAD ÉS BERENDEZÉSEI

A kiindulási mérőberendezés leírása

A BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék laboratóriumában lévő gázturbinás próbapad egy speciális konstrukció, mely kifejezetten egyetemek és kutatólaboratóriumok számára készült. Így a hajtómű kis teljesítmény/tömeg aránnyal rendelkezik, továbbá többféle tüzelőanyaggal is működtethető. Ezek mellett egyszerű felépítésű, és könnyen üzemeltethető, illetve karbantartható. Utóbbi szempont talán a legfontosabb, hiszen így a hajtóművek terén nem járatos személyek és hallgatók is működtetni tudják, megismerve a gázturbinák alapvető folyamatait. Továbbá kutatási célokra is alkalmazható, mivel részei könnyen hozzáférhetőek, így a szükséges mérőeszközök gond nélkül beszerelhetőek. Mivel a hajtómű tengelyteljesítményt szolgáltat, ezért mint légcsavaros gázturbinás hajtómű is vizsgálható [9].

A rendszer elemei egy 2 m × 1 m-es alapterületű kezelőpultban voltak elhelyezve, melynek fő elemét egy 386-os számítógép képviselte. A gázturbina-próbapadon elhelyezett mérőberendezések lehetővé teszik a gázturbina körfolyamat jellegzetes pontjaiban a torlóponti nyomások és hőmérsékletek, illetve a fordulatszám, a tüzelőanyag fogyasztás és a terhelő nyomaték meghatározását (a próbapadon kialakított mérőrendszerrel csak torlóponti, azaz lefékezett áramlásmennyiségeit tudjuk mérni). A mérőberendezésekből érkező analóg jelek egy gázturbina-próbapadi számítógépben kerülnek feldolgozásra, kijelzésre [9].



1. ábra A Deutz T216 gázturbina közelről (balra) és a próbapad eredeti kialakítása (jobbra)

A gázturbina

A gázturbinás próbapad legfontosabb része, egy Klöckner-Humboldt-Deutz T216 típusú gázturbina. A gyártó ugyanezen a típusmegjelölésen belül több verziót is tervezett több felhasználási céllal. Többek között alkalmazható generátorok, tűzoltó szivattyúk szállítható meghajtására [10]. Európában, főleg a német nyelvterületen és vonzáskörzetében igen elterjedten alkalmazzák kisméretű gázturbinás próbapadokon oktatási-kutatási szerepkörben pl. a Bécsi Műszaki Egyetemen [11] vagy a Rostocki Egyetemen [12].

A gázturbina alapvető műszaki adatai (p_0 = 101325 Pa nyomás, T_0 = 288,15 K hőmérséklet,

n = 833,333 1/s fordulatszám mellett, [10] nyomán):

- teljesítmény P = 80 kW;
- hajtóművön átáramló levegő tömegárama $\dot{m}_{lev}$ = 0,9 kg/s;
- kompresszor nyomásviszony π = 2,8;
- turbina utáni torlóponti hőmérséklet T_4 = 938,15 K;
- óránkénti tüzelőanyag fogyasztás b = 71,5 kg/h.

A hajtómű részei

Szívócsatorna

A csatorna eredetileg nem tartozott a hajtóműhöz, a Tanszék készítette. Függőleges elrendezésű, a felső részén a belépő keresztmetszetnél egy mérőperem lett elhelyezve, amellyel a beszívott levegő tömegárama meghatározható. A szívócsatorna kb. 3 méter hosszú, így a közelben tartózkodó személyek és gépek által nem zavart levegőt tud beszívni.

Forgórész

A kompresszor egyfokozatú centrifugális kialakítású, radiális lapátozású járókerékkel. A turbina egyfokozatú centripetális kialakítású radiális lapátozású járókerékkel van felszerelve. A kompresszor és a turbina (forgórész) egy egységet képez, labirint tömítéssel és golyós csapágyazással.

Égéstér

A gázturbinát egy könyökös, csöves tüzelőtérrel szerelték fel, melynek köszönhetően a gyújtógyertya és a tüzelőanyag fúvóka könnyen hozzáférhető. Ez az elrendezés ugyan csökkenti a gázturbina hosszát, így a tengely csapágyazása is kedvezőbb, valamint kritikus fordulatszáma is kellően nagy, ugyanakkor nagy homlokfelületet eredményez, de mivel nem repülőgép meghajtása az elsődleges rendeltetése a berendezésnek, ebben a konfigurációban nem okoz hátrányt.

Gázelvezető csatorna

A gázelvezető csatornát szintén a tanszék készítette. Célja a gázturbinából kilépő forró gázok elvezetése biztonságos távolságra (épületen kívül) a hajtóműtől. Ezért hővédő burkolattal is ellátták. Mivel a próbapad az egyetem területén található, így a gázelvezető csatorna végére, a laboratórium falán kívül egy hangtompító dobot szereltek fel. Ebből kifolyólag a gázelvezető csatornán nagy fojtás keletkezik, mely lecsökkenti a gázelvezető csatorna össznyomás-visszanyerési tényezőjét.

Áttételház

Az áttételház kétfokozatú golyós csapágyazású. Az áttételházhoz van csatlakoztatva a hajtómű szabályzó egysége a tüzelőanyag szivattyúval és az olajszivattyú. A kimenő fordulatszáma (n = 833,333 1/s mellett) 50 1/s, azaz az áttétel 3/50. Ezzel hálózati generátor meghajtása is lehetséges volna, azonban a Tanszék a próbapad megépítésekor a vízörvényfék, mint terhelő berendezés illesztése mellett döntött.

Tüzelőagyag-rendszer és a gázturbina szabályzó egysége

A tüzelőanyag a tüzelőanyag szivattyú segítségével a tartályból a szűrőn és a tüzelőanyag-kenőolaj hőcserélőn át az égéstérbe kerül beporlasztásra. A szabályozóegység a tüzelőanyag-szivattyúval van együtt. Feladata, hogy a szabályzó egység oldalán található gázkar által beállított

fordulatszámnak megfelelő mennyiségű tüzelőanyagot juttasson a gázturbinába. Továbbá megakadályozza a hajtómű túlpörgését, illetve a túl magas turbina utáni torlóponti hőmérsékletet a gázturbina leállításával.

Vízörvényfék

A vízörvényfék sem volt a gázturbina része, viszont elengedhetetlen a hajtómű különböző terhelések melletti működtetés és mérés céljából, valamint a hajtómű által generált teljesítmény elemésztése miatt. A ZÖLLNER típusú vízfék egy kardántengellyel van összekötve az áttételház kimenő tengelyével. A próbapad működtetése során biztosítani kell a vízfék kielégítő mennyiségű vízzel való ellátását, melyet betápláló és leürítő szivattyúk, valamint a csővezetékekben elhelyezett csapok segítenek. Indításkor azonban nem lehet víz a vízfékben, mert megakadályozza a gázturbina indítását, illetve a hajtómű fordulatszám emelkedését [13], azaz melegfennakadáshoz vezethet.

A mérőberendezések

A hőmérséklet mérése

A torlóponti hőmérséklet mérése NiCr-Ni (K típusú) termoelemekkel történik. A termoelemekkel a gázturbina-körfolyamat jellegzetes pontjaihoz tartozó torlóponti hőmérsékleteket mérjük, azaz a kompresszor előtti (T_1^*), kompresszor utáni (T_2^*), illetve turbina előtti (T_3^*) és turbina utáni (T_4^*) torlóponti hőmérsékleteket. Mivel a turbina előtti keresztmetszetben a hőmérsékleteloszlás nem egyenletes, ezért a T_3^* értéket érdemes számítással meghatározni. A hőelemek méréstartománya –200…1200 °C.

Egy további mérési pont a hőelemek hidegponti kompenzációját hivatott elvégezni, egy negatív hőmérsékleti együtthatóval rendelkező termisztor szolgáltatja a környezeti hőmérséklettel (T_0) arányos jelet.

A nyomás mérése

A torlóponti nyomások mérése a nyomással arányos analóg jelet szolgáltató nyomásszenzorokkal történik. A mérés pontosságának növelése céljából ahol lehetséges, nem abszolút nyomásokat, hanem két mérési pont közötti nyomáskülönbséget (differenciál nyomás) mérünk. (Az alább felsorolt nyomások mérőeszközei zárójelben találhatóak.) A mért nyomások:

- Környezeti nyomás (az egyetlen abszolút nyomás) p_0 (Honeywell 142PC15);
- Kompresszor előtti nyomáscsökkenés p_0^*-p_1^* (Honeywell 24PCE);
- A kompresszor által létrehozott nyomáscsökkenés p_2^*-p_1^* (Honeywell 142PC30D);
- Égéstér nyomásesése p_2^*-p_3^* (Honeywell 142PC05D);
- Gázelvezető csatornában létrejövő nyomásesés p_4^*-p_0^* (Honeywell 24PCE);
- A levegő tömegáramának meghatározása céljából a mérőperemen mért nyomásesés $\Delta p_{mérőperem}$ (Honeywell 24PCE).

A fordulatszám mérése

A fordulatszám mérése a vízfékre szerelt ABS jeladó és a hozzátartozó 60 osztású tárcsa szolgál. A tárcsa forgásakor a jeladó előtt elhaladó osztások impulzust gerjesztenek a jeladóban. Ezen impulzusok számából és az eltelt időből meghatározható a fordulatszám. A mérési tartomány: 0–1666,66 1/s

A terhelő nyomaték mérése

A gázturbina terhelésének a beállítása a vízörvényfékkel történik. A terhelőnyomaték mérése egy 500 Nm terhelhetőségű KALIBER 7934 típusú nyomatékmérő cella szolgál. Az eszköz az áttételház és a vízfék közötti kardántengelybe van beépítve. A fékezés mértékét a vízféken lévő karral lehet beállítani.

Tüzelőanyag fogyasztás mérése

A tüzelőanyag fogyasztást egy KALIBER ÜFM-2000 típusú gravimetrikus tüzelőanyag fogyasztásmérővel hajtjuk végre. A mérőberendezés a súlymérés elvén alapszik. A mérés megkezdésekor a számítógép a fogyasztásmérő töltő szelepét elzárja és leolvassa a mérőedényben lévő tüzelőanyag-szintet. Ezt a tüzelőanyag szintet (tömeget) a berendezésbe épített erőmérő cella méri. A mérés befejezésekor a számítógép ismét leolvassa a szintet, majd kiszámolja az óránkénti és a fajlagos tüzelőanyag fogyasztást. (A töltő és leeresztő szelepek vezérlése digitális kimenő jelekkel van megvalósítva.) A fogyasztás mérés tartománya: 0–200 l/h, pontossága 0,5% [9].

A PRÓBAPAD FEJLESZTÉSE

A koncepció

Mivel a mérőrendszer már a megépítésekor elavultnak számított, és a mérési eredményeket sem lehet róla lementeni, továbbá a Tanszék laborjának átalakítása miatt jelentősen csökkent a rendelkezésre álló hely, ezért vált szükségessé a próbapad fejlesztése. A rendszert hordozható számítógép segítségével lehet működtetni, ami nagymértékű helymegtakarítást jelent. A mérés során továbbra is a már meglévő érzékelőket és szenzorokat használjuk. Maga a próbapad lényegében változatlan marad, azonban néhány átalakítást, mint pl. a gázelvezető cső eredeti 45°-os megdöntése helyett függőleges kivitelre van szükség az új, kisebb helyigény miatt. A lényegi változást azonban az új mérő-adatgyűjtő rendszer és a számítógépen lévő szoftvert jelenti [13].

A mérő-adatgyűjtő egység

Az érzékelőkből a jelek egy NI USB-6218 típusú adatgyűjtőbe jutnak, és onnan az analóg jeleket átalakítva egy USB kábelen keresztül kapcsolódnak a számítógéphez, melynek vázlatát a 2. ábra mutatja. Az egységen keresztül zajlik az esetleges vezérlése a mérendő rendszernek. Ilyenkor a számítógépből érkező digitális jeleket alakítja át analóg jelekké (ahol szükséges) és így adódik tovább a vezérlőjel a mérendő rendszernek.



2. ábra Az adatgyűjtő rendszer vázlatos felépítése ([14] nyomán)

Az adatgyűjtő 32 analóg bemenetet (analog input, AI), és két analóg kimenetet (analog output, AO) képes kezelni. Továbbá rendelkezik 8 digitális bemenettel (digital output, DO), és 8 digitális kimenettel (digital input, DI). A készülék használatához szükség van a számítógépre telepíthető, kifejezetten a National Instruments által készített vezérlőprogramokra (NI device monitor, NI DAQmx) [14].

Az előző fejezetben felsorolt mérendő mennyiségek messze nem használják ki a mérő-adatgyűjtő eszköz lehetőségeit. Az 1. táblázat bemutatja az alkalmazásban lévő csatlakozókat, az azokon vett vagy éppen kiadott jelek megnevezésével együtt.

Lábszám	Gyári megnevezés	Jel megnevezése
1	PFI0 / P0.0	Gázkar alapjárat
2	PFI1 / P0.1	Fordulatszám
3	PFI2 / P0.2	Gázkar min. végállás
4	PFI3 / P0.3	Gázkar max. végállás
6	PFI4 / P1.0	Gázkar fel
7	PFI5 / P1.1	Gázkar le
8	PFI6 / P1.2	Kifogy. tartály szelep
9	PFI7 / P1.3	Indítómotor
24	AI4	T_1^*
25	AI12	T_2^*
26	AI5	T_3^*
27	AI13	T_4^*

Láb-szám	Gyári megnevezés	Jel megnevezése
33	PFI8 / P0.4	Gázkar alapjárat
40	PFI14 / P1.6	Nagynyomású elzáró szelep
41	PFI15 / P1.7	Kisnyomású elzáró szelep
49	AI17	p_0
50	AI25	Δp_2
51	AI18	Δp_3
52	AI26	Δp_{mp}
53	AI19	Δp_1
54	AI27	Δp_4
56	AI20	T_0
63	AI23	Kifogyasztó tartály erőmérő cella
64	AI31	Terhelőnyomaték

1. táblázat Az NI USB-6218 által kezelt jelek [15]

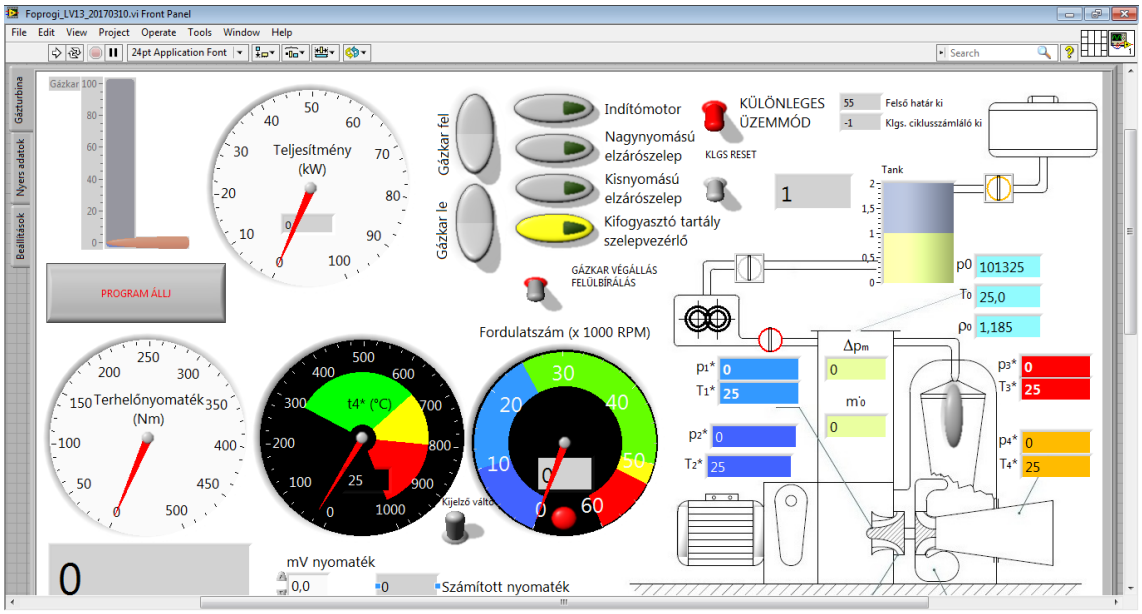
A vezérlő szoftver

A hordozható számítógépre telepített program a szintén a National Instruments által kifejlesztett rendszer-tervező program, a LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) keretein belül valósult meg. Ez egy grafikus programozási nyelv, amit kifejezetten mérőberendezések illetve ezek jelfeldolgozási műveleteinek vizsgálatára hoztak létre. A fejlesztők szerint a LabVIEW programozásban kevésbé jártas felhasználóknak is könnyen elsajátítható, mivel a gyártó rengeteg mintaprogrammal, előre elkészített programrészekkel valamint részletes leírással látta el [16].

A LabVIEW program, melyet virtuális műszernek (VI, Virtual Instrument) is hívnak, két alapvető részből tevődik össze: a felhasználóval kapcsolatot tartó Front Panel, és a program vezérlését végző részét tartalmazó Block Diagram, mely nem begépelt programsorok, hanem egyes (leginkább műveletek elvégzéséért felelős) csomópontok közötti vezetékezésből áll. A Front Panel vezérlő elemei, kijelzői szintén csomópontokként jelennek meg a működési vázlaton, melyek ki- illetve bemeneti változóként viselkednek.

A 3. ábra az adatgyűjtő szoftver kezelőfelületét mutatja. Az összes vezérlőelem és kijelző egyszerre történő megjelenítése nem lehetséges, így azok három lapra elosztva kerülnek megjelenítésre. A három fül a bal felső saroknál található, „Gázturbina”, „Nyers adatok” és „Beállítások” feliratokkal. Utóbbi kettő kisegítő szerepet tölt be, a 3. ábrán az elsőre történő kattintással elérhető nézetet figyelhetjük meg. Ennek bal oldalán látható a terhelő nyomaték kijelző, és a gázkar állás

csúszka, mely egyelőre kiszürkített állapotban van, mivel egy későbbi gázkar pozícionálás megvalósítására készült, jelenleg csupán az eredeti konfigurációnak megfelelő, fel-le jellegű kézi vezérlést hoztunk létre. Ezek mellett helyezkednek el a teljesítmény és turbina utáni hőmérséklet kijelzésére szolgáló szimbolikus műszerek. A képernyő közepén találhatóak a különféle célokat szolgáló nyomógombok, valamint alattuk a fordulatszámot mutató műszer. A nyomógombok között látható két függőleges elhelyezkedésű, ezek a jelenlegi gázkar vezérlést megvalósító elemek, amely a gázkar állító motor táplálását irányítja ellentétes irányokba, és csak akkor, ha a nyomógombok le vannak nyomva. Ezek mellett vannak a szelepvezérlő gombok és az indítómotor indítógombja. A kifogyasztó tartály szelepvezérlőt a program irányítja aszerint, hogy mennyi tüzelőanyag található benne, továbbá a kis- és a nagynyomású elzárószelepeket is a program vezérli. A nagynyomású szelep esetén indítás során a megfelelő fordulatszám elérésekor a program kinyitja a szelepet. Mivel az indítómotorral közel 10 000 1/min a maximálisan elérhető fordulatszám, így a tüzelőanyag betáplálás kezdetét 9000 1/min értékben határoztuk meg.



3. ábra: A LabVIEW program fő képernyőképe

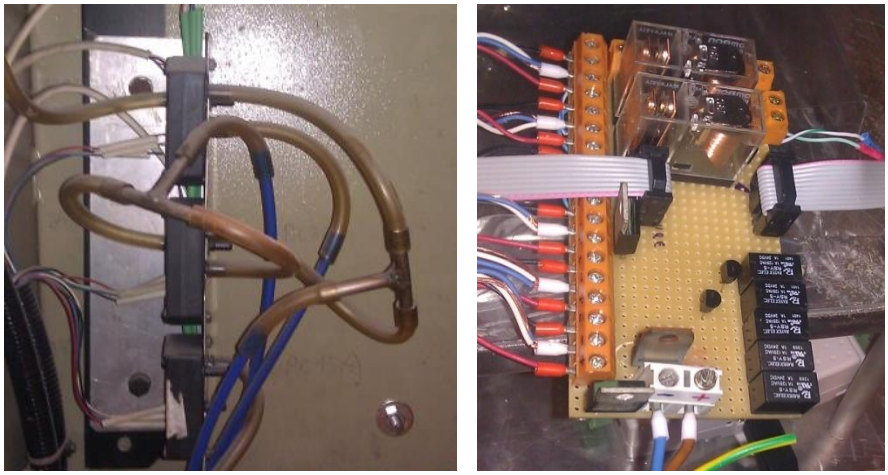
A képernyő jobb oldalán a gázturbinás próbapad sematikus ábrája látható, a jellegzetes keresztmetszetek termodinamikai jellemzőivel, valamint további kiegészítő értékekkel, mint pl. a kifogyasztó tartály szintje, ill. beszívott levegő tömegárama.

A gázturbina sematikus ábrája felett található a különleges üzemmód kapcsoló. Ennek a funkciója, hogy csökkenő periódusidővel állítja a gázkart a maximális és minimális kitéríthetőség között; ez a lehetőség a gázkart mozgató motor átviteli függvényének meghatározása miatt lesz a későbbiekben fontos, hogy egy automatikus szabályozó – a jelenleg még kiszürkített gázkar csúszka pozíciója alapján – nemcsak fel-le vezérlést, hanem tényleges pozíciótartást és – követést legyen képes megvalósítani, ezzel is egyszerűsítvén az üzemeltetést.

Nyomásmérés

Az eredeti rendszer szenzorait kívántuk felhasználni, melyek 12V-os tápfeszültséget igényelnek, amit egy összesített áramkörön keresztül kap meg. Ez az áramkör a szenzorok tápfeszültségén

kívül tartalmazza azokat a reléket, melyek az adatgyűjtő modul TTL jelei alapján vezérlik a gázturbina 24V-os rendszerének komponenseit (mágnesszelepek, indító relé). Az áramkör az 5. ábrán látható, megkülönböztethetőek rajta a narancssárga sorkapcsok a szenzorok csatlakoztatására, a fehér sorkapocs a 24V táp fogadására, a nagy átlátszó házú relék, melyek a gázkar motor vezérlését végzik, és a jobb alsó sarokban az öt kis fekete relé, melyek a további kétállapotú egységek működtetéséért felelnek. Az adatgyűjtő modullal szalagkábeleken történik az adatcsere [13].



4. ábra A nyomásmérő szenzorok (bal oldalt)
és a vegyes analóg és digitális feladatok segédáramköre (jobb oldalt)

A kompresszor előtti (Δp_1), a turbina utáni (Δp_4) nyomásoknál, továbbá a mérőperem nyomásesése (Δp_m) csekély mértékű, ezeket eredetileg Honeywell 24 PCE típusú szenzorral mértük, amelynek a méréstartománya 0-3500Pa, és belső erősítéssel nem rendelkező érzékelők, így a kimenő feszültség változása szintén kismértékű, mindössze 0–46 mV [17]. Ezek a fent említett szenzorok jele külső erősítőn át jut az áramkörre, ahol egy sorkapcson keresztül csatlakozik a mérő-adatgyűjtő rendszerhez. A kompresszoron bekövetkező nyomásnövekedést (Δp_2) Honeywell 142PC30D jelű szenzorral mérjük, melynek méréstartománya: 0-206kPa. Az égéstér nyomásesését (Δp_3) Honeywell 142PC05D szenzorral határozzuk meg, méréstartománya: 0-35kPa. Végül a környezeti nyomást Honeywell 142PC15 típusú érzékelővel rögzítjük, melynek méréstartománya: 0–105 kPa [18]. A nyomásmérő eszközök kalibrálása egy U-csöves manométerrel, valamint a tanszéki laborban megtalálható nyomást előállító készülékek segítségével történt. Az eljárást a különböző típusú nyomásszenzorokra lett elvégezve, aminek az eredményeit felhasználva meghatározásra kerültek a szükséges tényezők (ofszet és faktor). Mivel a szenzorok rendelkeznek egyfajta karakterisztikával, ami a mért fizikai mennyiség és a feszültség átalakítás közötti kapcsolatot jellemzi, a legtöbb esetben a szenzorokat a jelleggörbéjük kvázi lineáris szakaszán szokták alkalmazni, és erre a szakaszra teszik a szenzor méréstartományát. Ez a jelenlegi esetben sincs másként, ezért a nyomás-feszültség átalakítás egy egyszerű képlettel megadható a program számára [13].

$$p_{ki} = \frac{U_{be} - ofs}{fac} \tag{1}$$

ahol:

- p_{ki}: a mért nyomás értéke
- U_{be}: a beolvasott feszültség

- *ofs*: nullponti eltolás
- *fac*: szorzótényező

A belső erősítéssel rendelkező nyomásszenzorok nem mutattak semmilyen rendellenességet a kalibrálás során, így ezeket változtatás nélkül fel tudtuk használni a végleges konfigurációban. Miután azonban a segédáramköröket létrehoztuk, mellyel a kis nyomások erősítetlen érzékelőit csatoltuk a rendszerhez, a kalibráció alatt mindegyiknél hibát észleltünk.

Az alkalmazott 24PCE típusú érzékelők tehát csak egy piezorezisztív ellenálláshidat tartalmaznak egy membránon kialakítva, melynek deformációja a hídkapcsolás egyes ellenállásainak értékét a méréstechnikában szokásos elven változtatja, úgy, hogy a kimeneti vezetékek feszültség-különbséget fognak mutatni, mely a membránt ért terheléssel (nyomással) lesz arányos. A maximális kimenő feszültség pedig a fentebb említett ±46mV, az előjel a membrán deformációjának irányától függ, vagyis attól, hogy az eszköz két csonkja közül melyikre csatlakoztattunk nagyobb nyomást. A kis kimenő jelfeszültség miatt szükséges a jel erősítése, azonban az erősítő már csak egyféle polaritású jeleket enged át, mivel nem szimmetrikus (pl. ±12V) tápellátással rendelkezik, hanem csak +12V-ot kap. Így a két jelvezeték polaritása is adott kell legyen mindhárom érzékelő esetén, holott a p_1 és Δp_m szívóhatást (relatív vákuumot), a p_4 pedig túlnyomást fog detektálni a működés során, vagyis a nyomást továbbító csövek megfelelő csonkra vezetéséről a felhasználónak kell gondoskodnia, ezt lehet látni a 4. ábrán is.

A problémák a kalibrációnál kezdődtek, amikor egyik erősítő sem adott ki értelmes jelet. Ezek után megvizsgáltuk a szenzorokat, lecsatlakoztatván a mérési helyről odavezető csöveket, kézi pumpával, illetve vákuumszivattyúval próbáltunk megfelelő nyomást létrehozni. A szenzorok erősítetlen kimenetén látszott némi változás, az erősítő kimenete természetesen továbbra sem mutatott semmit. A sikertelenség miatt kíváncsiságból felcseréltük az összes szenzorhoz vezető tesztcső csatlakozását, és az ellenkező oldali csonkokra vezettük az adott érzékelőnek megfelelő nyomást. Így azonnal működésre lehetett bírni az erősített kimenetet is, tehát az eredeti konfigurációban a csövek helytelenül voltak felszerelve, és így a szenzorok nem jelezhettek helyes értékeket.

A következő lépés tehát a kalibráció volt, az előbb említett vákuumszivattyú és kézi pumpa kimenetét elágaztattuk egy U-csöves manométerre is, hogy ott a pontos nyomásértéket leolvashassuk. Azonban a várt valamilyen ofszet feszültségről már minimális nyomásváltozás hatására emelkedni kezdő kimenet helyett az összes szenzor 1,5–2,5 kPa nyomás alatt nem produkált kimenetet. Mivel a várható nyomások jelentős hányada ebbe a tartományba esik, kijelenthető volt, hogy ezek a szenzorok alkalmatlanok a további használatra. Azt, hogy mikor és milyen módon érte őket olyan behatás, aminek következtében a névleges karakterisztikától ennyire eltérnek, már nem megállapítható. Azonban annyi biztos volt, hogy teljesen új érzékelők beszerzésére és a rendszerbe integrálására lesz szükség.

Tekintettel arra, hogy a PD-60R típusú mikrogázturbina mérő-adatgyűjtő rendszerében [19] szintén Freescale szenzorokat alkalmazunk, kézenfekvő volt, hogy az ott használtakhoz hasonló eszközökkel oldjuk meg a felmerült problémát. A Freescale 2004-ben vált ki a Motorolából, és foglalkozik a félvezetőgyártással, benne a szenzorokkal, míg 2015 végétől NXP néven folytatja tevékenységét. A kínálatukban megtalálhatóak az MPXV5004GP és MP3V5004GVP típusok, melyeknek a legfontosabb jellemzőik a következők:

- tápfeszültség +5V (MPXV…) vagy +3V (MP3V…);

- 4kPa méréshatár;
- belső erősítéssel rendelkeznek;
- túlnyomás (…GP) vagy relatív vákuum (…GVP) mérésére alkalmasak.

Az érzékelőkhöz készítettünk egy illesztő áramkört, melyen a 3V tápfeszültség előállítása történik a bemenő 5 V-ból (ezt értelemszerűen az MPXV5004GP azonnal felhasználja) az MP3V … szenzorok számára, és mindegyik szenzor sorkapoccsal rendelkezik a jel mérő-adatgyűjtőhöz való csatlakoztatására. Ezen áramkör elkészítését követően az új szenzorok kalibrálását végeztük el, mely minden esetben a gyártó által rendelkezésre bocsátott adatlapokon ([20] és [21]) közölt névleges értékeknek megfelelő viselkedést igazolt.

Miután a nyomás értékeket kiszámítottuk, már csak meg kell ezeket jeleníteni. Ehhez először újra át kell alakítani, majd mivel a környezeti nyomás (p_0) kivételével az összes differenciál nyomás, ennek megfelelően az értékek a (2) egyenlet szerint alakulnak. Természetesen még egy kivételről meg kell emlékezni, az pedig a mérőperem nyomásesése, mivel ezt az értéket a tömegáram számításában éppen különbségi nyomásként kell használni, ezért ezt nem transzformáljuk, hanem a (3) szerint képezzük belőle a gázturbina által beszívott tömegáramot.

$$\begin{aligned} p_1^* &= p_0 - \Delta p_1;\ \ p_2^* = p_1^* + \Delta p_2 \\ p_3^* &= p_2^* + \Delta p_3;\ \ p_4^* = p_0 + \Delta p_4 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\dot{m}_0 = \alpha_{mp} \cdot A_{mp} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_0 \cdot \Delta p_{mp}} \tag{3}$$

ahol:

- p_{ki}: a mért nyomás értéke;
- $\dot{m}_0$: a hajtómű által beszívott tömegáram;
- α_{mp}: a mérőperem kontrakciós tényezője, értéke 0,6;
- A_{mp}*:* a mérőperem keresztmetszete, 22 500 mm^2 (a furatátmérő ø150);
- ρ_0*:* a környezeti sűrűség, melyet a (4) képlettel (állapotegyenlet) határozhatunk meg, a p_0 környezeti nyomás és T_0 hőmérséklet ismeretében:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T_0} \tag{4}$$

A (4) újabb változója az R specifikus gázállandó, melynek értéke levegőre R = 287 J/(kgK).

Hőmérsékletmérés

A hőmérsékletek kalibrálása hasonló elvet történt, mint a nyomásmérés esetén. Tehát a szenzorokat megtartottuk a régi rendszerből és újrakalibráltuk őket. Egy fontos változtatást vittünk véghez, mely a környezeti hőmérséklet mérésével kapcsolatos. Az eredeti konfigurációban egy ötödik hőelemet is alkalmaztak a kezelőpulton belül a hőmérséklet mérésére. Azonban azt mindenképpen meg kell jegyezni, hogy a hőelemek a hideg- és melegpont közötti hőmérséklet-különbség mérésére alkalmasak, tehát önmagukban az abszolút hőmérséklet megállapítására még nem elegendőek, meg kell határozni az ún. hidegponti hőmérsékletet is, melyhez a hőelem

által érzékelt különbséget hozzá kell adni. Az eredeti konfigurációban a PCLD-8710 bővítőkártya rendelkezett a hidegponti kompenzáció (Cold Junction Compensation, CJC) lehetőséggel. Eléggé fölöslegesnek ítélhető tehát az a megoldás, melyben közvetlenül a hidegpont mellett van egy további hőelem, ami lényegében mindig 0mV kimenetet ad, mert igen jó közelítéssel termikus szempontból együtt fut a közelében lévő elektronikus berendezésekkel.

Ez a gondolat, valamint a PCLD-8710 eltávolítása a rendszerből vezetett arra a megoldásra, hogy a kereskedelemben kapható negatív hőmérsékleti együtthatós (Negative Temperature Coefficient, NTC) termisztorral, azaz hőmérsékletre változó ellenállású félvezetővel oldjuk meg. Mivel a berendezés a laboratórium temperált (bár nem légkondicionált) helyiségében működik, ahol a hőmérséklet változása minimális, ezért csupán két hőmérséklet mellett történő kalibrálást végeztünk.

A maradék négy helyszín, kompresszor előtti-utáni, valamint turbina előtti-utáni pontok mérését a már meglévő szenzorok felhasználásával oldottuk meg.

A 2. táblázat mutatja a leggyakrabban alkalmazott hőelem típusok legfontosabb jellemzőit, ahol a * a konstantán anyagot jelöli, mely egy réz-nikkel ötvözet [22]. A repülésben, ezen belül gázturbinás hajtóműveknél leggyakrabban a K típusú hőelemet alkalmazzák, mert méréstartománya kellően széles, Seebeck-együtthatója elegendően nagy (viszonylag nagy jelet ad adott hőmérséklet-különbség esetén), és relatíve olcsó, tehát a pontosabb mérés okán nagy hajtóműveknél általában nagyobb számban alkalmazható. A termoelemből érkező feszültség egy MCP6G04 típusú erősítőn keresztül jut el az adatgyűjtő egységbe. Ez az integrált áramkör ún. választható erősítésű eszköz, azaz nem a felhasználó által hozzáadott ellenállásosztó határozza meg az erősítés mértékét, hanem egy választó bemenetre adott feszültséggel lehet dönteni erről a paraméterről. A lehetséges választások az 1-szeres, 10-szeres és 50-szeres erősítések [23]. Az általunk alkalmazott K hőelemek közel 40 μV/°C meredekséggel rendelkeznek, a normál üzemi tartományban, mely várhatóan maximálisan 1000 °C mellett 40 mV-ot ad, mely még mindig nem számottevő, ezért a használt erősítés mértéke 50. Mivel az erősítő közel sem ideális, figyelembe kell venni az úgynevezett bemeneti nyugalmi áramot (input bias current). Ez a kiválasztott erősítő esetében 1 pA, mely nem lehet tetszőlegesen „nagy” érték (1…100 nA nagyságrendű), mert akkor a véges bemeneti ellenállású analóg-digitális (A/D) átalakítón már számottevő feszültségesés jönne létre, vagyis a mért elektromotoros erő kisebb lenne, mint a hőelem által – a hőmérséklet-különbség hatására – előállított érték, vagyis jelentős hibát vinnénk be a rendszerbe.

Típus	Vezetékek anyagai	Alkalmazási tartomány	Termofeszültség Δt = 100°C-ra (mV)
T	Cu-Ko*	–200…600	4,25
J	Fe-Ko*	–200…900	5,37
K	NiCr-Ni	–200…1200	4,04
S	PtRh-Pt	0…1500	0,64

2. táblázat Fontosabb hőelem típusok

A hőmérsékletek kalibrálása során egy MY-64 típusú multimétert hívtunk segítségül, mely hőelem érzékelővel is el van látva. A próbamérések során dokumentáltuk a multiméter által mért és a program által mutatott hőmérsékleteket. Így táblázatba rendezve meghatároztuk az összes hőelem faktor és ofszet értékét.

Terhelőnyomaték mérés

Mivel az általunk használt Kaliber 7934 típusú nyomatékmérő cella cellatényezője ismert (2 mV/V) az adatlap alapján [24], amit 5,85 V-os tápfeszültség mellett használunk. Kalibrálás során, működő gázturbina mellett különböző fordulatszámokon és a tengelyhez felszerelt vízörvényfék segítségével különböző terhelések mellett mértük a MY-64 típusú multiméterrel a szenzorból érkező feszültség értékeket, valamint a program által mért feszültséget, melyeket szintén táblázatba rendezve vizsgáltunk.

Tüzelőanyagfogyasztás mérés

A tüzelőanyag fogyasztás mérése szintén a már meglévő rendszer alapján működik. A programban gyakorlatilag ugyan az a mérés menete, mint a nyomásmérés esetén. A különbségek a kalibrálás során jelentkeztek. Itt a mérőedényben lévő tüzelőanyag tömege, valamint az erőmérő cellára ható erő segítségével határoztuk meg a szükséges értékeket. A mérés közbeni működése azonban eltér az eredeti koncepciótól. Jelenleg a program folyamatosan méri a tüzelőanyag mennyiségét a rendszerbe beépített erőmérő cella segítségével. A mérés kezdetén a kifogyasztó tartályt feltöltjük 1 kg tüzelőanyaggal, majd a program a kifogyasztó tartály mágnes szelepét elzárja. Amint a tüzelőanyag szint 0,5 kg alá esik, akkor a program nyitja a kifogyasztó tartály mágnes szelepét.

Fordulatszám-mérés

A fordulatszám mérése teljes mértékben az eredeti szenzor és jelformáló áramkör segítségével történt, az NI USB-6218-hoz az 1. táblázatban megadott módon csatlakozva, ahol a belső számláló méri a két jel között eltelt időt, ebből képes aztán frekvenciára, vagyis fordulatszámra visszaszámolni.

A próbapad átalakítása

A próbapadon igyekeztünk minimális átalakítást végezni. Lényegében a gázelvezető cső függőleges kivezetése jelent meg, mint újdonság, a régi hangtompítót egyelőre még nem alkalmazzuk. Ezen felül a fékgépen egy tartókonzol került kialakításra, ahol a vezérlő számítógép helyezhető el, továbbá azok az elektronikus áramkörök (beleértve az NI USB-6218-at is), melyek a mérés lebonyolításához szükségesek, a szívócsatornán lévő dobozban, illetve az alatta készített polcokon helyezkednek el, így minimalizálva a berendezés helyszükségletét. A jelenlegi konfigurációt az 5. ábra mutatja.



5. ábra: A Deutz T216 próbapad jelenlegi állapota

TESZTÜZEM

A gázturbina próbajáratásának vázlata

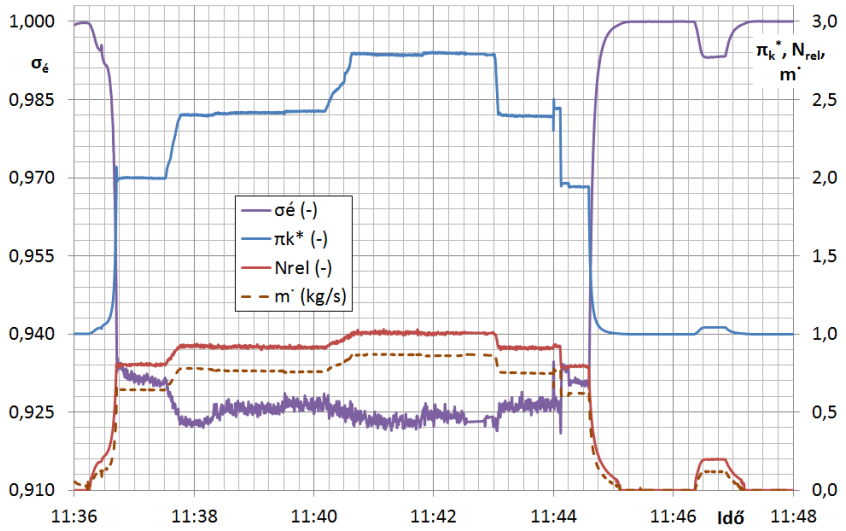
A mérés során célunk meghatározni a gázturbina jellegzetes pontjaiban a nyomás, hőmérséklet adatokat, valamint a gázturbina által leadott a tengelyteljesítményt a mérés ideje alatt, tizedmásodperces elbontással, majd az adatok ismeretében grafikusan ábrázolni az eredményeket. A procedúra előtt természetesen a gázturbinát elő kell készíteni a vizsgálat elvégzéséhez. Először a tüzelőanyag tartályt kell feltölteni a gázturbina specifikációinak megfelelő tüzelőanyaggal, esetünkben ez gázolaj. Majd meg kell bizonyosodni róla, hogy a vízörvényfék tartálya fel van-e töltve vízzel. Ezután csatlakoztatni lehet a számítógépet a mérő-adatgyűjtő rendszerhez, végül a próbapadot csatlakoztatjuk az elektromos hálózatra. A mérés menete a gázturbina indításával kezdődik. Az indítási folyamat során, az elektromos indítómotor 9500 $\frac{1}{min}$ fordulatszám értékre pörgeti a gázturbinát. Itt a program automatikusan kinyitja a nagynyomású elzárószelepet amellyel megkezdődik a tüzelőanyag égéstérbe való porlasztása, majd gyújtógyertya segítségével meggyullad, és létrejön az égés. Amint a fordulatszám eléri a 20 000 $\frac{1}{min}$ alapjárati értéket kikapcsolható az elektromos indítómotor, innen már csak a turbina többletteljesítmény áll rendelkezésre, melynek hatására kifut a 40 000 $\frac{1}{min}$ alapjárati fordulatszámra, ahol hagyjuk stabilizálódni, majd a fordulatszámot felemeljük 45 000 $\frac{1}{min}$ –re. Ezen az értéken terheljük a gázturbinát a vízörvényfék segítségével, majd a terhelésmentesítés után tovább elemeljük a fordulatszámot egészen 50 000 $\frac{1}{min}$-ig. Itt szintén a vízörvényfék segítségével, terheljük a gázturbinát. A fékezés megszüntetése után újra felvesszük az alapjárati fordulatszámot, majd a betáplálás megszüntetésével leállítjuk a gázturbinát. A leállítás után, mivel a tüzelőanyag betápláló vezetéken elhelyezésre került egy kézi elzáró szelep is, ezt elzárva, lehetőség nyílik az elektromos indítómotor üzemeltetésével a gázturbina belsejének a környezeti levegővel való hűtése.

A mérés kiértékelése

A LabView által rögzített adatok tizedmásodpercenként egy szöveges fájlba kerülnek mentésre, amelyet MS Excel táblázatban rendezünk. Mivel a mért adatok jelenleg csak differenciákat rögzítenek a hőmérsékletek esetében a környezeti hőmérséklethez képest, illetve nyomások esetén a környezeti nyomáshoz képest, ezért további, de egyszerű átszámításokra van szükség, és ezekkel az új értékekkel dolgozunk tovább. Meghatároztuk a kompresszor nyomásviszonyát és az égéstér nyomásveszteségét, valamint kiszámítjuk a gázturbina által leadott hasznos teljesítményt, mint a gázturbina üzemállapotára leginkább jellemző mennyiségeket. Ezeket a kiszámított értékeket ábrázoljuk diagram formájában, melyeket a 6. és 7. ábrákon mutatunk be.

Főbb nyomások

Az 6. ábrán látszik, hogyan változtak a jellemző nyomások illetve az azokból származtatott mennyiségek a mérés 12 perce alatt. Nyomon követhetjük az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezőjének ($\sigma_é$), a kompresszor nyomásviszonyának (π_k), valamint a gázturbinába belépő tömegáramának ($\dot{m}$) alakulását, miközben referenciaként a gázturbina relatív fordulatszáma (N_{rel}) is látható. Ez utóbbi a valós fordulatszám és a névleges 50 000 1/min hányadosa, amely a skálák összehangolása végett került ilyen formában ábrázolásra. Az időskála kis léptéke 15 s, a gázturbina próbaüzem során tehát közel nyolc percet töltött üzemi viszonyok között.



6. ábra Mért nyomásviszony és nyomásveszteség

Az indítási folyamat során megfigyelhető, hogy az indítómotor hatására közelítően tíz másodperc alatt éri el a 9000 1/min értéket a fordulatszám, melynél a tüzelőanyag-betáplálás megindul. Látható, hogy egy szintén nagyjából tíz másodpercnyi szakasz következik, melyben a fordulatszám emelkedése bár gyorsabb, mint azt megelőzően, de még nem számottevő. Ez a szakasz az égés stabilizálódását takarja, melyet a 6. ábrán tovább részletezünk. Nem sokkal 11:36:30 után a gyorsítás mértéke megugrik, és ismét közel 10 s elteltével a forgórész már a névleges 80%-át jelentő alapjárati fordulatszámon jár. Eközben megfigyelhető, hogy milyen drasztikusan változik az égéstér össznyomás-visszanyerési tényezője, valamint, hogy ez nem áll be azonnal egy értékre, hanem állandó fordulatszám mellett lassan tovább csökken. Mivel a tendencia egy bizonyos értékhez konvergáló jelleget mutat, ez vélhetően az indítási tranziens folyamat lecsengése, melynek során a gázturbina szerkezeti elemei felmelegednek, és végül

elérik az üzemi hőmérsékletet. Az égéstér nyomásvesztesége ugyanis nem elhanyagolható mértékben függ a hőfoktól. Amennyiben tovább tartottuk volna ezt az üzemállapotot, valószínűleg a $\sigma_{é}$ rövidesen 0,927 körüli értéken stabilizálódott volna.

Az alapjáraton történő stabilizálódást követően 11:37:30 körül gyorsítottunk 45 000 1/min, azaz 90%-os értékre. Az előzőleg 2,0 közeli kompresszor nyomásviszony 2,4-re nőtt, az égéstér összenyomás-visszanyerési tényezője pedig 0,925-ös érték körül változott. Ennek az oka az égéstér összenyomás-visszanyerési tényező $(p_3^*)/(p_2^*)$ és a p_3^* nagymértékű függése a turbina előtti hőmérséklettől. Az 6. ábra nem tartalmazza a terhelés alakulását, de összevetvén a 7. ábra görbéivel megfigyelhető, hogy minden egyes $\sigma_{é}$ változás egybefügg a gázturbina terhelési állapotának változásával. Mivel a terhelés növelésének hatására emelkedik a hőmérséklet, ez pedig rontja a hatásfokot is. A kompresszor nyomásviszonya azonban jól kivehetően kirajzolódik, hogy hogyan alakult a különböző fordulatszámok esetén. Látható, hogy a π_k^* maximális értéke 500001/minnél közelítette meg a gyártó által megadott 2,8-es névleges értéket, de nem érte el teljességgel azt, mivel a mért környezeti hőmérséklet (t_0 = 24,5 °C) eltért a Nemzetközi Egyezményes Légkörben (NEL) foglaltaktól. Mivel részletes kompresszor karakterisztika jelenleg még nem áll rendelkezésre, így csak becsülni lehet az eltérést az átszámított fordulatszám alapján:

$$n_{\text{á}} = n \cdot \sqrt{\frac{288}{T_0^*}} = 50000\,\frac{1}{min} \cdot \sqrt{\frac{288}{297{,}5}} = 49195\,\frac{1}{min} \rightarrow n_{rel} = 98{,}4\% \qquad (5)$$

Az eltérés tehát közel 1,5%, ennyi eltérés nagyjából 2,77 körüli nyomásviszonyt eredményezne, ezt a mérés is megerősíti.

A tömegáram változása is figyelemmel kísérhető a teszt során. Jól látható, hogy állandó fordulatszám mellett történő terhelés növelésének hatására, enyhén csökken az idő múlásával. Ebben a vonatkozásban sem sikerült elérnünk a gyártó által megadott értéket, attól közel 3%-kal elmaradó, 0,87 kg/s értéket regisztráltunk. Ez a csökkenés szintén a NEL-től való eltéréssel magyarázható.

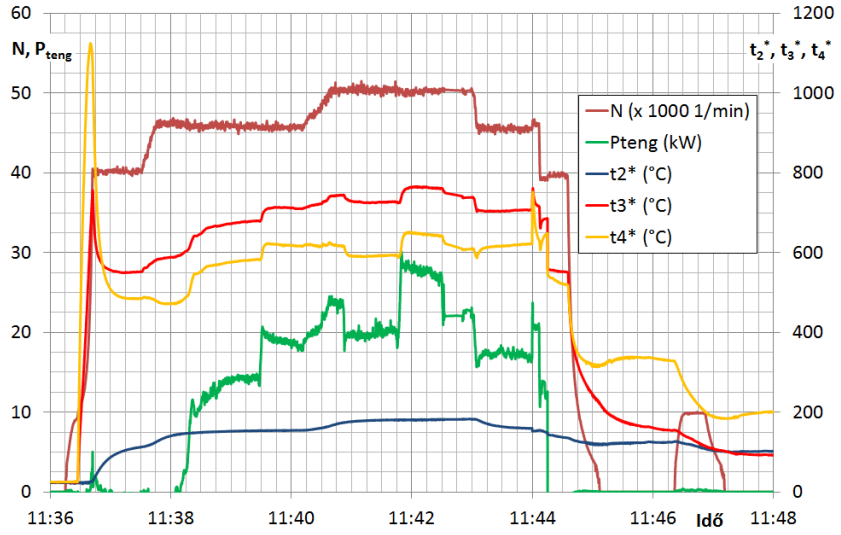
A diagram végén látható kismértékű és rövid nyomásnövekedés a leállítási folyamat végeztével működésbe hozott indítómotor hatása, melyet a hajtómű hideg átforgatása miatt, a hatékonyabb hűtés érdekében kapcsoltunk be.

Hőmérsékletek és teljesítmény

A 7. ábra alapvetően a hőmérsékletek és a hasznos teljesítmény nyomon követését teszi lehetővé, ismét feltüntetvén a fordulatszámot, mint viszonyítási alapot. A görbék a 7. ábrán tehát rendre a fordulatszám (N), a gázturbina által leadott hasznos teljesítmény (P_{teng}), a turbina előtti torlóponti hőmérséklet (t_3^*), a turbina utáni torlóponti hő-mérséklet (t_4^*), valamint a kompreszszor utáni torlóponti hőmérséklet (t_2^*). A t_4^* és a t_3^* diagramokon az indítási fázisban látszik egy nagyarányú hirtelen melegedés, ez a gázturbinák indítása során keletkező jelenség, mivel ilyenkor az égés már folyamatban van, azonban a gázturbinába belépő levegő tömegárama még elég kicsi, ezért keletkezik a magas hőmérséklet. Ezért kell figyelemmel kísérni az indítási folyamatot, és egészen nagy, közel 40%-os névleges fordulatszámig a villamos indítómotorral a gyorsítást segíteni. De az alapjárati fordulatszámot elérve, már drasztikusan csökken a hőmérséklet, és beáll a normális tartományba.

Nagyon fontos megemlíteni azt, hogy helyenként, de mindig tranziens folyamatok során a turbina

utáni hőmérséklet túlnő a turbina előtti értéken, ami átlagos értékeket feltételezve fizikailag lehetetlen volna. Itt azonban arról van szó, hogy mindkét hőmérsékletet csupán egy-egy pontban mintavételezzük, így az adott keresztmetszetben uralkodó hőmérséklet-mező inhomogenitásai nagymértékben befolyásolni képesek a mért értékeket. Az állhat tehát a látható jelenség hátterében, hogy a turbina után elhelyezett érzékelő vélhetően éppen a keresztmetszet egy „forró pontján" helyezkedik el, melyet tranziens folyamatok során jóval nagyobb hőterhelés ér, mint a keresztmetszetre érvényes átlag, így pillanatnyilag hamis értéket mutat, mely a feltehetően lassabb reagálású és a saját átlagértékéhez jobban közelítő turbina előtti hőmérséklet fölé is kerülhet.



7. ábra A mért hőmérsékletek és a gázturbina hasznos teljesítménye

Ez a jelenség, tekintettel arra, hogy a szenzor állandósult állapotban helyes értékeket közvetít, csupán az átmeneti állapotokban előforduló rendellenességnek, de nem a szenzor teljes működésképtelenségének a jele. Így tehát ezt az anomáliát bizonnyal meg lehetne szüntetni több érzékelőnek a turbina utáni keresztmetszetben történő elhelyezésével, melyekből átlagot számítva volna meghatározható a t_4^* effektív értéke.

A diagramról leolvasható továbbá az adott pillanatban a hasznos tengelyteljesítmény. Ezzel párhuzamosan jól megfigyelhetőek a terhelés hatására bekövetkező hőmérséklet-változások is. Mint az a korábbiakban említést nyert, az indításkori rendellenességek elkerülése végett mindenképpen üres fékberendezéssel kell az indítást végrehajtani. A fékgépbe a víz betáplálása nem sokkal 11:38 után kezdődött, amikor egy percnyi tranziens folyamat során a nyomaték nulláról közelítőleg 50 Nm-re emelkedett, ez nagyjából 15 kW hasznos terhelésnek felel meg. Észre lehet venni a terhelés jelentősebb lépcsői mellett annak ingadozását is, mely a vízörvényfék manuális működtetésére visszavezethető eltérések. A fékgép ugyanis minden esetben egy-egy meghatározott állapotba lett állítva, így elvben a terhelésnek lépcsős jelleget kéne mutatnia, ezzel szemben vannak benne helyenként olyan szakaszok, melyekben számottevő csökkenést tapasztalhatunk. Ilyenkor a fékgépet kezelő személynek kéne a terhelést manuálisan utánállítani abban az esetben, ha a kísérlet megköveteli az állandó teljesítmény tartását. Ez a későbbiekben esetleg hátrányt jelenthet, hogy a mérés állandó beavatkozást igényel.

ÖSSZEFOGLALÁS

Elért eredmények

Az a leírtakból egyértelműen kiviláglik, hogy a kiindulási állapothoz képest nagy előrelépést sikerült tenni. Az elmúlt időszakban munkánkkal elértük, hogy a próbapadot a modern kor követelményeinek megfelelően lehet alkalmazni, mint oktatási, mint kutatási célra. Megvalósultak azok a próbapadot érintő változtatások, melyek az új elhelyezés miatt voltak szükségesek (pl. gázelvezető cső).

Elkészült egy a régitől gyökeresen eltérő mérő-adatgyűjtő rendszer, melynek hardvere sokkal nagyobb mintavételi sebességet, felbontást és csatornaszámot kínál. Ez utóbbi tulajdonsága a további fejlesztésekre lesz majd jótékony hatással. Az alkalmazott számítógép is természetesen illeszkedik az elvárásokhoz, így nem jelent gátat a nagy adatforgalom szempontjából. A szoftver is alapjaiban született újjá, fejlett grafikus környezetben esztétikus, felhasználóbarát külalakot kapott, továbbá a működése során automatikusan ment minden bejövő adatot, így a mérést követően bármilyen jelenség visszakereshetővé válik.

Bár a jelenlegi másodpercenkénti tíz mintavétel még nem túlzottan nagy érték, hogy olyan dinamikus folyamatok, mint pl. pompázs vizsgálatára, alkalmas legyen, de az átlagos oktatási-kutatási igényeket már így is kielégíti, és jelentősen javítható, amennyiben szükséges. A jelenlegi rendszer már jóval több adatot szolgáltat a felhasználó számára, mint az eredeti változat. Nagy előny továbbá a modernizálással megtakarított terület, ahova akár egy új laborberendezést is be lehet szerelni.

Továbbfejlesztési lehetőségek

Az elért eredmények ellenére a próbapadot számos vonatkozásban tovább lehet még fejleszteni. Első lépésként a mérési adatfájlba történő rögzítés módosítását említhetnénk, melyben nem nyers adatokat, hanem már kész jellemzőket (π_k^*, $\sigma_é$, P_{teng} stb.) lehetne elmenteni, ezáltal lecsökkentve az üzemelés utáni kiértékelés idejét.

A gázkar mozgatása még mindig a régi rendszer szerint működik, de a már a szoftverben megjelenik ennek a csúszkával mozgatható továbbfejlesztett változata. Ez nyilván egy teljesen új szabályozást követel meg, részletes visszacsatolással, ellenben a most kiépített végállás-kapcsolókkal határolt rendszerrel.

Nagy mértékben fokozná a használhatóságot, ha az üzemeltetést végző személy nem csak felle parancsot adhatna a gázkarnak, hanem egy konkrét fordulatszámot lehetne beállítani. Ilyenkor a csúszka által képviselt referencia jel alapján a program szabályozó algoritmusa addig mozgatja a gázkart, amíg az el nem éri azt a pozíciót, melyben a fordulatszám az általunk megkívánttal megegyezik.

Ezen túlmenően az érzékelők területén is lenne bővítésre lehetőség. Nagyon sok olyan paraméter van (pl. olajnyomás és -hőmérséklet, vibráció), melyeket jelenleg nem mérünk. Az NI USB-6218 eszközön jelenleg 13 analóg csatornát használunk, tehát még 19 lehetőség nyílik, azaz sokáig nem fog korlátozó tényezőt jelenteni. Természetesen a meglévő szenzorok bővítése is érdekes lehetőségeket kínál, említhetjük pl. a fentebb részletezett hőmérsékleti anomáliát a turbina utáni mérési ponton, ahol több szenzor elhelyezése az adott keresztmetszetben bizonnyal megoldaná a most fennálló problémát.

Nagyobb volumenű fejlesztés is elképzelhető a rendszeren. Ugyanis a jelenleg használt vízörvényfék számottevően lassítja a mérést, manuális beavatkozást igényel, vagyis cseréje egy korszerűbb, pl. örvényáramos fékre, esetleg hálózati generátorra nagy mértékben emelné a berendezés képességeit. Ezen felül még érdemes volna fontolóra venni egy szűkítő alkalmazását a fúvócsőben, melynek hatására a tengelyteljesítmény mellett a tolóerő létrehozását is imitálni lehetne, vagyis sugárhajtómű működését is szimulálhatnánk a kísérletek során.

Végül pedig megemlíthető, hogy bár készült doktori értekezés a gázturbina szabályozás témakörében ezen a próbapadon [9], az csak az elméleti vizsgálatot foglalta magában, kivitelezett szabályozó a jelenlegi röpsúlyos berendezés helyett még nem készült. Kézenfekvő tehát, hogy a későbbiekben egy FADEC (Full Authority Digital Electronic Control, teljes hatáskörű, digitális elektronikus szabályozás) elven működő rendszert fejlesszünk ki.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Foroozan ZARE, VERESS Árpád: Derivation and Application of a New Equation for Design and Analysis of Triple Spool Mixed Turbofan Jet Engines with Verification. Acta Polytechnica Hungarica 13:(6) pp. 147-162. (2016)

[2] VERESS Árpád, BICSÁK György, ROHÁCS Dániel: Pressure Loss and Flow Uniformity Analysis of Baseline and Redesigned Engine Inlet Duct for a Small Turboprop Aircraft. In: Czech Aerospace Proceedings, 2016/1, pp. 3-9.

[3] BICSÁK György, SZIROCZÁK Dávid, Dr. ROHÁCS Dániel: Changes in Aerospace Development Process Trends. In: Rolandas Makaras, Robertas Keršys, Rasa Džiaugienė (szerk.), Proceedings of 20th International Scientific Conference Transport Means 2016.. 1159 p., Juodkranté, Litvánia, 2016.10.05-2016.10.07. pp. 528-535.

[4] Jakub HNIDKA, Jiří PEČINKA: Measurement automation for small jet engine testing. In: SAMI 2016, pp. 29-34. ISBN 978-1-4673-8740-8, DOI: 10.1109/SAMI.2016.7422977

[5] Ladislav FŐZŐ, Rudolf ANDOGA, Radovan KOVACS: Thermo-dynamic cycle computation of a micro turbojet engine. 2016 IEEE 17th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI), Budapest, 2016, pp. 75-80. doi: 10.1109/CINTI.2016.7846382

[6] JeongMin SEO, Hyung-Soo LIM, JunYoung PARK, Moo Ryong PARK, Bum Seog CHOI: Development and experimental investigation of a 500-W class ultra-micro gas turbine power generator. Energy, 2017, pp. 9-18. ISSN 0360-5442, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.012

[7] Thanate SANGSAWANGMATUM, Udomkiat NONTAKAEW: Design of Radial Inflow Turbine for 30 kW Microturbine. MATEC Web of Conferences 95: 3rd International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME), 06005 (2017) DOI: 10.1051/matecconf/2017950 (online) url: http://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2017/09/matecconf_icmme2017_06005.pdf (2017.03.12)

[8] A. HOXIE, M. ANDERSON: Evaluating high volume blends of vegetable oil in micro-gas turbine engines. Renewable Energy, 2017, ISSN: 0960-1481, pp. 886-893, doi: 10.1016/j.renene.2016.09.054

[9] AILER Piroska: Kisteljesítményű gázturbina modellezése és nemlineáris irányítása. PhD disszertáció, BME, 2003.

[10] KLÖCKNER-HUMBOLDT-DEUTZ AG: Technisches Handbuch Betrieb/Wartung Gasturbine T216. Oberursel, 1980. (online) url: http://documentslide.com/documents/handbuch-t216.html (2017.03.12)

[11] Christopher OERTEL: Messung einer Drehzahlkennlinie der Kleingasturbine KHD T216. Diplomamunka, Technische Univerität Wien, 2015. (online) url: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_240372.pdf (2017.03.21)

[12] Energetische Nutzung von RME-basiertem Glycerin in der Kleingasturbine an der Universität Rostock. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Rostock, 2009. (online) url: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22020106.pdf (2017.03.12)

[13] SIMON Dávid István: Tanszéki gázturbinás próbapad modernizálása. BSc szakdolgozat, BME VRHT, 2014.

[14] NATIONAL INSTRUMENTS: DAQ M Series NI USB-621x User Manual. Texas, USA, 2009 (online) url: http://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf (2017.03.12)

[15] NATIONAL INSTRUMENTS: NI USB-621x Specifications. (online) url: http://www.mdi-dd.de/pdf/621xspez.pdf (2017.03.12)

[16] Hans-Petter HALVORSEN: Introduction to LabVIEW. (online) url: http://home.hit.no/~hansha/documents/labview/training/Introduction%20to%20LabVIEW/Introduction%20to%20LabVIEW.pdf (2017.03.12)

[17] HONEYWELL: 24PC series catalog. (online) url: https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=49846 (2017.03.12)

[18] HONEYWELL: 142PC series catalog. (online) url: https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1814840.pdf (2017.03.12)
[19] BENEDA Károly: Modular Electronic Turbojet Control System Based on TPR. Acta Avionica, Vol. 17, Issue 1, 2015. ISSN 1339-9853 (online) url: (2017.03.12)
[20] NXP: MPXV5004G pressure sensor datasheet. (online) url: http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MPXV5004G.pdf (2017.03.12)
[21] NXP: MP3V5004GVP pressure sensor datasheet. (online) url: http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MP3V5004G.pdf (2017.03.12)
[22] Termoelem-hőmérők (elméleti összefoglaló). BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, 2014. (online) url: ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Aramlas-_es_hotechnikai_meresek_BMEGEATAG02/elmelet/3_Termoelem-homerok.pdf (2017.03.13)
[23] MICROCHIP: MCP6G04 választható erősítési tényezőjű erősítő adatlapja. (online) url: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22004b.pdf (2017.03.12)
[24] KALIBER KFT.: A 7934 típusú forgótengelyes nyomatékmérő adatlapja. Budapest. (online) url: http://members.chello.hu/kaliberkft/documents/7934.pdf (2017.03.12)

DEVELOPMENT OF TURBOSHAFT ENGINE TEST BENCH

Our article describes the development process of the Deutz T216 test bench at BME Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles. It states those conditions which have led to the necessity of development, meanwhile it also gives details about the capabilities of the old system, which significantly required improvement. The core of the article describes the data acquisition and control system, in which the reader gets an thorough picture about the differences between newly developed and original systems. The test bench has been put into operation after a prolonged preservation period, thus the authors have been able to conduct measurements after finalizing the control system. Finally, mostly based on the newly measured data sets and operational conditions of the gas turbine, conclusions are drawn and some further development possibilities are also shown.

Keywords: *turboshaft engine, turboprop engine, test bench, LabVIEW, data acquisition, Deutz T216*

Beneda Károly Tamás (PhD) mérnök-tanár AEROK Repülésműszaki Oktató és Szolgáltató kft. karoly.beneda@aerok.hu orcid.org/0000-0003-1900-7934	Beneda Károly Tamás (PhD) maintenance training engineer AEROK Aviation Technical Training Centre karoly.beneda@aerok.hu orcid.org/0000-0003-1900-7934
Simon Dávid István (BSc) MSc hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék simon.david.istvan@gmail.com orcid.org/ 0000-0001-9159-7233	Simon, Dávid István (BSc) MSc Student Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles simon.david.istvan@gmail.com orcid.org/ 0000-0001-9159-7233

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-15-0386_Beneda_Karoly-Simon_David.pdf

Vas Tímea

NDAB (NATO[1] DEPLOYABLE AIRBASE) SAJÁTOSSÁGAI A NEMZETKÖZI POLGÁRI ÉS KATONAI SZABVÁNYOK TÜKRÉBEN

Az NDAB mobil telepíthető repülőterek, a NATO Smart Defence politikai kezdeményezéseinek egyike, melynek célja, hogy a feladatban részt vállaló tagállamok megosszák egy repülőtér üzemeltetésével járó anyagi és humán erőforrásokat. Ezáltal közösen telepítsenek és tartsanak üzemeben, akár szélsőséges éghajlati körülmények között is, egy repülőteret, az igényektől függően katonai és polgári légijárművek fogadására. Felmerül a kérdés, hogy egy ilyen repülőtér kialakítása és üzemeltetési eljárásai milyen mértékben mutatnak azonosságot a nemzetközi polgári és katonai szabályzókkal, figyelembe véve, hogy azokat a feladatban részvevő nemzetek sem azonos mértékben alkalmazzák.

Kulcsszavak: *NDAB, expedíciós repülőtér, futópálya, burkolt és nem burkolt felületek, nemzetközi polgári és katonai szabványok*

Az NDAB repülőtér létrehozása, egy teljesen előkészítetlen, kopár területen[2] történne, ahol nem áll rendelkezésre egyéb infrastruktúra. Az ambíciószint elérésekor a repülőtér 24/7[3] időtartamban, léginavigációs- és repülőtéri szolgálatok rendelkezésre állása mellett képes lenne katonai és polgári forgalom fogadására. Ennek az ambíciószintnek az elérését, a résztvevő nemzetek 30 nap[4] -os készenléti idő alatt teljesítenék. Fontos megjegyezni, hogy az NDAB nem támaszkodna a befogadó nemzet infrastruktúrájára, ami ez esetben egy használaton kívüli, de még repülőgépek fogadására alkalmassá tehető repülőteret jelent, hanem kizárólag telepíthető eszközök, és egyéb mobil infrastruktúra segítségével tenné fogadóképessé a repülőtérként funkcionáló területet. Egy repülőtér létesítéséhez először is repülésbiztonsági szempontból alkalmas területet kell kijelölni, figyelembe véve a talaj minőségét, teherbíróképességét, annak az időjárási körülmények miatti változásait. A repülőtér környezetében található akadályok magassága, az uralkodó szélviszonyok, az előforduló szignifikáns vagy szélsőséges meteorológiai körülmények, ornitológiai helyzet és vadállatok előfordulása is kockázati tényezőként értékelendő az alkalmas helyszín kijelöléskor [1]. A repülőtér rendelkezésre állása, üzembentartásának tervezett időtartama, és a repülőteret igénybe vevő légijárművek üzemeltetés sajátosságai, időjárási hatások, talaj errózió mértéke egyaránt befolyásolják annak eldöntését, hogy a teherbíró felületeket burkolattal vagy egyéb nem burkolt felületként szolgáló természetes anyagokkal látják el. A telepíthető repülőterek gondolata, nem újdonság, már a II. világháború idején is hoztak létre ideiglenes bázisokat, melyek a hadszíntérhez közel helyezkedtek el, ezzel támogatva légi-

[1] NATO: North Atlantic Treaty Organization
[2] Bare base, bare airfield-teljesen előkészítetlen terület
[3] 24/7: a hét minden napján 24 órában
[4] NDAB koncepció alapján a műveleti terület eléréséhez rendelkezésre álló idő; DEPLOYABLE AIR TRAFFIC MANAGEMENT (DATM) DRAFT CONCEPT OF OPERATIONS July 2016 Ver.4.1

műveletek hatékonyságát, és hadszíntér rövid úton való elérését. Napjainkban az amerikai légierő doktrínájában[5] expedíciós repülőtérként ismert ideiglenesen telepített repülőbázisok hasonlítanak leginkább az NDAB repülőtér sajátosságaira, ezért elsőként a két repülőtér kialakításnak és filozófiájának hasonlóságait és különbségeit mutatom be.

EXPEDÍCIÓS REPÜLŐTEREK [2][3]

Az amerikai terminológiában AEF (Aerospace Expeditionary Airforce) erőket támogató légibázisok kialakításánál, attól függően, hogy a légierő, haditengerészet vagy a tengerészgyalogság légijárműveinek a fogadására szolgál, először is az alapvető eszközök, alkalmazandó szabványok, szolgáltatások, infrastruktúra fejlesztésével, biztonsággal és védelemmel szemben támasztott követelmények beazonosítására van szükség. Meg kell határozni, milyen eszközöket, felszereléseket követel az AEF támogatása, milyen erők, eszközök és erőforrások állnak rendelkezésre, valamint a létesítmények működésének fenntartását mennyi időre tervezik. Mind ezek megvalósítása komoly mérnöki munkát igényel. A megvalósítás elméleti háttere, a stratégiai szinttől a taktikai szintekig egymásra épülő kidolgozott eljárásokból származik. A legmagasabb szinten az úgynevezett „műveleti doktrínák" találhatóak (AFDD-Air Force Doctrine Document), alatta az expedíciós repülőtér egyes részterületeit tartalmazó „irányelvek" helyezkednek el (AFPD-Air Force Policy Directives), végezetül a taktikai megvalósítás iránymutatásait tartalmazó kézikönyvek (TD-Tactical Guidance). Az expedíciós repülőterek a hidegháború végétől napjainkig a több kontinenst érintettek, ezeken belül számos állomáson megvalósultak.

Expedíciós repülőterek története

Az 1980-as évek végéig az Egyesült Államok elsődleges fenyegetésnek a Szovjetúnió haderejét tekintette. Ezeket az időket elsősorban az jellemezte, hogy az előretolt katonai bázisrepülőterek, a már kiépített infrastruktúrával rendelkező, állandó személyzettel és fixen telepített, repülőtéri infrastruktúrával felszerelt helyszíneken (1.ábra) települtek. A mobil, telepíthető képességek elsősorban a humanitárius műveletek támogatására létre hozott ideiglenes repülőtereken, leszállóhelyeken valósultak meg, míg a harcoló alakulatok támogató légierője a jól kiépített repülőtereken maradtak.



1. ábra Tengerentúli bázisok a Hidegháború idején **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**

Ahogy az állandó települési helyű bázisokat egyre másra felszámolták, úgy mutatkozott egyre nagyobb igény a mobil, gyorsan telepíthető repülőterekre, melyekről a harcokban résztvevő erők

[5] Air Force Pamphlet 10-219, Volume 6 Planning and Design of Expeditionary Airbases

támogatása megvalósítható. Egyre nagyobb szükség lett olyan képességre, mellyel a Föld egyik pontjáról a másikra gyorsan és hatékonyan át lehet települni. Az 1990-es kezdetétől már a külföldi műveletek támogatása vált az egyik elsődleges feladattá. Az Öböl háború kezdete óta, mind a harcoló, mind a támogató erők előretolt repülőterekről hajtották végre műveleteiket, így az expedíciós, telepíthető repülőbázisok az Egyesült Államok légierő alakulatai számára hétköznapivá váltak. 2005-re már csak néhány állandó repülőbázist tartottak fenn (2. ábra), a többi, távoli helyszín mind ideiglenes, hosszabb rövidebb települést, műveletet biztosító repülőtérről valósult meg.



2. ábra Tengerentúli állandó településű repülőbázisok 2005-ben Hiba! A hivatkozási forrás nem található.

Ahogy a terrorizmus elleni harc világméretűvé vált, úgy növekedett az expedíciós repülőterek száma a különböző kontinenseken. Jelenleg több száz kisebb nagyobb repülőbázis és leszállóhely működik (3. ábra). Az expedíciós műveletek sikere az „light, lean and lethal”[6] összefüggésében rejlik, ami a harcoló és azokat támogató erők gyors, precíz és praktikus áttelepülését jelenti. A cél a támadó légierő ütőképességének és mobilitásának növelése, ezért a célterület közelébe telepítik a hadianyagot, lakó konténereket, élelmiszer és víztartalékot, szállítókapacitást, üzemanyagot stb.



3. ábra Telepíthető repülőbázisok terrorizmus elleni harc kezdetétől [2]

Expedíciós repülőterek fajtái

Az expedíciós repülőtereket öt csoportba soroljuk, méretük, hadszíntértől való távolságuk, illetve funkciójuk alapján. Az első ezek közül, az úgynevezett FOL (Forward Operating Location), vagyis Előretolt Műveleti Leszállóhely, ami rendszerint a célterülethez a legközelebb helyezkedik el, rövid időtartamú településsel jár, és olyan műveleteket hajtanak végre innen, melyek a kábítószer csempészet ellen irányulnak, vagy a harci kutató mentő feladatokat ellátó

[6] „light, lean and lethal”-könnyen, megbízhatóan, halálosan

egységek települését szolgálják. Korlátozott infrastruktúrával bírnak, ami azt jelenti, hogy ezek a leszállóhelyek 90 nap vagy annál rövidebb idejű kitelepülést igényelnek, nincsen rajtuk hagyományos futópálya, csak stabilizált földfelszín szolgálja a biztonságos fel és leszállásokat. Az FOL-k nagyon zord körülmények és feltételek melletti ideiglenes tábort és leszállóhelyet jelent. A következő az úgynevezett FOB (Forward Operating Base) vagyis Előretolt Műveleti Bázisok, melyek feladata és infrastruktúrája lehetővé teszi, hogy támogassák a harci kutató mentő és felderítő műveleteket, ehhez tartozó légijárműveket és kiszolgáló egységek befogadásra képesek. Habár ezek a bázisok hosszabb időtartamú jelenlétet feltételeznek, mégsem rendelkeznek egy repülőbázis teljes támogató infrastruktúrájával, mivel a feladatuk, hogy az FOL-ek számára háttérként szolgálva támogatást nyújtsanak, így az ő jelenlétük sem sokkal hosszabb, mint az FOL települési ideje. A MOB-k (Main Opearting Base), vagyis Fő Műveleti Bázisok, melyek rendelkeznek a teljes és szükséges infrastrukturális háttérrel, a hosszabb idejű jelenléthez, ami meghaladhatja a 6 hónapot és elérheti vagy meghaladhatja az 5 évet is. Az ilyen méretű bázisokon, folyamatos működő műveleti parancsnokság és parancsoki szervezeti egységek is jelen vannak, teljes körű támogatást képesek nyújtani a harcoló alakulatoknak, és logisztikai bázisként is szolgálnak. Az ISB-k (Intermediate Stage Base) funkciója, hogy egy közbenső repülőtérként szolgáljon az MOB és az előretolt műveleti terület között. Egyfajta átrakodó bázisrepülőtérként funkcionál, ezért rendelkeznie kell a szállítmányok átrakodására, ideiglenes tárolására alkalmas helyekkel, eszközökkel, személyzettel. A WB-k (Warm Base), ahogy az elnevezésük is elárulja, Melegedő Bázisok, arra szolgálnak, hogy a műveleti területről visszatérő erők feltöltsék megfogyatkozott muníciójukat, készleteiket és az elhelyezési lehetőségek rövid regenerálódást is biztosítsanak, mielőtt újra visszatérnek a műveleti szektorokba.

Az expedíciós repülőterek, leszállóhelyek fajtájától és a helyszínen való jelenlét időtartamától függően, ezekhez a bázisokhoz különböző szabványok tartoznak, melyek elsősorban azt a mérnöki munkát segítik, ami bázis funkciójától függő elemek, létesítmények, repülőtéri berendezések és egyéb támogató eszközök helyszínre történő kitelepítését és üzemeltetését jelentik. A szabványok három szintet, és a hozzájuk tartozó funkciókat definiálják. Az első az úgynevezett ESA (Expeditionary Standard Airbase), ami a 90 nap vagy annál rövidebb idejű jelenlétre tervezett repülőbázisok elemeit tartalmazza, ilyen az FOL és FOB funkciókat ellátó telepített bázisok. Ezeket megfelelően gyártott és szervizelt berendezésekkel látják el, fontos, hogy a feladatok végrehajtásához szükséges infrastruktúrával és logisztikai támogatással rendelkezzenek. A következő szabvány az ISA (Initial Standard Airbase), mely olyan kialakítású repülőbázisokat jelent, melyek rendelkeznek a hosszabb idejű, akár 6 hónap időtartamú jelenlétet biztosító logisztikai háttérrel. Ezen a repülőbázisok kialakítása minimális mérnöki munkát igényel, ahhoz, hogy onnan műveleti repüléseket kezdhessenek, ezért igénybe veszik a befogadó nemzeti támogatásként esetlegesen felajánlott infrastruktúrát. Az FOL, FOB és a kezdeti szakaszban az MOB és ISB is ennek a szabványnak felelnek meg. A TSA (Temporary Standard Airbase) szabvány olyan rekonstrukciós programot foglal magába, ami lehetővé teszi, a hosszabb idejű, akár 24 hónapot elérő tartózkodás feltételeit. Mindazonáltal még mindig csak ideiglenesen telepített eszközök, infrastruktúra, létesítmények üzembe helyezésével jár, melyek a műveleti feladatok kezdetétől biztosítják a személyzetek számára a hatékony bevetések végrehajtásához szükséges logisztikai hátteret. Végezetül a hosszútávú akár 10 év időtartamot elérő jelenlét fenntartásához a repülőbázist az EPCS (Enduring Presence Construction Standard) szabványok

szerint építik ki, ami már tartalmaz állandó telepítésű eszközöket, berendezéseket és létesítményeket is. Olyan anyagokat, rendszereket alkalmaznak, melyek hatékonysága, üzemeltetési feltételei és életciklusa is hosszútávú igénybevételt szolgálja.

EXPEDÍCIÓS REPÜLŐTEREK ÉS NDAB ÖSSZEHASONLÍTÁSA [2][3][4]

Az telepített repülőbázisok ezen, két formájának összehasonlításához, a jelenleg rendelkezésre álló és nyilvánosan elérhető nemzetközi dokumentumokat használtam. Ezek a források alkalmasak a definíciók és a használatos terminológia azonosságainak és különbségeinek bemutatására. Először is érdemes tisztázni, hogy az expedíciós- és a NATO telepíthető légibázis közötti alapvető különbség abból származik, hogy míg az első esetében teljes mértékben az Egyesült Államok erőinek részvételével hozzák létre és üzemeltetik a repülőteret, a másodiknál egy szövetségi együttműködés biztosítja a szükséges erőket, eszközöket, szakszemélyzetet repülőtér üzemeltetéséhez. Mindez maga után vonja azt a következtetést, hogy a NATO szövetségben részt vállaló nemzetek, milyen nemzeti szabványok alapján működtetik saját repülőbázisaikat és azok milyen mértékben felelnek meg a nemzetközi előírásoknak, mely a területhez kapcsolódó NATO szabványokat fogadtak el és alkalmaznak, valamint hogyan képesek a telepíthető repülőbázissal együtt járó feladatokat saját feladatrendszerükbe adaptálni.

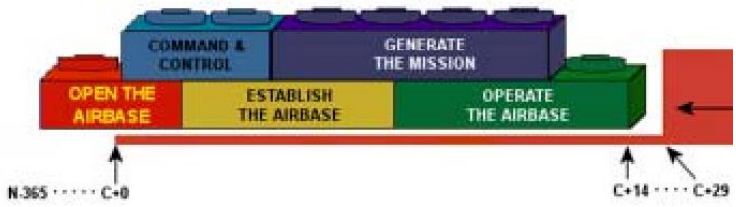
Mindkét terminológiában fellehető telepíthető repülőbázis fogalomkörében, a kopár vagy teljesen előkészítetlen területen való repülőtér létesítés, amit a „bare base" illetve „bare airfield" definíciók magyaráznak. Az expedíciós repülőterek esetében a „bare base"[7]olyan helyszínt jelent, ahol van rendelkezésre álló futópálya, gurulóutak és előterek, valamint vízforrás, utóbbi hordozható is lehet. A helyszín annak alapján kerül kijelölésre, ahonnan a leghatékonyabban lehet a műveleteket támogatni, ezért ebben a koncepcióban is szükség van mobil, könnyen telepíthető, előre csomagolt eszközökre, melyek szállítása légi úton könnyen megoldható. Az NDAB terminológiában a „bare airfield" olyan területet jelent ahonnan hiányzik a legtöbb NATO műveletek végrehajtásához szükséges kapacitás, ami nemcsak rekonstrukciót, de az üzemeltetéshez szükséges személyzetet és eszközöket igényel. Esetleg rendelkezhet egy üzemeléshez rendelkezésre álló felleszállómezővel és az ahhoz tartozó munkaterülettel. Fontos különbség a két repülőbázis tekintetében, hogy míg az expedíciós repülőterek létesítéséhez befogadó nemzeti támogatást vesz igénybe az Egyesült Államok, addig az NDAB koncepcióban befogadó nemzeti támogatás nélkül, kizárólag a résztvevő nemzetek erőforrásaival hozzák létre és üzemeltetnék a repülőteret. Érdemes azt is kiemelni, hogy az Egyesült Államok légierője évtizedekre visszanyúló tapasztalattal és megfelelő erőforrásokkal rendelkezik az expedíciós repülőterek létesítésében és működtetésében, addig az NDAB megvalósítása még az előkészítés fázisában van.

Szervezeti összefüggések tekintetében vagyis, hogy az egyes telepíthető repülőterek, leszállóhelyek milyen infrastruktúrával rendelkeznek, és milyen támogatásra támaszkodnak szintén látható különbségeket lehet felfedezni. Az expedíciós repülőtereknek, öt csoportja van, az FOL-FOB-MOB-ISB-WB. Ezek közül a hadszínterekhez legközelebb a minimális infrastruktúrával rendelkező FOL és FOB található, melyek támogatására szolgálnak a MOB, ISB és WB szolgál. Az NDAB koncepció szerint kevesebb, de hasonló funkciókkal ellátott repülőbázisok kerültek

[7] AFPAM 10219-V6 2.1

megnevezésre. A „bare airfield” a fentiekben leírtak alapján rekonstrukcióra szoruló területet jelent, ahol rendelkezésre állhat egy leszálló mező és hozzá tartozó munkaterület. A „bare airfield” lehet önálló egység, vagy egy támogató, úgynevezett „supporting base” részét is képezheti. A harmadik az úgynevezett „well found base”, ami egy utólagos rekonstrukciót, személyzet és eszközöket nem igénylő, NATO műveletek végrehajtására teljes egészében alkalmas repülőbázist jelent, és tartalmazza a folyamatos üzemeltetéshez és esetleges áttelepüléshez szükséges összes képességmodult. Az említett elemek, az NDAB képesség egyes szintjeit is jelenthetik, a kitelepülés kezdeti fázisától a teljesen kiépített repülőbázis eléréséig, de ugyanúgy lehetnek egymástól független telepíthető repülőbázisok, melyek a műveletek időtartamának, támogatásának függvényében kerültek kialakításra.

A műveleti területre történő megérkezéstől a repülőbázis teljes mértékű üzemeléséig rendelkezésre álló időtartamot az expedíciós repülőterek esetében a vonatkozó dokumentum[8] 29 napban határozza meg (4. ábra).



4. ábra Expedíciós repülőtér megnyitásának szakaszai [2]

Az első szakaszban (open the airbase) a kezdeti üzemeléshez szükséges minimális leszállómezőt és kommunikációs berendezéseket helyezik üzembe, emellett a bázis működtetéséhez elengedhetetlen logisztikai támogatás, bázisvédelem és vezetési pont kerül felállításra, ami a megérkezés utáni 36 óra alatt befejeződik. A második szakasz a C2 (Command & Control) modul rendszerbe állítását, a vezetési pont, parancsnoki lánc kiépítését, a védett és nyílt kommunikációs vonalak üzembe helyezését jelenti és az érkezést követő második 16 órában történik. A harmadik szakasz (establish the airbase) időszakában a rendelkezésre álló képességek fejlesztése történik meg, megépítik vagy szükség esetén módosítják a rendelkezésre álló infrastruktúrát, ezzel felkészítve a repülőbázist az első műveletek megkezdésére. A repülőbázis működőképessége ebben a szakaszban biztosítja a 24 órás éjjel -nappali üzemelést. A negyedik szakasz (generate mission) annak az ambíciószintnek az elérését jelenti, amikor minden képesség rendelkezésre áll a műveletek megkezdésére, mind a harcoló, mind a támogató erők részéről. Végezetül a teljes üzemelést, rendelkezésre állást jelentő (operate the airbase) modul elérése a 30-ik napon történik, amikor nemcsak a repülőbázis műveletek sikeres végrehajtásáért felelős modulok működnek, de a bázisélet kényelmi funkciói is megvalósulnak. Az NDAB esetében, amíg a bázis telepítésért és működtetésért felelős 19 modul kialakításra nem kerül egy hosszú tervezési és gyakorlási folyamat veszi kezdetét. Ennek célja, hogy az ambíciószint elérése, ami képessé teszi a résztvevő nemzetekből álló modulokat a 30 napos készenléti állapot elérésére. A megelőző tervezési szakasz első része az erők és eszközök kijelölése, és a modulok létrehozása a vezető és támogató nemzetek szakszemélyzeteivel és eszközeivel való feltöltése. A következő

[8] AFPAM 10-219 V6 2.3

szakaszban a tervezés következik, ami a NATO krízis kezelés tervezési eljárásainak[9] alkalmazásával, annak érdekében, hogy a kialakult potenciális krízis helyzetre a fenyegetettség mértékétől függő, megfelelő katonai válasz műveltet kidolgozzák. Ebben a szakaszban kerül definiálásra az NDAB képesség szükségessége és feltételei. Amennyiben az NDAB alkalmazására igény van, megkezdődik a szóba jöhető terület kijelölése és helyszíni felmérése. A következő szakaszban, tervezési fázisból a kitelepülési fázisba történő átmenet valósul meg, vagyis a 30 napos készenlét elérése, a feladat megkezdése és a repülőbázis kialakítása, fogadóképessé tétele. Ez a szakasz így magába foglalja az expedíciós repülőtérnél már látott 30 napos folyamatot, ami a megérkezés utáni üzembe helyezést demonstrálta. Az NDAB esetében, mivel a modulok még nem kerültek kijelölésre és felállításra valamint azok begyakoroltatása sem történtek meg, ezért egyenlőre nem lehetséges, az ezekhez tartozó időintervallumokat hozzárendelése. A műveleti területen az NDAB képességet 1 éven túl is fenn kell tartani, mielőtt visszatérnek a hazai bázisra. Az NDAB keretin belül létesített mobil légibázisok osztályozása, nem az expedíciós repülőterekhez hasonló méret és infrastruktúra alapján történik hanem, hogy milyen szolgáltatást kell fenntartani a bázist igénybe vevő légijárművek számára. Ennek alapján három repülőtér koncepció és képesség került meghatározásra. Az első, olyan repülőteret vagy leszállóhelyet jelent, amit csak nappal, VFR (Visual Flight Rules) szerint és csak katonai forgalom vehet igénybe, az üzemeléshez szükséges navigációs és kommunikációs rendszerek segítségével, korlátozott repülőtéri és készenléti szolgálat áll rendelkezésre. Mindez AFIS (Aerodorme Flight Information Service) szolgáltatást feltételez a repülőtéri forgalom számára. A második szintű repülőtér, még mindig csak katonai forgalom számára igénybe vehető, VFR forgalom nappal és éjszaka is üzemelhet, de IFR (Instrument Flight Rules) repülést csak eljárás alapján biztosított, ami azt jelenti, hogy radar nem áll rendelkezésre a légiforgalmi szolgáltatás biztosításához. A repülőtéren már rendelkezésre állnak a biztosító és készenléti szolgálatok is. A harmadik szint a teljeskörű szolgáltatást biztosító NDAB, amit polgári és katonai forgalom egyaránt igénybe vehet, IFR és VFR forgalmat nappal és éjszaka egyaránt fogad a repülőtér, és rendelkezésre áll radar a légiforgalmi szolgálat biztosításához. A repülőtér biztosító és készenléti szolgálatai egyaránt rendelkezésre állnak.

Amit látható a két repülőtér koncepció filozófiájában hasonló, összehasonlításuk néhány területen egyenlőre nem lehetséges, mivel az NDAB jelenleg még a megvalósítás kezdeti szakaszában van. Azonban mivel a filozófiájuk hasonló, de a szabályzóik különbözőek, ezért már most rendelkezésre állnak olyan dokumentumok, melyek az összehasonlítás alapját képezhetik.

Mivel a telepíthető repülőtér sikerének egyik záloga a repülőgépek számára rendelkezésre álló futópálya kialakításában és felületében rejlik, ezért kiindulópontként a következő fejezetben a futópálya állapotával, annak vizsgálatával a burkolt és nem burkolt felületek teherbíró képességének meghatározásával és a futópálya állapotának karbantartásával foglalkozó nemzetközi szabályzókat és eljárásokat vizsgálom.

[9] SRD-4739 TRAINING PACKAGE ON NATO RISK MANAGEMENT GUIDE FOR ACQUISITION PROGRAMMES

TELEPÍTHETŐ REPÜLŐTEREK FUTÓPÁLYA BURKOLATA

A hadműveleti területen (TO Airfield-Theatre of Operation) vagy annak közelében, repülőtérként vagy leszállóhelyként kijelölésre kerülő terület, attól függően, hogy milyen légijárműtípusok, milyen átlagos műveletszámban, és milyen hosszú időtartamra tervezik igénybe venni, előzetesen a helyszín, a talajszilárdság illetve talajvastagság vizsgálatát el kell végezni. A későbbiekben futópályaként, gurulóútként szolgáló felületek megfelelő talajelőkészítési és alapozási eljárásai lehetővé teszik, a repülőtér hatékonyságának növelését, bármilyen éghajlati és évszak változásával járó körülmények között. A repülőteret, szerkezeti kialakítása, igénybevételi sajátosságai és elhelyezkedése alapján, három kategóriára lehet felosztani [5]. Az első két kategóriába tartozó, repülőterek közvetlenül a hadműveleti területen helyezkednek el, az úgynevezett „célnak megfelelő" felszínnel rendelkező (expedient surface) illetve „köves adalékkal fedett" (aggregated surface) felszínű, nem burkolt felületű futópályák jellemzik. A harmadik csoportba, azok a repülőterek tartoznak, melyek a hadműveleti területhez közel, de nem a műveletek közvetlen közelében találhatók, ezeket, mivel várhatóan hosszabb időtartamú üzemelésre tervezik, így munkaterületeiket rugalmas felszínű burkolt felületekkel látják el. A repülőtérként funkcionáló területekről, előzetes információkat kell beszerezni, melyek üzemviteli fontossággal bírnak a repülőtér kialakításához és fenntartásához elengedhetetlen munkálatok megtervezése miatt. Ezek az alapvető információk kiterjednek egyrészt a terület jelenlegi állapotára, ami a következőket tartalmazza: a felületet borító növényzet és egyéb vegetáció; a felszín természetes lejtése, a talaj sűrűsége, összetétele; a talaj nedvességtartalma, a rendelkezésre álló vízelvezetési lehetőségek, és a talaj teherbíró képessége, melyet a kanadai burkolatosztályozási eljárásokból ismert CBR [6][15][16] (California Bearing Ratio)-n fejeznek ki. Mindazon információk, melyek a felszínt borító talajréteg eloszlására, lejtési szögére, nedvességtartalmára és természetes teherbírására vonatkoznak, kiindulópontként szolgálnak ahhoz, hogy a repülőtér kialakítása, milyen várható munkálatokat követel. A felszín állapotából és a talaj típusából lehet következtetni a várható problémák megjelenésére, amit okozhat például por vagy errózió. A talaj nedvességtartalmának meghatározása azért fontos, mert abból lehet előjelezni, hogy a le és felszálló légijárművek tömegének elviseléséhez megfelelő teherbírással rendelkezik e az adott felület, vagy növelni kell a talaj víztartalmát az építési munkálatok elvégzése során. A talajszilárdságra vonatkozó adatok pedig a talajfelszín vastagságának követelményeihez adnak támpontot.

A következőken röviden összefoglalom, hogy a talaj nyírószilárdságának és teherbírásának kifejezésére, valamint a légijárművek tömegének és felületre gyakorolt hatásának mérésre és kifejezésére, milyen módszereket lehet fellelni a nemzetközi szabványokban, és ezek közül, melyek a legalkalmasabbak a nem burkolt felülettel ellátott futópályák értékelésére.

Futópálya burkolatok osztályozási elvei

Mielőtt a nem burkolt (unpaved surface) felületű futópályák jellemzőit és értékelési eljárásait részletezem, először azokat az alapfogalmakat és az egyes értkelési módszerek rövid tartalmát célszerű bemutatni. Az úgynevezett ACN (Aircraft Classification Number) PCN (Pavement Classification Number) módszer [6] azoknak a felületeknek az értékelésére szolgál, melyek 5700 kg tömegű vagy annál nehezebb légijárművek terhelésének vannak kitéve. Az ACN értéke, a légijármű relatív terhelését jelenti az adott burkolatra számban kifejezve, az altalaj keménységének

függvényében. A PCN, az érték számban kifejezve, ami a burkolat teherbírását fejezi ki, korlátozás nélküli üzemelés esetén. A korlátozás nélküli üzemelés, azt jelenti, hogy nincs arra vonatkozó korlát megállapítva, hogy az adott felületet le és felszállások végrehajtására, az adott ACN számmal bíró légijármű, hány alkalommal veheti igénybe. Fontos megjegyezni, hogy az ACN PCN érték a repülőtér AIP (Aeronautical Information Publication) kiadványában szerepel és a burkolt felületek teherbírásának jelzésére szolgál, de értékelési módszerként nem alkalmazzák. A repülőtér, illetve az illetékes hatóság dönti el, hogy a felület teherbírásának mérésére technikai eszközt vesz igénybe, vagy annak hiányában, a légijárművek tapasztalatai alapján eljárásos módszert alkalmaz. A módszer használatának megkönnyítése érdekében a légijármű-gyártók légijárműveik jellemzőit részletező dokumentumban az ACN-eket két különböző tömeg alapján számítják ki. Az legnagyobb előtéren (állóhelyen) alkalmazott tömeg és reprezentatív üres üzemeltetési tömeg, merev (rigid) és rugalmas (flexible) burkolaton, valamint négy standard alaptalajra gyakorolt szilárdsági kategóriában. Az ACN PCN összefüggésében, a következő tényezők játszanak szerepet. A burkolat típusa, az altalaj kategóriája, a maximális engedélyezett keréknyomás és a burkolat értékelési módszer. Az ACN érték meghatározásakor a légijármű tömege, a futóművek száma és elhelyezkedése, valamint a futómű keréknyomás tényezőit veszik figyelemben, azok hatásait vizsgálják a burkolat típusa és az altalaj kategóriája alapján, mind a szilárd, mind pedig a rugalmas burkolattal ellátott futópályák esetén. Az ACN szám megállapítása szilárd burkolatú felületeken „k" értékben, míg a rugalmas burkolatú felületeken CBR értékben adják meg. Az altalaj keménysége kategóriákban kifejezve, lehet:

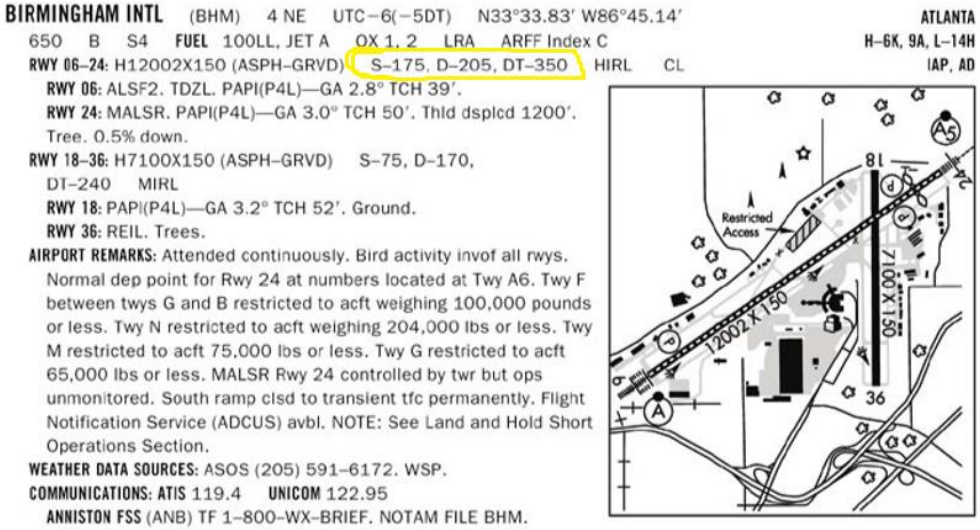
- **magas teherbíró-képesség** – A kód – 150 MN/m^3 K érték jellemzi és a merev burkolat esetében az összes K érték ténylegesen mindig magasabb mint 120 MN/m^3. A rugalmas burkolat esetében a CBR érték = 15 és az összes CBR érték ténylegesen mindig magasabb mint 13;
- **közepes teherbíró-képesség** – B kód – 80 MN/m^3 K érték jellemzi, ami a merev burkolat esetében 60–120 MN/m^3 K értéket jelent. A rugalmas burkolat esetén a CBR érték = 10, ami ténylegesen 8–13 közötti értéket jelent;
- **alacsony teherbíró-képesség** – C kód – 40 MN/m^3 K érték jellemzi, ami a merev burkolat esetében 25–60 MN/m^3 K értéket jelent. A rugalmas burkolat esetén a CBR érték = 6, ami ténylegesen 4–8 közötti értéket jelent;
- **nagyon alacsony teherbíró-képesség** –D kód – 20 MN/m^3 K érték jellemzi, ami a merev burkolat esetében mindig 25 MN/m^3 alatti K értéket jelent. A rugalmas burkolat esetén a CBR érték = 3, ami ténylegesen mindig 4 alatti értéket jelent [1].

Mivel a gumiabroncsnyomás hatása a terheléshez és a kerekek térközéhez képest másodlagos, ezért négy csoportot hoztak létre, a légijármű abroncs nyomás osztályozására: magas, közepes, alacsony és nagyon alacsony, és a következő számértékeket rendelik hozzá:

- **magas** – W kód – nincs nyomás korlátozás;
- **közepes** – X kód – nyomás korlátozás 1,50 MPa értékre;
- **alacsony** – Y kód – nyomás korlátozás 1,00 MPa értékre;
- **nagyon alacsony** – Z kód – nyomás korlátozás 0,50 MPa értékre.

Az egy kerékre eső terhelés matematikai számítási módszer alkalmazásakor vizsgálják az ACN PCN összefüggését, de nem a burkolat vastagságának függvényében. Az ACN érték meghatározásakor, a kerék vastagsága, egy szabvány 1,25 MPa referencia nyomás érték figyelembe vételével. A légi jármű ACN numerikusan kifejezéséhez, az egykerekre eső terhelés kétszeresét veszik alapul, ahol a szabvány 1,25 MPa nyomású kerékre eső terhelés kilogrammban határozzák meg [6].

A nemzetközi gyakorlatban három nemzet burkolat értékelési és kialakítási módszere ismert, a kanadai, az Egyesült Királyság, illetve Egyesült Államok nevével fémjelzett módszerek. A kanadai módszer az éghajlati sajátosságok miatt, olyan környezetre szakosodott, ahol a repülőtéri burkolt felületek szezonális fagykárnak vannak kitéve. Az Egyesült Királyság gyakorlata, az adott légi jármű korlátlan üzemeltetési igényeire lett tervezve, figyelembe véve, az egymással szomszédos futómű-abroncsok kölcsönhatásából eredő terhelést. A burkolat szilárdsági osztályozása, a légijármű burkolatra gyakorolt hatásának osztályozásával reprezentálják, ami nem más, mint az ACN szám, ami egyben kifejezi a légijármű terhelhetőségi határait is. Minden más az Egyesült Királyság szabványai alapján rangsorolt légijármű alacsonyabb terhelés mellett kap felhatalmazást a burkolatok korlátozás nélküli igénybevételére, de a végső döntést az illetékes repülőtéri igazgatóság hozza meg.



5. ábra Egykerekes, duplakerekes és duplakerekes tandem futómű elrendezésű légijárművek ajánlott futóműnyomás jelzése a repülőtéri térképen[10]

Ma már számos számítógépes program áll rendelkezésre, melyek a többrétegű rugalmassági elmélet, vagy a síksági elmélet alapján dolgoznak, és felhasználásukkal könnyen, táblázatos formában is elérhetővé válnak a burkolat szilárdsági mutatói az Építési Referencia Osztályozási (RCC-Reference Construction Classification) rendszeren belül kifejlesztett úgynevezett LCN (Load Classification Number) vagyis légijármű tömege alapján meghatározott osztályozási számot jelenti. Az Egyesült Államok Légügyi Hivatalának (FAA- Federal Aviation Administration) burkolat tervezésére és értékelésére alkalmazott módszere a repülőgép bruttó tömegével van összefüggésben és a tömeg leszálló futóművenként számolt terhelésével. Ez a megközelítés lehetővé teszi a burkolat értékelését a különböző légijármű típusok, azok tömege és tervezési sajátosságaik

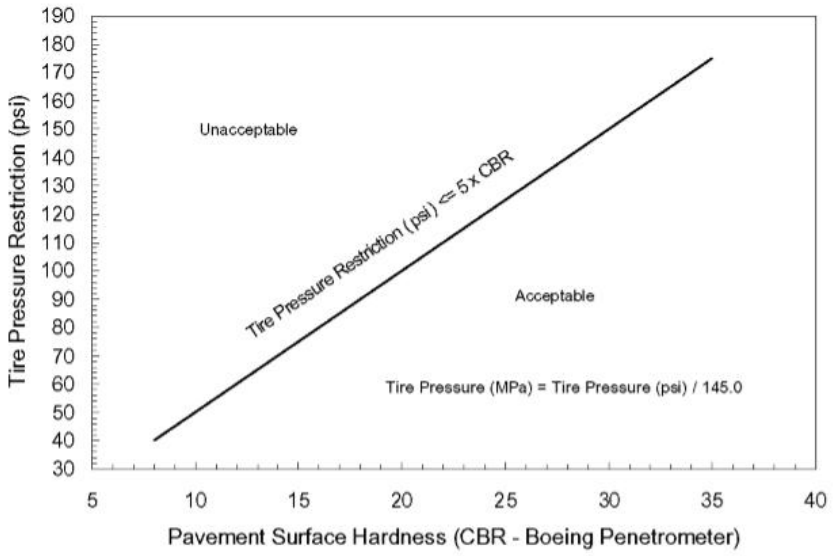
[10] FAA-H-8083-25A.pdf

függvényében. Összehasonlítja a burkolat szilárdságát (a repülőgép bruttó tömegének az egy keres, dupla kerekes illetve dupla tandem elrendezésű kerekekre eső terhelés szerint) az aktuális repülőgéptípus bruttó tömegével, ami alapján meghatározza a burkolat teherbíró képességét (5. ábra). Ez az értékelési módszer, az ICAO szabványtól eltérően, a futóművek elhelyezkedését is faktorként értékeli a teherbírási érték megállapításánál.

Nem burkolt felületű futópályák jellemzői

A telepíthető-, expedíciós- vagy TO repülőterek, mivel gyakran teljesen elhagyatott vagy lerombolt környezetben kerülnek kialakításra, ezért a futópálya és a munkaterület is nem burkolt (aszfalt, beton) felülettel rendelkezik. A talaj vizsgálati módszereit, és értékelési eljárásait ezért elsősorban azoknak az államoknak az forrásaiban lehet kutatni, melyek ma is üzemeltetnek polgári, illetve katonai használatra létesített nem burkolt felületű futópályával rendelkező repülőteret.

Elsőként a kanadai légügyi hivatal ajánlásait lehet alapul venni, ahol a nem burkolt felületű futópályák állapotának figyelését és az eredmények jelentését beépítették a légiforgalmi tájékoztatási rendszerükbe. A kanadai módszer [7] az ACN érték helyett az ALR (Aircraft Loading Ratio)-t, a PCN helyett pedig a PLR (Pavement Loading Ratio)-t használ. Definíciójukban az ICAO szabványban leírtakkal megegyeznek a rövidítések, azonban a nem burkolt felületű futópályák mérőszáma CBR adattal kerül megadásra. A nem burkolt felületek teherbíró képességének meghatározására a CBR 100 referenciaértéket rögzíti, ami a zúzott mészkő teher bíróképességét fejezi ki, és ehhez képest határozza meg az adott felület teherbírását. A mérés elsősorban technikai módszerrel történik, leginkább alkalmazott a Boeing penetrometer, magas nyomású talajteherbírást vizsgáló berendezéssel. A mérési eljárásának megfelelően, a henger alakú mérőfelületet átlagosan 30 másodpercig állandó nyomás alatt tartva, 100mm (4inch) mélységig tolják be a mérési felületbe, és a mért értéket CBR értékre számítják át, ami a légijármű üzemelési tömege, illetve a felületre gyakorolt hatásának megállapításához szükséges (6. ábra).



6. ábra CBR érték és keréknyomás összefüggése

Mivel a mérési eredményeket befolyásolhatja az egyenetlen talajminőség, a nagyobb kövek jelenléte a talajban, ezért átlagosan 30–60 mérést végeznek el, de 20 mérés minimálisan szükséges,

majd eredményüket átlagolják. Kezdetben, a méréseket célszerű évente, majd a későbbiekben három éves periódusokban ismételni. A kanadai terminológiában nem burkolt felületnek számít a murvával, gyeppel, agyaggal, illetve szilárd textúrájú földkeverékkel ellátott futópályák, vagy teljesen előkészítetlen felületek. Mindemellett a nem burkolt futópályák csoportjába sorolja azokat is, melyek csak egy vékony aszfalt réteggel lettek ellátva, aminek a funkciója leginkább az esetleges talajmozgások megkötése. A nem burkolt felületek is jól karbantarthatók, ha az időjárási és évszaknak megfelelő karbantartást elvégzik rajtuk, és a légijármű üzemeléshez előírt normákat betartják. A murvával fedett futópálya előnyös megoldás lehet a fagyveszéllyel járó területeken, mivel textúrája könnyen átmozgatható, ezzel megelőzhetők az összefagyott rétegek kialakulása. A fagytömeg káros hatásai közé tartozik a felületi érdesség, a nem egyenletes felszívódás és ezzel a talajszilárdság csökkenése is előfordulhat az olvadás során. Egyéb hatások lehetnek a tömörítésvesztés, a korlátozott vízelvezetés miatti a felületromlás. Kedvezőtlen fagyhatást idézhetnek elő a nedvesség áteresztése során kialakult expanziós jégkristályok a talajban. A talaj minőség megőrzésének másik mutatója a talaj nyírószilárdságában rejlik, ami gyakorlatilag a légijárművek felületre gyakorolt hatása befolyásol. Az FAA ajánlás alapján, a megfelelő nyírószilárdsággal rendelkező elegyengetett murvás felület CBR 60–80 értékkel bír, míg a jóval puhább szerkezetű jól elegyengetett homok felület 20–40 CBR értéket képvisel [9].

A nem burkolt felületű futópályákról történő üzemeltetés, a légijármű teljesítményromlásához vezethet. Szintén romolhatnak a repülőgép kiszolgálásának tulajdonságai, mivel a futóművek állapotát a murvás felszínnel való kölcsönhatás hátrányosan befolyásolja. De a légijármű nem megfelelő üzemeltetése nem csak magában a repülőgépben, de a futópálya állapotában is romlást okozhat. Ezért a nem burkolt felületű futópályákon történő légi- és földi üzemeltetési szabályokat célszerű betartani [8]. Ilyen az optimálisan megválasztott kereknyomás, a fel és leszállási sebesség, gurulási sebesség, a légijármű tömege, valamint a sugárfordító használatának kerülése. A gyártók ezért azokat a típusú légijárműveket, melyek nem burkolt felületű repülőtereken, expedíciós repülőtereken üzemelnek ellátják az ehhez szükséges, speciális abroncsokkal, terhelést tűrő futómű szárakkal, hajtómű beömlőnyílást védő felületekkel [13].

Az Amerikai Egyesült Államok légereje expedíciós- vagy TO repülőtereinek kijelölését és fogadóképessé tételét részletes vizsgálat előzi meg, melynek legfontosabb és elsődleges szempontja, a talaj nyírószilárdságának, vagy nyírófeszültségének a meghatározása. A vizsgálat nem csak a futópálya, hanem a munkaterület minden részét is érinti. Erre, a katonai alkalmazás számára empirikus mérési eljárást, a CBR érték meghatározását alkalmazzák. A CBR teszt laboratóriumi körülmények közötti megerősítése, az úgynevezett ASTM (American Society for Testing and Materials) eljárás lefolytatására is sor kerülhet, ami az adott földminta összenyomásával kapott eredményt jelenti [9]. Ez az eljárás négy napot vesz igénybe és a műveleti területen nem biztos, hogy elvégezhető, ezért itt, leginkább a helyi mérési eredmények érték a mérvadók. Az CBR érték helyi mérésére, nem a kanadai gyakorlatban már megismert hengeres Boening penométert, hanem csúcsos kialakítású mérőeszközt használnak a referencia értékek meghatározása, mely a DCP (Dynamic Cone Penometer) valamelyikével történik.

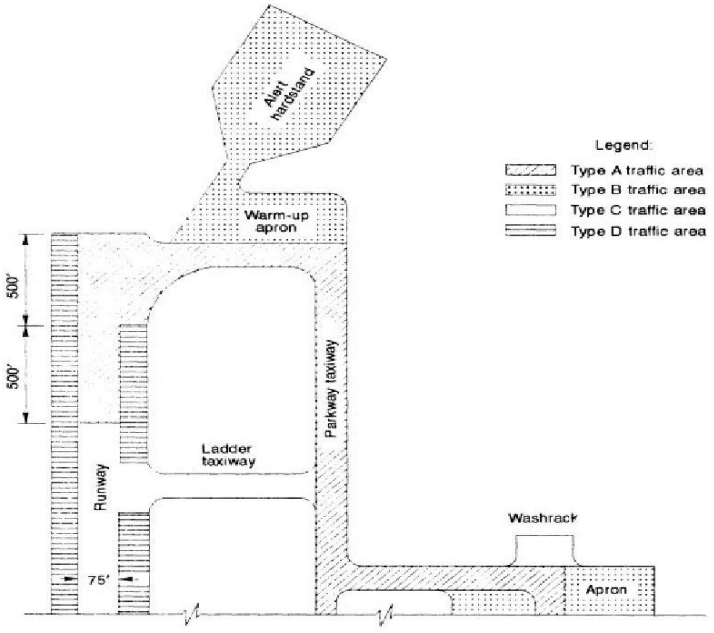
A talaj nyírószilárdsága és a repülőtér kialakításának összefüggéseinek szempontjai a következők: hol található a repülőtér, milyen bruttó tömegű légijárművek veszik igénybe, milyen szilárdságú az altalaj és milyen építési munkálatokat szükségesek, milyen szélsőséges tényezők

befolyásolják a talajszilárdságot (fagyhajlam vagy homok), milyen forgalmi területeket kell kialakítani, várhatóan milyen műveletszámú forgalomra tervezik. A repülőtér elhelyezkedése, abból szempontból befolyásolja annak elrendezését, hogy közvetlenül a harcterületen, a támogató műveleti területen, vagy a mögöttes területen található. A repülőgépek kialakítása és a hozzájuk tartozó bruttó tömege összefüggésben van, azzal, hogy a fenti repülőterek melyikét használhatják az adott repülőgépek (7.ábra).

Repülőtér elhelyezkedése	Repülőgép szerkezet (szilárdsági szerkezet)		Bruttó tömeg (kips)	
Harctérközeli	C-130 E	C-17A	130	430
Támogató bázisreptér	C-130 E	C-17A	130	430
Hátországban települő repülőtér	C-141A		345	
A C-17 szerkezeti kialakításának megfelelő repülőtér, másik két típusnak is megfelel.				

7. ábra Légijármű típusok repülőtér igénybe vétel szempontjából [5]

A légijárművek műveletszáma, a le-és felszállások számát jelenti, ami talaj keménysége és a légijármű bruttó tömegével és kialakításával összefüggésben, engedélyezett maximális műveletszámban meghatározható. A forgalmi területek, és azok teherbírása, különböző attól függőn, hogy milyen légijármű műveletre használatosak. Az amerikai terminológiában a katonai repülőtereken A, B, C, C jelű forgalmi területeket különböztetnek meg, a burkolat teherbírása alapján (8. ábra).

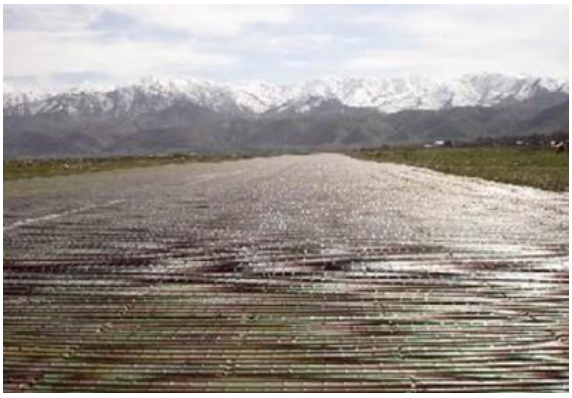


8. ábra Forgalmi területek burkolat osztályozása

Az „A" jelű forgalmi területek, melyek a tervezett légijármű forgalom teljes a típus függvényében engedélyezett súllyal igénybe vehet. Elbírják a légijárművek különböző futómű elrendezéséből adódó terhelést. Mivel az „A" jelű forgalmi területek vannak kitéve a legnagyobb igénybevételnek, ezért fokozott teherbírás jellemző rájuk. A harcterületek közvetlen közelében és azok támogató erőinek bázisául szolgáló repülőterek esetén, melyek felülete a fel- és leszállások végrehajtására megfelelő (experiment surfaced), teljes terjedelmükben „A" jelű forgalmi területekkel rendelkeznek, azokon a területeken is, melyek vagy a futópályán vagy annak közvetlen közelében a

légijárművek visszafordulását szolgálják. A köves adalékkal fedett (aggregated surfaced), elsősorban támogató repülőtérként funkcionáló helyeken „A" jelű forgalmi területtel a futópálya két végétől számított 1000' hosszúságú terület, az elsődleges gurulóutak és állóhelyek, valamint a hajtóművező helyek rendelkeznek. A „B" jelű forgalmi területek ahol a forgalom egyenletesebben oszlik el, a burkolat teljes szélességében, és a légijármű műveletek során a légi jármű teljes tervezési tömegét elviselik. Az ilyen felületek forgalmának jobb eloszlása van, a fokozott terhelés egy adott területen belül kisebb, mint az „A" jelű forgalmi területeken; Ezért a burkolat vastagság csökkentése megengedett. Bizonyos előterek és hangárok esetében alkalmazható, közepes vagy alacsony műveletszámú repülőterek esetén. A"C" jelű forgalmi területek, ahol a forgalom alacsony intenzitású vagy a légijárművek nem a teljes tervezett súllyal, terheléssel üzemelnek. Ilyen lehet a futópálya közbenső szakasza, ahol már a gyorsítás utáni kezdeti emelkedés megkezdődik vagy a futópályát az elsődleges gurulóúttal összekötő rövid szakaszok. A „D" jelű forgalmi területek, ahol extrém alacsony a forgalmi terhelés vagy az igénybe vevő légijárművek tömege elmarad repülőtérre tervezett légijármű terheléstől. De olyan területeket is „D" forgalmi jelű besorolásba kerülnek, melyek biztonsági sávként szolgálnak [5][10][11].

A le-és felszállások végrehajtására megfelelő (experiment surfaced) repülőtereket, melyek vagy a harcterület közvetlen közelében vagy a támogató erők bázisaként szolgálnak, a sivatagos területeken általában kiszáradt tómedrekben, lapos völgyekben, felsíkokon alakítják ki. Viszonylag rövid időtartamú üzemelésre szolgálnak, nem több mint 6 hónap időtartamra és elsősorban C17 és C130 típusok fogadására használják. A C130 közepes szállító repülőgép, ami először érkezik a hadszíntérre, képes leszállni nem burkolt előkészítetlen területeken, csapatmozgások és ellátmány szállítása a feladata. A C 17 a stratégiai mobilitást szolgáló csapat és logisztikai átcsoportosításra használatos, szintén képes zord, elhagyatott területeken leszállni. Mivel az említett repülőtereket, leszállóhelyeket viszonylag rövid idejű felhasználásra tervezték, ezért nem annyira a terület előkészítésére, mint inkább a karbantartására fordítanak figyelmet. Különösen a sivatagos területeken, ahol a laza talajszerkezet és a gyakori szeles időjárás miatt a felület szerkezete átrendeződhet, kiegészítő megoldásokat alkalmaznak. Ilyen a membrán- vagy szőtt felszínű burkolatok kialakítása a repülőtéren. Az említett anyagok, ideiglenes felületet képeznek, céljuk a talaj megkötése és struktúrájának megtartása (9. ábra).



9. ábra membrán felületű futópálya Feyzabad, Afganisztán[11]

[11]http://dlca.logcluster.org/display/public/DLCA/2.2.9+Afghanistan+Fayzabad+Airport;jsessionid=8977FCE732DD9F26683AE8112369365C

Az munkaterületek élettartamát, a repülőgép adott keréknyomáshoz tartozó megengedett tömege, műveletszáma, futómű konfigurációja és az burkolat osztályozásának összefüggése alapján számítható. A műveletszám, ahogy a fentiekben is említésre került a légijármű fel-és leszállása, amit a futópálya első 500’ (125 m)-s hosszára definiálnak. Mivel a talajérintéses tovább menetelt (touch and go) nem ebbe a szakaszban hajtják végre, ezért nem számít bele abba a referencia tartományba, ami az adott repülőtér műveletszámkorlátozására vonatkozik. Az említett szempontok alapján 14 csoportot hoztak létre, melyekbe típus szerint besorolásra kerültek a légijárművek. A csoportindex jelzi a légijármű típus, megengedett legnagyobb és legkisebb **tömegét**. A műveletszám és légijármű **tömegének** összefüggésére 4 kategóriát hoztak létre, mely tartalmazza, hogy a csoportindexe alapján, az adott légijármű hány műveletet hajthat végre (10. ábra) az adott burkolatra [12][13][14].

Repülőgép csoport index														
Csoport	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Repülőgépek	C12	A10	CV580	C130	C20	B717	A320	A300	A330	C17	C5	A340	A380	B52
	C21	AT38	MH53	C27J	C37	C9	A321	A310	B1	IL76		B777	An124	
	C23	F15	MV22	C295		DC9	B727	B2A	B787			DC-10-30	B747	
	C30A	F16	CV22	CN235		T43	B737	B707	DC10-10			DC10-40	B747-0	
	C41A	F22					C22	B720	L1011			KC10	E4	
	HH50	F35					C40	B757	MD10			MD11	VC25	
	RQ4bk20+	F117					MD81		B767-400				B747-430	
	T37	RQ4bk20+					MD82							
	UH1H	T30					MD83							
							MD87							
							MD90							
							P3							

Szint	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I	300000			50000										15000
II	50000			15000										3000
III	15000			3000										500
IV	3000			500										100

Bruttó súlytartomány repülőgép csoportonként (kips)														
Csoport	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Legalacsonyabb bruttó súly	4	8	23	22	38	49	55	110	177	178	374	240	342	230
Legmagasabb bruttó súly	27	84	61	175	91	121	210	376	507	585	840	775	1301	488

10. ábra Légijármű csoportindex és megengedett műveletszám összefüggése [12]

ÖSSZEGZÉS

A hadműveleti területen található repülőterek, legyen az expedíciós, TO vagy későbbiekben NDAB repülőtér, elsősorban a nem burkolt felületű futópályák és munkaterületek kialakítása jellemző. A hazai repülőbázisok futópálya burkolattal szemben támasztott követelményei a katonai [15] és a polgári (ICAO) [1][16] szabványok tekintetében sok hasonlóságot mutatnak, ilyen például az értékelési módszerek, valamint a burkolat és altalaj keménységének összefüggésében. Mindkét esetben az ACN-PCN értékek vannak közzé téve az AIP-ben. A megjelölt PCN értékhez az adott légijárművek legnagyobb tömeg melletti ACN referencia értéket kell hozzárendelni. A repülőterek burkolatot attól függően, hogy szilárd vagy rugalmas burkolatról van szó, a megépítése után általában 15–20 év élettartam után szorul rekonstrukcióra. A hadműveleti területeken munkaterület felszínének értékelés módszerei és eljárásai sokkal nagyobb hangsúlyt kapnak. Sok esetben nem a kialakításuk, inkább a karbantartásuk jelent komoly kihívást, hogy a repülőtér a várható forgalom, annak intenzitása és a repülőtér tervezett élettartama alatt fenntartsák a megfelelő állapotot. A nem burkolt felületek mérési eljárásai helyben történnek, erre alkalmas mérőeszközzel, CBR értékeben kifejezve. A CBR érték és az egy kerékre

eső nyomás szorzószáma 5 PSI (Pound per Square Inch[12]) mértékegységben kifejezve. Ennek ismeretében és az adott légijármű légiüzemeltetési utasításában foglaltak alapján kiszámítható az ajánlott keréknyomás és ennek ismeretében a légijármű maximális terhelése is. Az Egyesült Államok által kiadott műveleti repülőtér burkolat értékelési és építési szabványaiban, a légijárművek csoportok kerültek definiálásra annak függvényében, hogy tömegük, kialakításuk és futómű karakterisztikájuk alapján milyen mértékben vehetik igénybe, az adott repülőtér futópályáját vagy egyéb mozgási területeit. A cikkben összehasonlításra kerültek azok a nemzetközi polgári és katonai dokumentumok, melyek az alapját képezhették, a polgári, katonai és azon belül is a műveleti repülőtér burkolattal szemben támasztott követelmények. A leírtak alapján megállapítható, hogy az NDAB repülőterek esetén a burkolat kialakítás és értékelés módszereinek alapjául az expedíciós repülőtereknél megismert amerikai, valamint a CAA által használt kanadai módszer alkalmazható.

„A mű a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 azonosítószámú, „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés" elnevezésű kiemelt projekt keretében működtetett Concha Győző Doktori Program keretében a Nemzeti Közszolgálati Egyetem felkérésére készült"

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] ICAO Annex 14 Aerodromes; Volume I. 7th Edition, July 2016
[2] AIR FORCE PAMPHLET 10-219, VOLUME 6; CERTIFIED CURRENT, 8 MARCH 2012; PLANNING AND DESIGN OF EXPEDITIONARY AIRBASES (leöltés ideje 2017.04.06.) https://www.wbdg.org/ffc/af-afcec/pamphlets-afp-and-afpam/afpam-10-219-v6
[3] AIR FORCE PAMPHLET 10-219, VOLUME 5; 30 MARCH 2012; BARE BASE CONCEPTUAL PLANNING (letöltés ideje 2017.04.05.) http://wbdg.org/ffc/af-afcec/pamphlets-afp-and-afpam/afpam-10-219-v5
[4] H/OPI/J3/SPOPS/SAO/NDAB/16-314373; NDAB CONOPS; 2016. 01.15.
[5] FM 5-430-002 Chapter 12 Airfield design; http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/5-430-00-2/Ch12.htm
[6] Doc 9157-AN/901 Part 3 AERODROME DESIGN MANUAL PAVEMENTS SECOND EDITION – 1983
[7] AC 300-004 Unpaved Runway Surfaces, Transports Canada 2016-02-05
[8] AC 700-011 Operations on Runways with Unpaved Surfaces Transports Canada 2012-03-16
[9] AIR FORCE INSTRUCTION 32-1041, 10 SEPTEMBER 2013 PAVEMENT EVALUATION PROGRAM-https://www.wbdg.org/FFC/AF/AFI/afi_32_1041.pdf
[10] Engineering Technical Letter (ETL) 02-19: Airfield Pavement Evaluation Standards and Procedures
[11] UFC 3-260-02 30 June 2001 UNIFIED FACILITIES CRITERIA PAVEMENT DESIGN FOR AIRFIELDS
[12] UFC 3-260-03 15 April 2001 UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) AIRFIELD PAVEMENT EVALUATION
[13] Engineering Technical Letter (ETL) 09-2: Contingency Airfield Pavement Specifications
[14] Engineering Technical Letter 97-9: Criteria and Guidance for C-17 Contingency and Training Operations on Semi-Prepared Airfields
[15] Bi-SC Directive 85-5 NATO APPROVED CRITERIA AND STANDARDS FOR AIRFIELDS
[16] Federal Aviation Administration; Quick Reference to Airfield Standards

[12] 1 bar =14,5037738 Pounds per Square Inch

NDAB'S (NATO DEPLOYABLE AIRBASE) PRECULIARITIES CONCIDERING OF INTERNATIONAL CIVIL AND MILITARY STANDARDS

NDAB is a mobile, deployable airport, one of the NATO's Smart Defense Policy initiatives, which aims to share the financial and human resources involved in operating an airport by participating Member States. It will enable them to commonly install and maintain, even in extreme climatic conditions, an airport, to accommodate both military and civilian aircraft, depending on the needs. The question arises of the extent to which the design and operation procedures of such an airport show similarity with international civilian and military regulators, given that they are not applied equally to the participating nations.

Keywords: *NDAB, expeditional airbase, runway, paved and unpaved surfaces, international standrads*

Vas Tímea	Vas Tímea
tanársegéd	Assistant lecturer
Nemzeti Közszolgálati Egyetem	National University of Public Service
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar	Faculty of Military Science and Officer Training
Katonai Repülő Intézet	Institute of Military Aviation
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék	Department of Aerospace controller and Pilot Training
vas.timea@uni-nke.hu	vas.timea@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-0082-0370	orcid.org/0000-0002-0082-0370

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-16-0405_Vas_Timea.pdf

Tuba Zoltán, Bottyán Zsolt

ANALÓG ÉS HIBRID MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA A HORIZONTÁLIS LÁTÁSTÁVOLSÁG ELŐREJELZÉSÉBEN

A látástávolság előrejelzése a repülésmeteorológia egyik legnagyobb kihívása. Egy pontos látástávolság előrejelzés jelentősen csökkentheti vagy elkerülhetővé teheti az időjáráshoz köthető repülési veszélyeket. Ennek elérése érdekében kutatásunkban az egyes tagok lineáris kombinációjával összekapcsoljuk a fuzzy logikán alapuló analóg és a numerikus utófeldolgozott modell kimeneteket egy hibrid előrejelzésben. Ez a hibrid modell a 9 órás előrejelzési időszak során fokozatosan helyezi át a hangsúlyt az analóg előrejelzésről a numerikusra, megpróbálva megőrizni ezek előnyeit. Az eredmények megfelelő értékelhetősége érdekében részletes verifikációs vizsgálatokat végeztünk. A Heidke Skill Score (HSS) átlagos értéke nagyon hasonló eredményeket mutat az analóg és a hibrid előrejelzések esetén még az előrejelzési időszak végén is, ahol pedig az analóg modell aránya mindössze 10–20%. Alacsony látástávolságok esetén (1000–2500 m) a hibrid (0,65) és az analóg előrejelzés (0,64) szintén hasonló átlagos HSS értékeket mutat az előrejelzés első 6 órájában. Ezek jelentősen meghaladják a perzisztencia előrejelzés (0,60) és a TAF (0,56) hasonló periódusra vonatkozó értékeit.

Kulcsszavak: *látástávolság, hibrid, analóg előrejelzés, AHP, verifikáció*

BEVEZETÉS

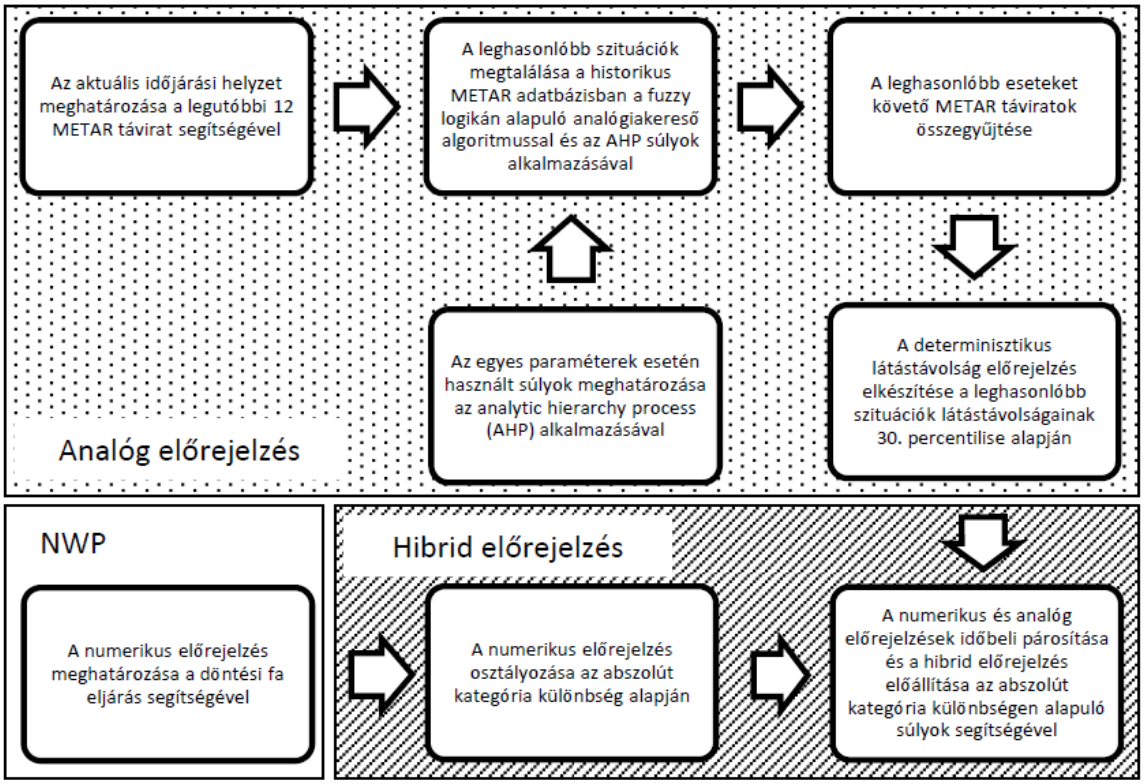
A légiközlekedés területén a meteorológiai vonatkozású határértékek többsége a felhőalap magassághoz és a látástávolsághoz kapcsolódik. Sajnos az említett paraméterek hátterében lévő összetett fizikai folyamatok és a numerikus időjárás előrejelző (NWP) modellek ma is meglévő hiányosságai különösen nehéz feladattá teszik pontos előrejelzésüket [1][2][3]. Ahogyan több korábbi tanulmány is megmutatta, a felhőalap magasság és a látástávolság emiatt lényegesen nagyobb hatással van a repülések várható költségeire [4], hatékonyságára [5] és biztonságára [6][7][8], mint a kevésbé fontos paraméterek. Mindez a speciális katonai feladatok végrehajtása során még hangsúlyosabban jelentkezhet, hiszen ott gyakran nem is maga a repülést korlátozó határértékek átlépése, hanem például a speciális felderítési feladat vizuális akadályozása jelenti a korlátozó tényezőt [9]. Ez ismételten ráirányítja a figyelmet a pontos és megbízható látástávolság előrejelzések fontosságára. Az előrejelzések pontosabbá és megbízhatóbbá tételének számos útja van [10], amelyek közül mi a statisztikai alapú előrejelzések fejlesztését és numerikus produktumokkal való kombinálását választottuk.

Cikkünkben a fuzzy logikán alapuló analóg előrejelző modell fejlesztése [11] adja az alapját annak a hibrid modellnek, amely a pontosabb determinisztikus látástávolság előrejelzések érdekében statisztikai és numerikus outputokat kombinál össze lineárisan [12][10]. A bemutatásra kerülő verifikációs eredmények az analóg és a hibrid előrejelzések fejlesztésének hatékonyságát is igazolják. A különböző előrejelzési módszerek eredményeinek bemutatása pedig az összehasonlító elemzések révén segít meghatározni az egyes eljárások esetleges korlátait, valamint környezetükbe helyezve mutatja meg a fejlesztések értékét. Az előrejelzők hatékonyabban tudnak választani ezek részletes

ismeretében az adott helyzetben rendelkezésre álló prognosztikai eszköztárból.

ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben az alkalmazott módszereket mutatjuk be. Az egyes módszerek leírása azonban csak egy áttekintő kép megértéséhez szükséges részletességű lesz, hiszen korábbi munkáinkban ezek már kellő részletességgel és mélységben bemutatásra kerültek [11][12][10]. A teljes előrejelzési folyamat főbb lépéseit az 1. ábra mutatja be sematikusan.



1. ábra Az előrejelzési folyamat sematikus folyamatábrája (Forrás: [10] alapján)

Az ezen felvázolt 3 szegmens közül az analóg és a hibrid előrejelzéseket fogjuk tárgyalni a már említett részletességgel. A numerikus előrejelzéssel kapcsolatos részletesebb leírások szintén a korábban már idézett hivatkozásokban találhatók.

Felhasznált adatok

Ahogyan az 1. ábrán is látható, az analóg előrejelzések készítéséhez nélkülözhetetlen egy arra alkalmas adatbázis. Ráadásul az analóg produktumokon keresztül részben ez szolgáltatja a hibrid előrejelzések alappillérét is. Az adatbázis alapját a rendszeres repülőtéri észlelő táviratok, azaz a METAR-ok adják [13]. Bár a METAR táviratok nem minden esetben a legpontosabb formában tartalmazzák az egyes meteorológiai változók értékeit (pl.: hőmérséklet, harmatpont), de az adott formátum használata egyrészt megkönnyíti az adatok elérését, másrészt jelentősen leegyszerűsíti a teljes előrejelző rendszer tetszőleges előrejelzési helyre való adaptálását.

Az adatbázisban szereplő egyedi adatok jelentős része meteorológiai szenzorok méréseiből származik (pl.: hőmérséklet, harmatpont, szélirány, szélsebesség), de nem elhanyagolható a vizuális észlelések szerepe sem (pl.: uralkodó látástávolság, szignifikáns időjárás). Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy napjainkban már a látástávolság műszeresen mért értékei is rendelkezésre állnak (MOR – Meteorological Optical Range – Meteorológiai Optikai Mélység, RVR – Runway Visual Range – Futópályamenti Látástávolság), de az ezekből kialakított elérhető hosszúságú hazai adatsorok még nem alkalmasak analóg előrejelzések készítésére.

Analóg előrejelzés

Az analóg előrejelzések alapelve a hasonlóság keresése. Ennek során az aktuális időjárási szituációhoz egy arra alkalmas adatbázisban keresünk hasonló helyzeteket, majd valamilyen módszer segítségével a hasonlóság alapján becslést adunk a vizsgált meteorológiai változó(k) jövőbeli értékére. Az előrejelzési időszak általában 6 és 24 óra között változik [14][15][16], ugyanis az analóg előrejelzések alaptézisük miatt csak homogén feltételek mellett működnek (pl.: nincsenek dinamikus időjárás változások). A fent említett időjárási szituáció alatt nem egyetlen időpont adatait, hanem egy határás időszak összes információját értjük, azaz az összehasonlítás is időbeli adatsorok összehasonlítását jelenti. Maga a paraméterek összehasonlítása a fuzzy logika eszköztárából ismert, szakértői konszenzussal létrehozott ún. tagsági függvények segítségével történik [16]. A tagsági függvények az adott paraméter esetében meghatározzák a hasonlóság mértékét az összevetésre kerülő értékek különbsége vagy aránya alapján. Ezek a 0 és 1 közé eső egyedi hasonlósági értékek kerülnek aztán az adott paraméter fontossága és a mérés/megfigyelés ideje szerint további súlyozásra. A paraméter fontosság szerinti súlyozása azon a feltevésen alapul, hogy az előrejelzés pontossága növelhető azáltal, ha az előrejelzendő paraméter hasonlóságát nagyobb súllyal vesszük figyelembe az összesített hasonlóság megállapításánál. Ezt az Analytic Hierarchy Process (AHP – Hierarchikus elemzési folyamat) [17] alkalmazásával valósítottuk meg, melynek hatékonyságát már korábbi munkánkban is bizonyítottuk [11].

A továbbiakban időlépcső kifejezés alatt az előrejelzési időszak kezdetétől (ami, a legutolsó észlelés ideje) az adott METAR-ig visszafele vett távolságot értjük. Ennek megfelelően az időlépcsők a jelentől $(t-0)$ a legrégebbi feldolgozott információig $t-(k-1)$ tartanak, ahol k az időlépcsők számát jelenti. Ezeket a jelöléseket alkalmazva az $(t-j)$-edik időlépcsőben a hasonlóság összesített mértéke ($S_{TOTAL\,t-j}$) az alábbiak szerint számítható:

$$S_{TOTAL\,t-j} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot S_{ij} \qquad (1)$$

ahol S_{ij} az i-edik paraméter tagsági függvények által meghatározott hasonlósága, w_i pedig az i-edik paraméterhez az AHP módszerrel hozzárendelt súly, míg n az összehasonlító algoritmusban vizsgált paraméterek száma.

Ezután már az időben is összesített, azaz a teljes időjárási szituációra vonatkozó hasonlósági mérték ($S_{overall}$) is meghatározható. A fenti egyenletet figyelembe véve, az időlépcsőkre vonatkoztatott súlyozott átlag általános képlete a következő:

$$S_{overall} = \frac{\sum_{j=0}^{k-1} \left(2^{k-j-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot s_{ij}\right)}{2^k - 1} \quad (2)$$

ahol k az alkalmazott időlépcsők száma (esetünkben $k = 12$). Ahogyan a képletből következik: a legutóbbi észlelés $(t - 0)$ kapja a legnagyobb időbeli súlyt, majd ahogyan az időben távolodunk a jelentől, úgy csökkennek gyorsan az alkalmazott súlyok. Ez garantálja a hasonlóság konvergenciáját a vizsgált hatórás periódusban.

A (2) egyenlet segítségével az adatbázis összes időjárási szituációjához rendelhető egy hasonlósági mérték, ami alapján a leghasonlóbb esetek kiválaszthatók a hasonlósági mérték szerinti sorbarendezés alapján. A kiválasztott eseteket időben közvetlenül követő METAR táviratok adatai alapján pedig az egyes időlépcsőkben a látástávolság értékek 30. percentilis [10] értékével előállítható a determinisztikus látástávolság prognózis is. A 30. percentilis kiválasztását a fenti hivatkozásban bemutatott előzetes verifikációs eredményekre alapoztuk, melyek szerint a vizsgált verifikációs paraméterek percentilis szerinti függvényének itt a választást igazoló szélsőértéke van. Az előrejelzési időszak hossza 9 óra, amit a rövid TAF hosszához igazítottunk.

Hibrid előrejelzés

Egyértelműen kijelenthető, hogy sem analóg, sem pedig numerikus modellekkel nem lehet tökéletes látátávolság előrejelzést készíteni. Mindkettőnek vannak előnyei és hátrányai egyaránt, amelyeket az 1. táblázatban foglaltunk össze.

	Analóg előrejelzés	Numerikus előrejelzés
Futtatás gyakorisága	megegyezik az észlelés gyakoriságával (0,5–1 óra)	6–24 óránként
Területi érvényesség	korlátozott: ahol mérési adatbázis elérhető	a modell előrejelzési területén belül tetszőleges
Teljesítmény az előrejelzési időszakban	gyorsan csökken	egyenletes
A hatékony előrejelzési időszak hossza	néhány óra	néhány nap
Verifikáció	teljes: csak ott alkalmazható, ahol észlelés is elérhető	korlátozott: csak ott, ahol észlelés elérhető

1. táblázat Az analóg és numerikus előrejelzések tipikus tulajdonságai (Forrás: [10] alapján)

Az analóg előrejelzések alapfeltevéséből adódik, hogy a teljesítményük időben gyorsan csökken, így az igazán hatékony előrejelzési időszak hossza mindössze néhány órára tehető. Ezzel szemben a numerikus előrejelzések teljesítménye lényegesen alacsonyabb ugyan, de időben gyakorlatilag nem változik, ahogyan ezt a később bemutatásra kerülő eredmények is alátámasztják. Annak köszönhetően, hogy az előrejelzések csak ott verifikálhatók, ahol az ellenőrzéshez szükséges észlelési adatok is rendelkezésre állnak, így mindkét esetben ugyanazokon a helyeken elérhetők a verifikációs adatok is.

Annak érdekében, hogy a fentiekben említett előnyöket megtartsuk, a hátrányokat pedig csökkentsük, egy hibrid előrejelzést alkottunk meg [18][12]. Ez az előrejelzés az analóg és a numerikus látástávolság outputok lineáris kombinációjaként a következő módon áll elő:

$$Látástávolság_{Hibrid} = a_j \cdot Látástávolság_{Analóg} + b_j \cdot Látástávolság_{Numerikus} \quad (3)$$

ahol $a_j + b_j = 1$; $a_j, b_j \in [0; 1]$ az egyes típusokhoz tartozó súlyok és j az előrejelzés időlépcsőinek a száma. Annak érdekében, hogy a numerikus modell kezdeti pontatlanságait minél nagyobb mértékben korrigálni tudjuk, a *t* + 0000 időpontban mind az észlelt mind pedig a numerikusan előrejelzett látástávolság adatokat kategóriákba (0–1000 m; 1000–1500 m; 1500–3000 m; 3000–5000 m; 5000 m–) soroltuk. Az a_j súlyokat pedig úgy határoztuk meg, hogy a növekvő kategória különbséggel párhuzamosan nőjenek. Az analóg és a numerikus rész közötti fokozatos átmenet biztosítása érdekében az előrejelzési időszakban az a_j súlyok monoton csökkenők. A fenti feltételek figyelembe vételével az a_j és b_j súlyokat operatív repülésmeteorológiai előrejelzők határozták meg. Mivel a kategória különbségek az eltérés irányától függetlenek, ezért a súlyokat tartalmazó mátrix szimmetrikus. Ennek megfelelően az alkalmazott súlyok az abszolút kategória különbség függvényében a 2. táblázatban található egyszerűsített formában is megadhatók. A táblázatban látható kategória különbségen alapuló súlyozásbeli eltérések a numerikus modelleredmények egyfajta szűrését, szelekcióját jelentik. Nagy kategória különbség esetén ugyanis a téves numerikus eredmények csak kis mértékben befolyásolhatják a hibrid előrejelzést.

		***t*+0100**	***t*+0200**	***t*+0300**	***t*+0400**	***t*+0500**	***t*+0600**	***t*+0700**	***t*+0800**	***t*+0900**
Abszolút kategória különbség	4	1,00	1,00	1,00	0,90	0,80	0,65	0,50	0,35	0,20
	3	1,00	1,00	0,90	0,80	0,70	0,55	0,45	0,30	0,20
	2	1,00	0,90	0,85	0,75	0,65	0,50	0,40	0,25	0,15
	1	0,90	0,85	0,80	0,70	0,60	0,45	0,35	0,20	0,10
	0	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10

2. táblázat A hibrid előrejelzés összeállításánál alkalmazott a_j súlyok az abszolút kategória különbségnek és az előrejelzés idejének függvényében (Forrás: [10] alapján)

A hibrid előrejelzés egyik legfőbb előnye, hogy amennyiben az előrejelzés módosításra szorul, akkor a módosítás kiadásához szükséges idő az analóg előrejelzés frissítési gyakoriságára csökken. Ráadásul azok a potenciális dinamikus változások, amelyek az analóg modul esetében nem előrejelezhetők, a numerikus rész növekvő részarányának megfelelően egyre nagyobb valószínűséggel jelennek meg a hibrid előrejelzésben.

VERIFIKÁCIÓ

Ebben a fejezetben bemutatjuk a teljes verifikációs eljárást és az alkalmazott módszer eredményeit. A fejezet első felében a verifikáció idejét és helyét, valamint az alkalmazott módszert, a második felében pedig a kutatás főbb eredményeit tárgyaljuk.

Verifikációs eljárás

Már elöljáróban meg kell jegyeznünk, hogy a különböző látástávolság előrejelzések ugyanazzal a módszertannal kerültek verifikációra az összehasonlíthatóság alapelvének megőrzése érdekében. Ennek keretében az analóg (AHP alkalmazásával és anélkül), a hibrid, a numerikus és a perzisztencia előrejelzés, valamint a TAF táviratok első kilenc órájának látástávolság értékeit ellenőríztük. Az egyes előrejelzések elemi időlépcsőinek legkisebb közös többszöröseként előálló 1 órát határoztuk meg verifikációs időlépcsőként, hogy az összehasonlíthatóság alapelvét itt is meg tudjuk őrizni.

A verifikáció megvalósítása érdekében a rendelkezésre álló adatbázist (2005. 08. 01–2014. 07. 31) két egymástól független részre osztottuk. Ennek megfelelően verifikációs időszakként a 2013. 08. 01–2014. 07. 31. közötti periódust jelöltük ki, összhangban a numerikus modell operatív időszakával. Az analóg és áttételesen a hibrid előrejelzés hasonlósági adatbázisául pedig a 2005. 08. 01–2013. 07. 31. közötti időszak szolgált. A teljes verifikációs eljárást a TAF táviratok kiadási rendjéhez igazítottuk, emiatt Szolnok (LHSN) és Kecskemét (LHKE) esetén három óránként, míg Pápa (LHPA) és Budapest (LHBP) esetén hat óránként kerültek az előrejelzések kiértékelésre. A továbbiakban a vizsgált látástávolság kategóriák egyszerűsítve, a felső kategória határral kerülnek azonosításra, ugyanis az alsó határ minden esetben 0 méter. Ez összhangban van azzal a repülési gyakorlattal, amely az eljárások alkalmazását határértékekhez köti. Ez azt jelenti, hogy ha az adott változó értéke átlép egy bizonyos határértéket, akkor a repülési eljárásokban eltérő szabályok alkalmazására van szükség (pl.: látvarepülési és műszer szerinti repülési szabályok). Ezek a határértékek többek között függhetnek a pilóta kiképzettségétől, a repülőtér felszereltségétől vagy akár az alkalmazott légijárműtől is.

Az alkalmazott verifikációs eljárás során azt vizsgáltuk, hogy az előrejelzett és az észlelt látástávolság adatok az adott vizsgálati kategóriába tartoznak-e vagy sem. Ezt a fajta verifikációs módszertant nevezzük kategorikus előrejelzések verifikációjának, amit a vizsgált értékek egy ún. kontingencia mátrixba (3. táblázat) való besorolása révén valósítunk meg.

		Észlelt esemény	
		IGEN	NEM
Előrejelzett esemény	IGEN	*a* (találat)	*b* (téves riasztás)
	NEM	*c* (mulasztás)	*d* (korrekt elutasítás)

3. táblázat Kategorikus előrejelzése kontingencia mátrixa

Ahogyan Doswell és munkatársai [19] is megmutatták: teljes értékű, mindenre kiterjedő verifikációs eljárás nem létezik. Ezért egy teljesebb összkép érdekében célszerű minél több skill score (*szabad fordításban: beválási mutató*) (pl.: α, BIAS, POD, POFD, FAR, HIT, CSI, TSS, HSS, stb. – ezek részletes leírásáért lásd Nurmi munkáját [20]) alkalmazása. Az említett beválási mutatók számítása a 3. táblázatban bemutatott 2 × 2 kontingencia mátrix segítségével történt. Ugyanakkor a részletes eredmények ismeretében, csak a Heidke skill score (HSS) eredményeire hagyatkozunk a továbbiakban. Egyrészt ennek értékei tükrözik a verifikáció érdemi összeredményét, másrészt a HSS, mint beválási mutató (*v. másképp verifikációs paraméter*) korrekt marad kis relatív gyakoriságú események (pl.: alacsony látástávolság) kiértékelése esetén is [21].

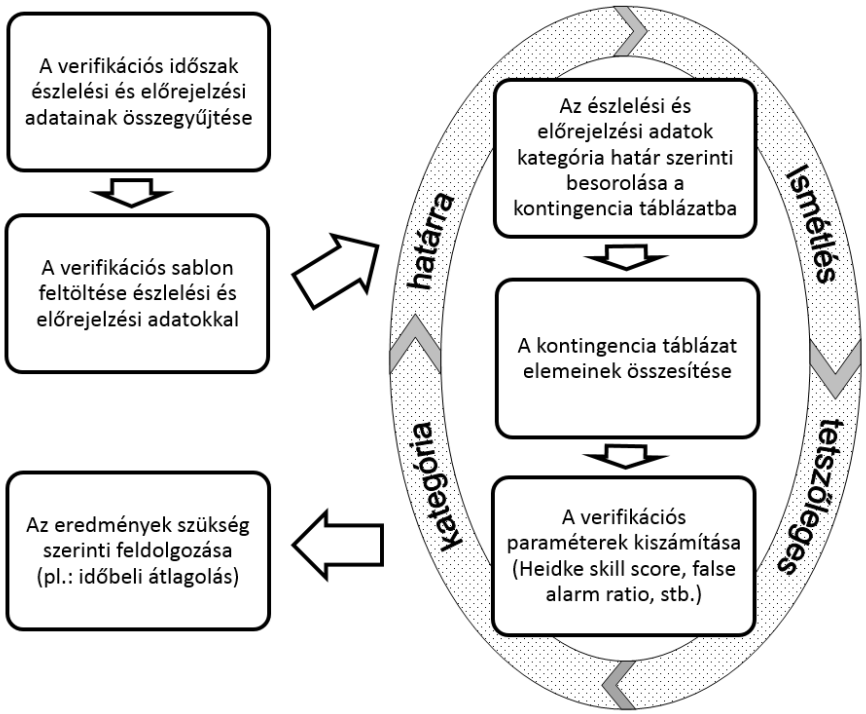
$$HSS = \frac{2\cdot(a\cdot b - b\cdot c)}{(a+c)\cdot(c+d)+(a+b)\cdot(b+d)} \quad (4)$$

A nemzetközi TAF verifikációs gyakorlatban általános eljárás az előrejelzési időszak rövid intervallumokra való felosztása [22][23]. Az észlelések pillanatnyi látástávolság értékei miatt az ilyen eljárások szükségszerűen hibát hordoznak, ha a vizsgált kategória határok eltérnek az ICAO (International Civil Aviation Organization – Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) által javasolt módosítási kritériumoktól [24]. Ráadásul a felszállásoknak vagy a repülési feladatok kezdetének általában pontosan meghatározott időpontja van, amit megelőzően a felhasználók már szeretnék tudni, hogy végrehajthatják-e a tervezett feladatot vagy el kell azt halasztaniuk. A fenti indokok miatt egy új megközelítést alkalmaztunk a TAF verifikációban, ami nem mellékesen az előrejelzések összehasonlíthatóságát is támogatja.

Ebben az eljárásban az adott UTC órát jellemző előrejelzett látástávolság értékhez a megelőző óra 45 perces METAR táviratának az adatait párosítottuk. A numerikus és a hibrid előrejelzések esetében ez azt jelenti, hogy az előrejelzési időtartomány *t* + 0100, *t* + 0200 stb. órai előrejelzéseit a *t* + 0045, *t* + 0145, stb. időpontok METAR táviratai alapján verifikáltuk. Az analóg, a perzisztencia és a TAF előrejelzés vonatkozásában az előrejelzett látástávolság értékek a *t* + 0045, …, *t* + 0845 időpontokban egyértelműen párosíthatók az azonos időpontbeli észlelések adataival, még abban az esetben is, amikor változást jelentő csoport van érvényben az előrejelzésben.

A TAF táviratokban változást jelentő csoportot alkalmaznak, ha tartós ("becoming" – BECMG) vagy időszakos („temporary" – TEMPO) változás várható az egyes időjárási elemek értékében vagy állapotában [24]. Ezeket a csoportokat a táviratokban az adott csoportra vonatkozó érvényességi időszak követi. A BECMG változást jelentő csoport esetében a TAF távirat beválása szempontjából kedvezőbb előrejelzési adatot (alap vagy BECMG) vesszük figyelembe a BECMG változási időszakában. Amennyiben mindkét előrejelzett látástávolság érték sikeres, vagy mindkettő sikertelen, akkor az eredeti látástávolság adat kerül kiértékelésre. A TEMPO változást jelentő csoport esetében, ha a TEMPO időszak hossza nem éri el a 3 órát, akkor a TAF távirat beválása szempontjából legkedvezőbb előrejelzési adatot (alap vagy BECMG vagy TEMPO) vesszük figyelembe. Ha a TEMPO időszak hossza eléri a 3 órát, akkor az adott előrejelzési időszak minden órájához egy 3 órás periódust rendelünk a következőképpen: az első órához a periódus első 3 óráját, az utolsó órához a periódus utolsó 3 óráját, a köztes órákhoz pedig az adott és az azt megelőző és követő órák 3 órás periódusát. Amennyiben egy adott 3 órás periódus mindhárom órája esetében beválik a látástávolság előrejelzés, akkor a TEMPO időszak adott órája (ti. amihez a 3 órás periódus tartozik) esetében az alap-előrejelzést is figyelembe vesszük (ami valószínűleg sikertelen lesz) hiszen a TEMPO helyett BECMG alkalmazása lett volna indokolt [24]. Amennyiben egy adott 3 órás periódus mindhárom órájára sikertelen lesz az előrejelzés, akkor a TEMPO alkalmazása nem lett volna indokolt. Ezért a TEMPO időszak adott órája esetében a vonatkozó időpont látástávolság előrejelzését is figyelembe vesszük (ami valószínűleg sikertelen lesz). A maradék esetekben az alap, BECMG, TEMPO értékei közül a TAF távirat beválása szempontjából legkedvezőbbet veszszük figyelembe. A PROB40 és PROB30 TEMPO változást jelentő csoportok esetében a TEMPO-

hoz hasonló eljárást alkalmazunk, azzal a különbséggel, hogy ezeket az eredményeket a verifikációs összesítésnél 40 és 30%-os súllyal vesszük figyelembe.



2. ábra A verifikáció sematikus folyamatábrája (Forrás: [10] alapján)

Ez az eljárás némiképp felülbecsli a TAF távirat verifikációs teljesítményét a változást jelentő és a valószínűségi csoportok kiértékelési metódusa miatt. Ezért a TAF táviratnál jobb verifikációs eredményt elérő eljárások esetében biztosan állíthatjuk, hogy azok az előrejelzési munkafolyamat során jól alkalmazhatóak lesznek a TAF látástávolság előrejelzéseinek javításában.

A verifikációs eljárás főbb lépéseit a 2. ábra foglalja össze. A folyamat ovális keretbe foglalt része, amely a kategória határok szerinti besorolástól a verifikációs paraméterek számításáig terjed, a vizsgált kategória határok számától függően tetszőlegesen ismételhető. Az eljárás utolsó lépéseként a verifikáció végső eredménye a kiszámított paraméterek tetszőleges feldolgozásával (pl. időbeli vagy kategória szerinti átlagolás) állítható elő.

Eredmények

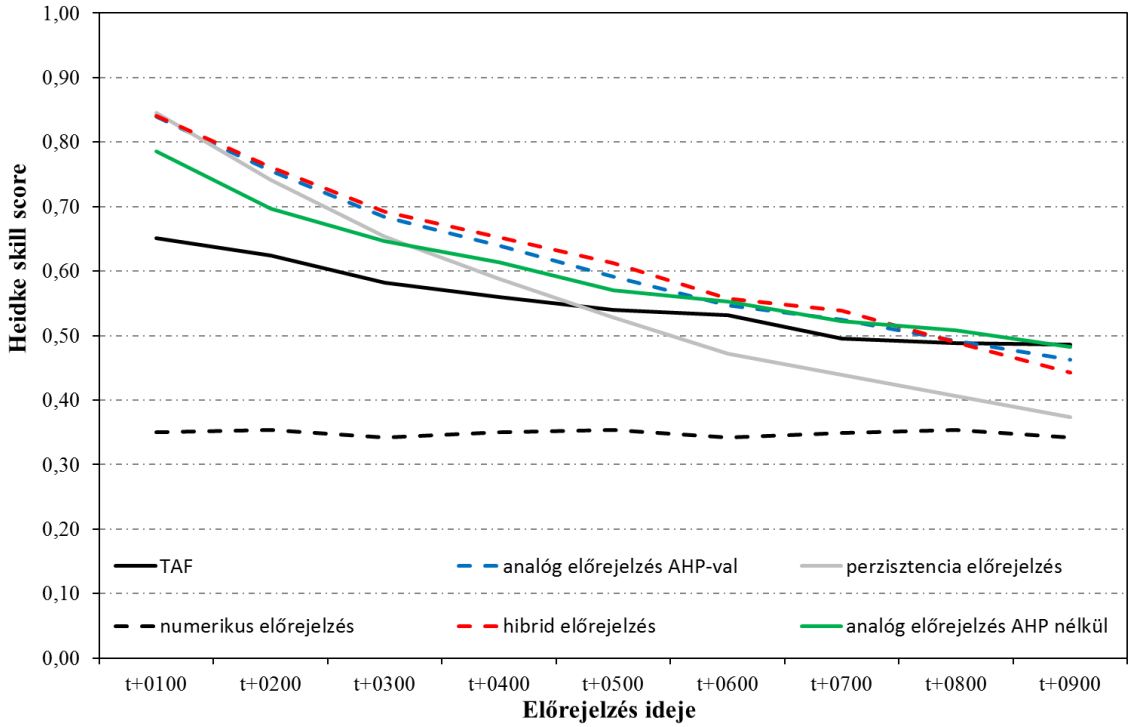
Először is meg kell jegyeznünk, hogy a fejezetben bemutatásra kerülő eredmények esetében az előrejelzés ideje nem az adott előrejelzés időelőnyét jelenti. Az előrejelzés ideje alatt a TAF táviratok érvényességének kezdő időpontjától vett időbeli távolságát értjük. Nyilvánvaló, hogy ezért a TAF táviratok és a numerikus előrejelzések esetében az időelőny különbözik az előrejelzés idejétől. Az analóg és a perzisztencia előrejelzés esetén viszont a kettő között nincs különbség az előrejelzések konstrukciós háttere miatt.

A verifikáció során vizsgált kategóriák felső határát 5000 méteres látástávolságig, 100 méterenként határoztuk meg. Ezután kiszámítottuk a verifikációs paramétereket az összes kategória határra és

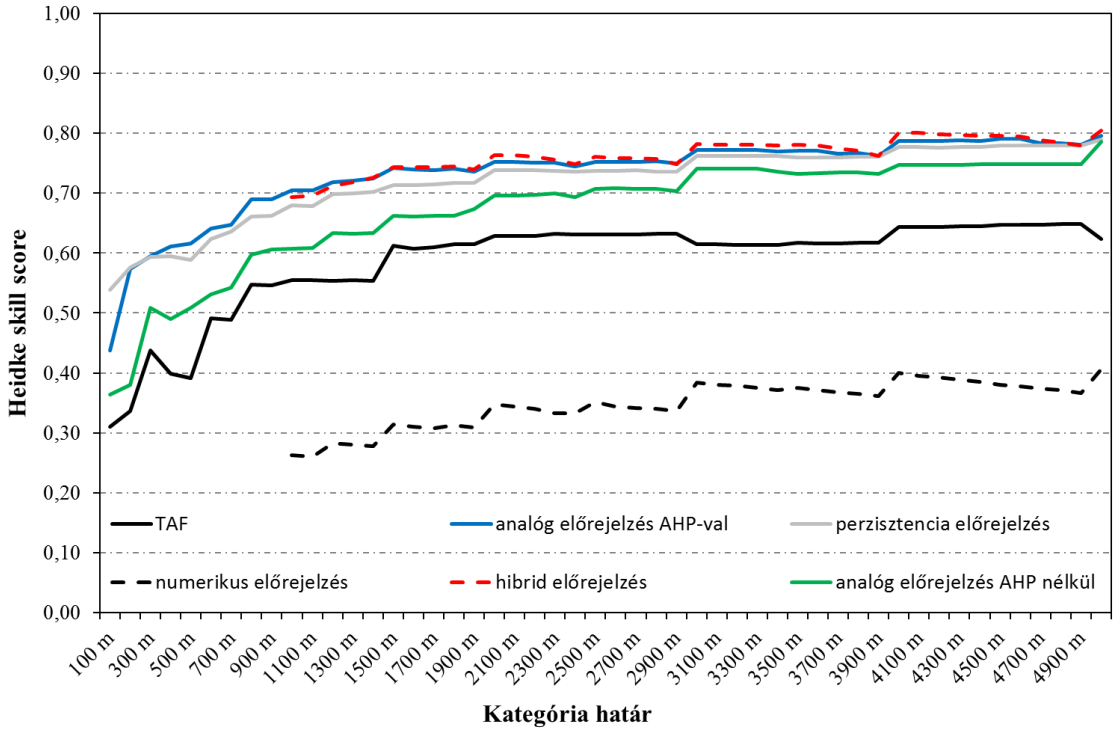
az összes alkalmazott előrejelző eljárásra. A numerikus előrejelzés esetében alkalmazott utófeldolgozó eljárás sajátosságaiból adódóan az előrejelzett látástávolság alsó határa 1000 m. Ennek megfelelően a kategória határok átlagolásánál csak az e fölötti kategóriákat vettük figyelembe, hogy az egyes eljárások eredményei összehasonlíthatóak maradjanak.

Ahogyan a 3. ábrán is látszik az AHP módszerrel meghatározott súlyok alkalmazása szignifikánsan javította az analóg előrejelzéseket az előrejelzési időszak első hat órájában. Ráadásul a legnagyobb növekedés az alacsony látástávolságok esetén következett be, ahol a pontos prognózisnak még kritikusabb szerep jut.

A hibrid és az analóg modell egyébként a teljes előrejelzési periódusban hasonló teljesítményt nyújt annak ellenére, hogy az időszak végén a hibrid előrejelzésben a numerikus rész aránya már 80 – 90%. Mindkét előrejelzés grafikonja egyre meggyőzőbben előzi meg a viszonyítási alapként feltüntetett perzisztencia prognózist. A TAF teljesítménye csak az előrejelzési időszak utolsó órájában előzi meg a hibrid előrejelzést, de itt rá kell mutatnunk, hogy a feltüntetett értékek a korábban is említett kategória határokra vonatkozó átlagot jelentik. Alacsonyabb kategória határok esetén a TAF jóval hamarabb, *t* + 0400 óra körül versenyképessé válik a hibrid előrejelzéssel.



3. ábra A különböző kategória határokra (1000–5000 méterig 100 m-es lépésekkel) és a vizsgált 4 repülőtérre (Szolnok (LHSN) és Kecskemét (LHKE), Pápa (LHPA) és Budapest (LHBP)) vonatkozó átlagos HSS értékek az előrejelzési idő függvényében (Forrás: [10] alapján)



4. ábra Az előrejelzési időszak első 6 órájára vonatkozó átlagos HSS értékek a vizsgált 4 repülőtéren az egyes kategória határok függvényében (Forrás: [10] alapján)

A tisztán numerikus előrejelzés teljesen kiegyenlített teljesítményt mutat, noha az egész előrejelzési periódusban nem éri el a perzisztencia prognózis szintjét. Ahogyan korábban is említettük, a kategorikus előrejelzések verifikációs eljárása során a különböző verifikációs paramétereket a kontingencia mátrix elemeinek segítségével számítottuk ki. Nyilvánvalóan, ha a kategória határ megváltozása nem generál változást a kontingencia mátrix elemeiben, akkor a vizsgált verifikációs paraméterek értéke is azonos marad. Ez könnyen észrevehető a 4. ábrán, ahol az egyes grafikonok vízszintes részeket produkálnak, különösen a magasabb látástávolságok esetén.

Mindez annak a következménye, hogy a látástávolság észlelési és előrejelzési gyakorlat általában az ICAO SPECI és előrejelzés módosítási kritériumokhoz, a repülőtér üzemeltetését befolyásoló határértékekhez és a látástávolság meghatározását szolgáló referenciapontok távolságához igazodik. Emiatt a látástávolság értékek relatív gyakorisága sem az észlelések, sem pedig az előrejelzések esetén nem mutat folytonos eloszlást. Ez a magyarázata a gyakrabban használt, tipikus látástávolság értékek körüli kisebb „ugrásoknak” is. Ez egyben azt is jelenti, hogy azokban az esetekben, amikor a vizsgált változó értékei nem folytonos eloszlást követnek a kategorikus előrejelzések verifikációja során különös körültekintéssel kell eljárni, hogy az ebből adódó fluktuáció kiszűrhető legyen. A 4. ábrán látható eredmények esetén egyedül a 100 méteres kategória határ esetén nem előzi meg az analóg és a hibrid (az értelmezési tartományában) a perzisztencia előrejelzést. Mindkét előrejelzés hasonló, a kategória határ emelkedésével növekvő HSS értékeket produkál. A numerikus modell gyenge eredményei ellenére a hibrid előrejelzés kiváló teljesítményt produkál a kategória eltérésnek megfelelően alkalmazott súlyok miatt. Az előrejelzési periódus első felében a

numerikus rész főleg az olyan előrejelzésekből származik, ahol a kezdeti kategória eltérés alacsony, azaz ahol a numerikus modell jól követi az időjárás alakulását. A TAF HSS értékei legjobban az alacsonyabb kategória határok esetén közelítenek az analóg és a hibrid modellek teljesítményéhez. Az előrejelzési időszak harmadik harmadában (ami már nem látszik a 4. ábrán) a TAF fokozatosan átveszi a vezető szerepet, még a magasabb kategória határok esetén is.

ÖSSZEGZÉS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Munkánkban bemutattuk az analóg és hibrid elven működő determinisztikus látástávolság előrejelző módszereket és azok teljeskörű verifikációs eredményeit. A vázolt hibrid módszer fuzzy logikán alapuló analóg és korlátos tartományú numerikus előrejelzési modell outputok lineáris kombinációjaként áll elő. A részletes verifikációs eredmények alapján a következő következtetések vonhatók le:

1. az AHP súlyok alkalmazása az analóg előrejelzés során szignifikánsan növeli a látástávolság előrejelzés teljesítményét;
2. az előrejelzések első 6 órájában mind az analóg, mind a hibrid látástávolság előrejelzés lényegesen jobb teljesítményt nyújt a TAF-nál, ami megalapozza a repülőtéri alkalmazhatóságukat ezen az időtávon;
3. annak ellenére, hogy a hibrid előrejelzés az idővel egyre nagyobb arányban támaszkodik a numerikus előrejelzésre, az analóg előrejelzéshez hasonló verifikációs eredményeket produkált. Ez annak köszönhető, hogy az alkalmazott NWP outputok a kezdeti időpontban az észleléssel szemben fennálló kategória különbségnek megfelelően szűrésre kerülnek;
4. annak ellenére, hogy az előrejelzések HSS értékei erősen függenek a kategória határ megválasztásától, az analóg és hibrid előrejelzések minden kategória határ esetén jobb teljesítményt mutatnak, mint a többi előrejelzés. Mindez azt jelenti, hogy alkalmazhatóságuk független a kategória határ megválasztásától.

A fenti eredmények ismeretében az analóg produktumok a Magyar Honvédség katonai repülőterein szolgáló repülésmeteorológusok számára is elérhetővé váltak operatív használatra. Az első tapasztalatok azt mutatják, hogy módszer alkalmazása éppen akkor tudja a legnagyobb segítséget nyújtani, amikor a modellek pontatlansága miatt az előrejelzők kezében fogytán vannak a pontos előrejelzések készítésére alkalmas eszközök. Ezek alapján mind általános, mind pedig speciális repülési feladatok során hasznos eszközként szolgálhatnak a repülések meteorológiai támogatásában.

Az ismertetett kutatási eredmények lehetséges kiterjesztése újabb meteorológiai paraméterek bevonásával valósulhat meg. Ezek közül a legígéretesebbnek a felhőalap magasság előrejelzése tűnik, ami a látástávolsághoz hasonló súlyú paraméter a repülésmeteorológiában, ráadásul ennek előrejelzése is a látástávolságéhoz hasonló problémákba ütközik a hagyományos eljárások alkalmazása során. A kutatások egy lehetséges másik folytatási iránya a valószínűségi előrejelzési produktumok létrehozása, ami a leghasonlóbb időjárási szituációk kiválasztása révén talán nem is tűnik olyan távolinak.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] HERZEGH, P. Development of FAA National Ceiling and Visibility products: Challenges, strategies and progress. 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology on 30 January – 02 February 2006, Atlanta, GA, USA, 2006

[2] BLANKERT, R. L. – HADJIMICHAEL, M. Data mining numerical model output for single-station cloud-ceiling forecast algorithms. Weather and Forecasting 22: 1123–1131, 2007

[3] GHIRARDELLI, J. – GLAHN, B. The Meteorological Development Laboratory's Aviation Weather Prediction System. Weather and Forecasting 25: 1027–1051, 2010

[4] KEITH, R. – LEYTON, S. M. An experiment to measure the value of statistical probability forecasts for airports. Weather and Forecasting 22: 928–935, 2007

[5] BERGOT, T. – CARRER, D. – NOILHAN, J. – BOUGEAULT, P. Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study. Weather and Forecasting 20: 627–646, 2005

[6] GROFF, L. S. – PRICE J. M. General aviation accidents in degraded visibility: a case control study of 72 accidents. Aviation Space and Environmental Medicine 77.10: 1062–1067, 2006

[7] GULTEPE, I. – TARDIF, R. – MICHAELIDES, S. C. – CERMAK, J. – BOTT, A. – BENDIX, J. – MÜLLER, M. D. – PAGOWSKI, M. – HANSEN, B. – ELLROD, G. – JACOBS, W. – TOTH, G. – COBER, S. G. Fog research: A review of past achievements and future perspectives. Journal of Pure and Applied Geophysics 164: 1121–1159, 2007

[8] SOUDERS, C. G. – SHOWALTER, R. C. Transformation of NAS to NEXTGEN and FAA's weather architecture impacts: an update. Aerospace Meteorology, AMS 88th Annual Meeting on 20–24 January 2008, New Orleans, LA, USA, 2008

[9] DARNELL, K. M. Analysis of weather forecast impacts on United States Air Force combat operations. M.S. Thesis, Department of Meteorology, Naval Postgraduate School Monterey CA, USA, 2006

[10] TUBA ZOLTÁN – BOTTYÁN ZSOLT Fuzzy Logic-Based Analogue Forecasting and Hybrid Modeling of Horizontal Visibility. Meteorology and Atmospheric Physics, 1–13, 2017, https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-017-0513-1 (2017. 03. 10)

[11] TUBA ZOLTÁN – VIDNYÁNSZKY ZOLTÁN – BOTTYÁN ZSOLT – WANTUCH FERENC –HADOBÁCS KATALIN Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in fuzzy logic-based meteorological support system of unmanned aerial vehicles. Academic and Applied Research in Military Science (AARMS), 12(2): 221–228, 2013

[12] BOTTYÁN ZSOLT – GYÖNGYÖSI ANDRÁS ZÉNÓ – WANTUCH FERENC – TUBA ZOLTÁN – KURUNCZI RITA – KARDOS PÉTER – ISTENES ZOLTÁN – WEIDINGER TAMÁS – HADOBÁCS KATALIN – SZABÓ ZOLTÁN – BALCZÓ MÁRTON – VARGA ÁRPÁD – BÍRÓNÉ KIRCSI ANDREA – HORVÁTH GYULA Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). Időjárás, 119: 307–335, 2015

[13] BOTTYÁN ZSOLT – WANTUCH FERENC – TUBA ZOLTÁN – HADOBÁCS KATALIN – JÁMBOR KRISZTIÁN Creation of a new climatic database for aviation meteorological support system of unmanned aerial vehicles (in Hungarian). Repüléstudományi Közlemények 24(3): 11–18, 2012

[14] PETTY, K. – CARMICHAEL, B. – WIENER, G. – PETTY M. – LIMBER, M. A fuzzy logic system for the analysis and prediction of cloud ceiling and visibility. 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Fl., American Meteorological Society, 331–333, 2000

[15] RIORDAN, D. – HANSEN, B. K. A fuzzy case-based system for weather prediction. Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, 10(3): 139–146, 2002

[16] HANSEN, B. K. A Fuzzy Logic–Based Analogue Forecasting System for Ceiling and Visibility. Weather and Forecasting, 22: 1319–1330, 2007

[17] SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology 15: 234–281, 1977

[18] TUBA ZOLTÁN Selected questions of unmanned aerial vehicles (uavs) and visibility (in Hungarian). Repüléstudományi Közlemények 26 (2): 94–105, 2014

[19] DOSWELL, III C. A. – DAVIES-JONES, R. – KELLER, D. L. On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. Weather and Forecasting 5(4): 576–585, 1990

[20] NURMI, P. Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF Technical Memorandum 430. 2003. http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2003/11401-recommendations-verification-local-weather-forecasts.pdf. (2016. 08. 10.)
[21] BANKERT, R. L. – HADJIMICHAEL, M. Data Mining Numerical Model Output for Single-Station Cloud-Ceiling Forecast Algorithms. Weather and Forecasting 22: 1123–1131, 2007
[22] KLUEPFEL, C. K. TAF verification in the U.S. National Weather Service. NWS Instruction, 10–1601, 2005, http://www.nws.noaa.gov/directives/010/archive/pd01016001c.pdf. (2016.08.10.)
[23] MAHRINGER, G. Terminal aerodrome forecast verification in Austro Control using time windows and ranges of forecast conditions. Meteorological Application 15(1): 113–123, 2008
[24] INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO) Meteorological Service for International Air Navigation. Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation, 18th edition, Montreal, Canada, 2013

APPLICATION OF ANALOGUE AND HYBRID METHODS IN FORECASTING OF HOROZONTAL VISIBILITY

Forecasting visibility is one of the greatest challenges in aviation meteorology. At the same time high accuracy visibility forecasts can significantly reduce or make avoidable weather related risk in aviation as well. In order to improve forecasting visibility, this research links fuzzy logic based analogue forecasting and post-processed numerical weather prediction model outputs by their linear combination in hybrid forecast, which gradually shifts the focus from statistical to numerical products taking their advantages during the nine-hour-long forecast period. Complete verification of categorical forecasts was carried out. The average value of Heidke Skill Score (HSS) of examined airports of analogue and hybrid forecasts show very similar results even at the end of forecast period where the rate of analogue prediction in the final hybrid output is 0.1–0.2 only. However, in case of poor visibility (1000–2500 m) hybrid (0.65) and analogue forecast (0.64) has similar average of HSS in the first 6 hours of forecast period, and has better performance than persistence (0.60) or TAF (0.56).

Keywords: *visibility, hybrid, analogue forecasting, AHP, verification*

Tuba Zoltán (MSc) főtiszt Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály tuba.zoltan@hm.gov.hu orcid.org/0000-0002-0345-5292	Tuba Zoltán (MSc) senior officer Ministry of Defence State Aviation Department tuba.zoltan@hm.gov.hu orcid.org/0000-0002-0345-5292
Dr. Bottyán Zsolt, PhD egyetemi docens, tanszékvezető Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék bottyan.zsolt@uni-nke.hu orcid.org/ 0000-0003-0729-2774	Dr. Bottyán Zsolt, PhD Associate Professor, Head of Department National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aerospace Controller and Pilot Training bottyan.zsolt@uni-nke.hu orcid.org/ 0000-0003-0729-2774

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-17-0372_Tuba_Zoltan-Bottyan_Zsolt.pdf

Papp István

REPÜLŐFEDÉLZETI IRÁNYÍTHATÓ RAKÉTÁK

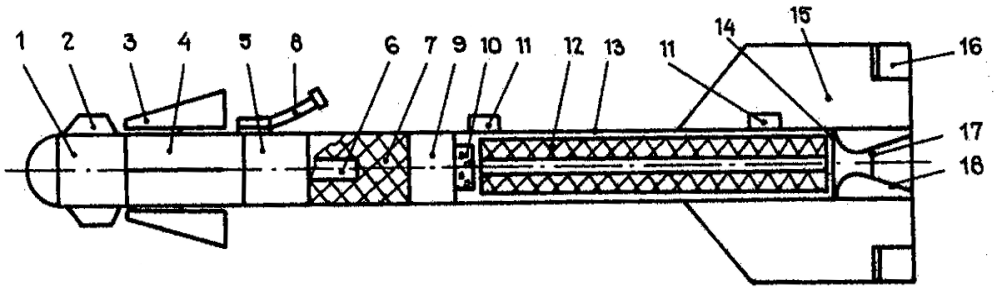
A doktori disszertációmban a repülőfedélzeti irányítható rakéták modellezésével foglalkozom. Ahhoz, hogy egy rakétát megfelelő matematikai modellel helyettesíthessünk, szükség van annak teljes ismeretére. Ebben a publikációban az irányítható rakéták csoportosításával, az alapvető irányítási eljárásokkal, az irányítható rakéták aerodinamikai felépítésével, a berendezések rendeltetésével és a leggyakrabban alkalmazott rakétahajtóművek bemutatásával foglalkozom, mely objektíven segít megérteni az irányítható rakéták működését.

Kulcsszavak: *repülőfedélzeti irányítható rakéta, rakétahajtómű, rakétairányítás*

Irányítható rakéta

A rakétatechnika fejlődésének kezdete a II. világháború idejére tehető, igaz Kínában már jóval korábban is alkalmaztak rakétához hasonlító szerkezeteket tűzijátékokon. Az értekezés szempontjából a fejlődést mindenképpen csak a múltszázaddal érdemes kezdeni, mert a repülőfedélzeti rakéták fejlődéshez először a repülőgépek fejlődésére volt szükség. A repülés korai éveiben számos olyan rakéta változatot kipróbáltak, mely később nem került sorozatgyártásra, éppen ezért a repülőfedélzeti irányítható rakéták vizsgálata során csak azokkal érdemes foglalkozni, melyek rendszerbeállítása is megvalósult.

A **repülőfedélzeti irányítható rakéta** a légierő fő fegyverzetét képezi elsősorban a légicélok megsemmisítésében, de számos irányítható rakéta áll rendelkezésre felszíni célok támadására is. Az irányítható rakéták felépítése többé-kevésbe megegyezik, ezért egy általános példán keresztül vizsgálom meg a rakéta felépítését [2].



1. ábra A repülőfedélzeti irányítható rakéta felépítése [2]

A repülőfedélzeti rakéta felépítése:

- célkoordinátor (CK) (1). Gyakran nevezik önirányító fejnek is;
- destabilizátor (2);
- kormányfelületek (3);
- irányítórekesz vagy kormányrekesz (4);
- közelségigyújtó (9);
- végrehajtó-biztosító szerkezet (PIM[1]) (6);

[1] PIM – ПИМ – предохранительно-исполнительный механизм

- harcirész (7);
- elektromos csatlakozó vagy nyíródó csatlakozó (8);
- energetikai blokk (5);
- a hajtómű indító vagy gyullasztó töltete (10);
- függesztési csomópontok (11);
- szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű (12);
- a hajtómű égőtere (13);
- diafragma[2] (14);
- stabilizátorok (15);
- pörgettyűs csűrők vagy rolleron-ok (18);
- záródugó (17);
- Laval-fúvóka (18);

Célkoordinátor: irányítható légiharc rakéták esetében a leggyakoribb a passzív infravörös (PIR vagy IR), a félaktív- és az aktív rádiólokációs célkoordinátor. Feladata a cél térbeli pozíciójának meghatározása a rakétához képest és az irányításhoz szükséges jelek kidolgozása. Például egy egyhajtóműves vadászrepülőgépet egy mai korszerű PIR célkoordinátor 20–30 km-es távolságból érzékelhet. Lopakodó képességekkel tervezett repülőgép esetében ez a távolság töredékére csökkenhet [18].

Destabilizátor: nem minden rakétán találunk ilyen aerodinamikai felületet. A nevéből is adódik a hatása ellentétes a stabilizátoréval, mivel a statikus stabilitást csökkenti.

Kormány felületek: az aerodinamikai irányítást biztosítják, mely a célkoordinátor által kidolgozott jelek alapján a rakéta térbeli mozgását határozza meg, hogy az a lehető legnagyobb valószínűséggel a cél körzetébe kerüljön.

Irányítórekesz vagy kormányrekesz: a kormányokhoz tartozó pneumatikus, forrógázos vagy hidraulikus kormánygépek és az azokhoz tartozó segédberendezéseket magában foglaló berendezések összessége.

Közelségigyújtó: az irányítható légiharc rakéták esetében nem követelmény a kontakt találat, elég azt csak a cél körzetébe kell eljuttatni. Ez a távolság általában a harcirész méretétől, megsemmisítési távolságától függ. Nagyobb eszközök esetében kb. 15–20 m, kisebbek esetében 5–10 m. Ebből adódóan a közelségigyújtó feladata, hogy az adott távolságon belül működésbe hozza a harcirészt. A leggyakrabban alkalmazott típusa az optikai vagy a rádiólokációs elven működő gyújtó. Az optikai létezik passzív infravörös elven működő változatban is, de előfordul aktív a látható fény tartományában működő is, illetve aktív lézer is. A rádiógyújtóból csak az aktív változat, terjedt el a légiharc rakétákban.

Az irányítható rakéták csoportosítása

Az irányítható rakéták csoportosítása több szempont szerint lehetséges. A kapcsolódó szakirodalmakat tanulmányozva, [4][13][17] munkákban leírt változat, amely a tanulmányom szempontjainak legjobban megfelel, így a továbbiakban azt alkalmazom.

[2] diafragma – egy rendszerint fémből készült rács, mely megakadályozza a hajtóanyag még el nem égett részecskéinek a fúvókába jutását, megelőzve ezzel annak eldugulását.

A **távirányítású rendszerekben** az irányító jel a rakétán kívül (pl.: a rávezető állomáson, ami a helikopter vagy repülőgép fedélzetén található) jön létre. Ezt parancsjel formájában kapja meg a rakéta fedélzeti irányító rendszere és működésbe jönnek a kormányok, amik a röppályát módosítják. A parancsjel közvetlenül vezetéken, vagy rádióhullámok segítségével továbbítható.

Az **önirányító rendszerekben** a rakéta valamint a cél kölcsönös helyzetét az irányító rendszer részét képező, a rakéta fedélzetén található célkoordinátor végzi. Ennek jele megfelelő feldolgozás (zavar- és zajszűrés, erősítés stb.) után a irányító berendezésén keresztül kormány elmozdítási jeleket hoz létre és ezzel korrigálja a rakéta röppályáját.

A **programirányítású rendszerekben** a rakéta repülése előre meghatározott paraméterek szerint történik. A fedélzetén elhelyezett berendezés nincs kapcsolatban sem a céllal, sem az indító repülőgéppel, a cél paramétereit az indítás előtt kapja meg a hordozó fedélzeti számítógépétől. A repülés folyamán a fedélzeti irányító berendezés összehasonlítja a beprogramozott értékeket és a valós paramétereket, majd ennek eredményeként kidolgozza az irányító jeleket és kiadja az irányító parancsokat a vezérlő szervek felé. A programvezérlés előnye a nagyfokú zavarvédettség, hátránya viszont az, hogy nincs lehetőség a program, repülés közbeni módosítására.

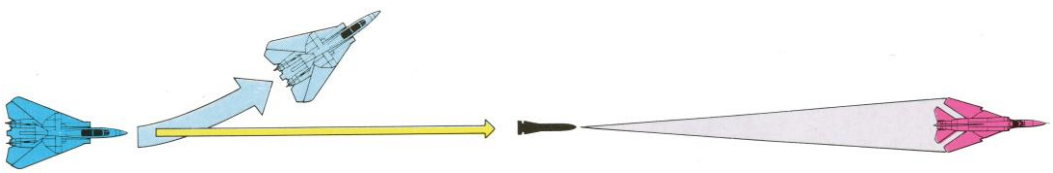
A **kombinált irányítású rendszer** alkalmazása egyre gyakoribb a közepes és nagy hatótávolságú légiharc rakétákban. Az ilyen eszközök célkörzetbe juttatása programirányítással történik, majd a cél befogása után áttér önirányításra, de akár korrekcióra is van lehetőség. Ez azt jelenti, hogy az indító repülőgép fedélzeti lokátora figyeli a cél és az elindított rakéta kölcsönös helyzetét, és szükség szerint egy rövid impulzuscsomaggal módosíthatja az indításkor bevitt programot. Bonyolult légi helyzetben, illetve mikor a cél mozgása kiszámítható (pl. teherszállító, bombázó, üzemanyagtöltő repülőgép) lehetőség van a rakétát magára hagyni, vagyis teljesül a „Tüzelj és felejtsd el!” elv.

A cél kiválasztásának módszere szerint három önirányítási módszert különböztethető meg:

- aktív;
- félaktív;
- passzív.

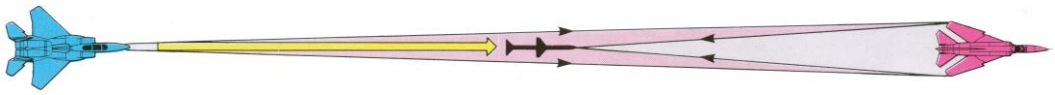
Az **aktív és félaktív** önirányítási rendszerek lényege, hogy a célt mesterségesen kiemelik a környezeti hátteréből – megvilágítják – elektromágneses hullámok segítségével. A célról visszaverődött jeleket a rakéta célkoordinátora érzékeli és a szükséges jelfeldolgozás után kiszűri belőle a szükséges információt a cél helyzetéről és mozgásáról. A hasznos információk alapján kidolgozza az önirányító rendszerben az irányító jeleket, ami a kormánygépek segítségével módosítja az eszköz röppályáját.

Azokat a rendszereket ahol a sugárzó berendezés is a rakéta fedélzetén található ***aktív önirányításnak*** (1. ábra), ahol csak a vevő berendezés van azt ***félaktív önirányításnak*** nevezzük (2. ábra).



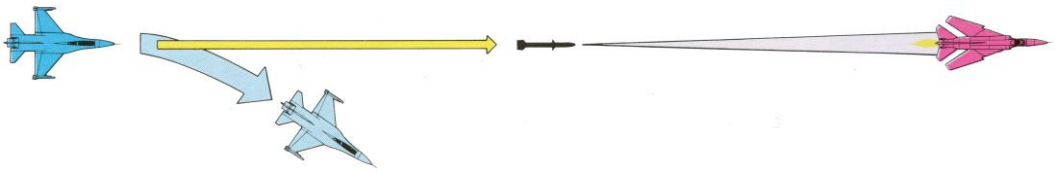
1. ábra Aktív önirányítás [4]

A félaktív rendszerek legnagyobb hátránya, hogy a rakéta teljes célba jutásáig meg kell világítani azt, vagyis folyamatosan biztosítani kell a mesterséges kiválasztást a környezetből. Ezt leggyakrabban a hordozó repülőgép végzi a rádiólokátora segítségével és ilyenkor megnövekszik a felderítésének a veszélye, mivel folyamatos rádió kisugárzás történik, illetve korlátozottak a saját (önvédelmi) manőver lehetőségei. Gyakran – közepes és nagy hatótávolságú légiharc rakéták esetében – az aktív és a félaktív önirányítási rendszereket kombináltan is alkalmazhatják.



2. ábra Félaktív önirányítás [4]

Passzív önirányítási módszer (3. ábra) esetében a célok saját kisugárzását (hő, fény, elektromágneses) használjuk fel a rakéta fedélzetén található célkoordinátor hasznos jeleként. A legelterjedtebb változat a passzív infravörös önirányítás (PIR[3]), ahol a repülőgép hajtómű kiáramló forró gázainak, a sárkányszerkezet felmelegedett elemeinek hősugárzását érzékeli a célkoordinátor. Ezeknek a rendszereknek több előnyös tulajdonsága is van, ilyen pl.: a viszonylag egyszerű, olcsó felépítés, a nagy pontosság, valamint az a tény, hogy a rakéta indítása után a hordozó repülőgép azonnal kiválhat a manőverből és megkezdheti egy másik, új cél támadását, vagy visszatérhet a bázisra. Ezt nevezzük a „Tüzelj és felejtsd el!" elvnek. A PIR alkalmazásának csak a kedvezőtlen időjárási viszonyok szabhatnak határt [1][4][5][17].



3. ábra Passzív önirányítás [4]

Az irányítható rakéták aerodinamikai felépítése

A tengelyszimmetriával rendelkező rakéták kormányainak a szárnyakhoz viszonyított elhelyezkedésétől függően aerodinamikai elrendezéseket különböztetünk meg:

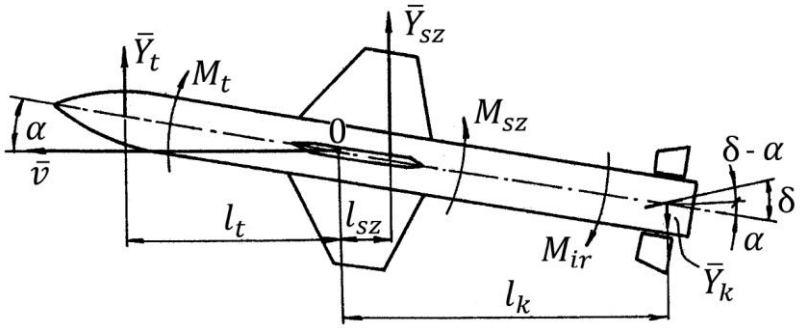
- normál vagy hagyományos rendszer;
- csupaszárny rendszer;
- fordított vagy kacsa elrendezés;
- forgatható szárnyas rendszer.

Normál vagy hagyományos aerodinamikai elrendezés (4. ábra) esetén a kormányok a szárnyak mögött helyezkednek el, melynek előnye, hogy a kormányok kitérése során keletkező légörvények nincsenek hatással a szárnyakra, így azok hatásossága magasfokú. Ennek következtében jelentős kormánylap elfordulások hozhatók létre, így a rakéta maximális állásszöggel repülhet, így nagy irányítóerő keletkezik a szárnyakon is. Az elrendezés hátránya, hogy a kormányokon és a szárnyakon keletkező irányítóerők ellentétes hatása, ami csökkenti az eredő irányítóerőt. Illetve a kormányok a szárnyak leáramlásában találhatók, ezért a hatékony működésük érdekében a felületük növelése szükséges, ami viszont tömeg növekedéssel jár. A rendszer másik nagy hátrány a konstrukciós kialakítás során mutatkozik meg, mert a hajtómű gázok

[3] PIR – Passive InfraRed – passzív infravörös

kivezetését is meg kell oldani úgy, hogy a rakéta farokrészén a Laval-fúvóka körül elhelyezhetők legyenek a kormányfelületek és azok kormánygépei.

A 4. ábra alapján vizsgáljuk meg az kományerő létrejöttét. Kezdeti feltételnek vegyük a $\delta = 0^{\circ}$-ra kitérített kormányokat és $\alpha = 0°$ állásszöget. A kormánykitérésen egy kormánypár (egymással szemben lévő kormányok) azonos irányú elfordulását értjük.



4. ábra Normál aerodimaikai elrendezés [2]

Ha a kormányt δ szögre kitérítjük, rajta $\bar{Y}_k$ kormányerő keletkezik, amely a rakéta tömegközéppontjához képest $\bar{M}_{ir} = \bar{Y}_k \cdot l_k$ irányító nyomatékot hoz létre. Ennek hatására a rakéta a tömegközéppontja körül kezd elfordulni és megjelenik az $\alpha > 0$ állásszög, $\bar{Y}_{sz}$ a szárnyon és $\bar{Y}_t$ a rakéta testen ébredő irányítóerő. A rakéta állásszögének α növekedésével az $\bar{Y}_{sz}$ és az $\bar{Y}_t$ erők is nevekednek, az $\bar{Y}_k$ pedig csökken, mivel csökken a kormányok állásszöge $|\alpha_k| = |\delta| = \alpha$. Ezzel egy időben növekszik a $M_{sz} = Y_{sz} \cdot l_{sz}$ és $M_t = Y_t \cdot l_t$, de csökken az M_{ir} nyomaték értéke a tömegközépponthoz viszonyítva, így egy meghatározott állásszögön létrejön a nyomatékok egyensúlya $M_{sz} = M_{ir} + M_t$, és a rakéta tömegközéppont körüli forgása megszűnik. Ebben az esetben az eredő irányítóerő $\bar{Y} = \bar{Y}_{sz} + \bar{Y}_t - \bar{Y}_k$ a rakéta tömegközéppontjában hat. Az fenti nyomaték egyensúly esetén a rakéta egyensúlyi állásszögéről beszélünk. Minden kormánylap kitéréshez tartozik egy egyensúlyi állásszög, melyet lineárisnak tekinthetünk.

$$\alpha = k_\delta \cdot \delta,$$

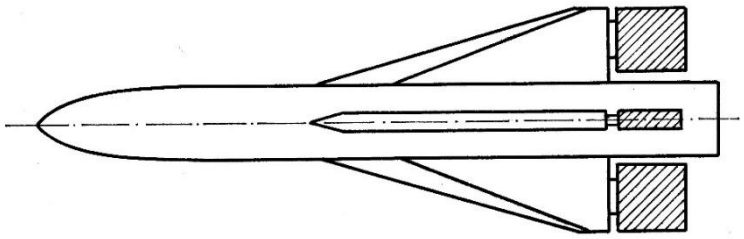
ahol a k_δ – egyensúlyi arányossági tényező.

A repülés állandósult állapotában az α és δ előjele ellentétes, ezért k_δ negatív.

A normál elrendezésű rakéták esetében csűrőnyomaték létrehozására eleronok alkalmazása akkor célszerű, ha a szárnyfesztáv lényegesen meghaladja a kormány fesztávolságot. Ellenkező esetben differenciál kitérítésű kormányok alkalmazása a célszerű [2][6].

Csupaszárny aerodinamikai elrendezés (5. ábra) a normál aerodinamikai elrendezés egyik speciális esete, amikor a kormánylapok a szárnyak kilépő élén helyezkednek el. Előnyei és hátrányait, illetve az irányító erő létrehozásának folyamatát tekintve megegyezik a normál aerodinamikai elrendezéssel. A csupaszárny aerodinamikai rendszer több szerkezeti sajátossággal rendelkezik. A szárny fesztávolsága jelentősen csökken, így könnyebb a rakéta függesztése a repülőgépre, növekszik a rakétatest szilárdsága, valamint a szárnyak kisebb terhelése miatt – $\bar{Y}_{cs}$ (a csűrőkön keletkező erő) kisebb erőkaron hat – így csökkenthető a rakéta tömege. Mivel a szárnyak nem takarhatják a harcirészt, illetve a közelségi gyújtót, így azokat a rakéta elején kell elhelyezni, valamint a szárnyakat hátra kell húzni. Ezzel viszont növekszik az $\bar{Y}_{sz}$ erő erő-

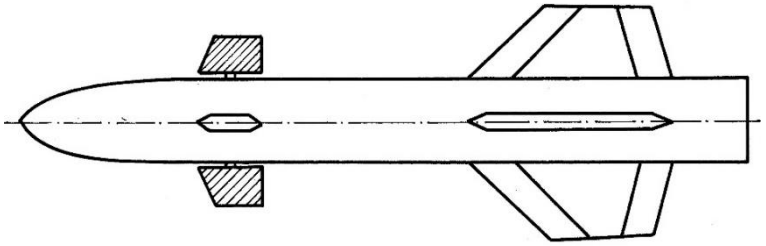
karja l_{sz}, ami az egyensúlyi állásszög csökkenéséhez vezet, ezzel romlik a rakéta irányíthatósága. Ezt a rakéta orrészén elhelyezett kisebb merev aerodinamikai felületek ún. destabilizátorok elhelyezésével lehet kiküszöbölni, amelyek kompenzálják a szárnyak hátra helyezéséből eredő M_{sz} nyomatékot. Csűrőnyomaték létrehozása a szárnyak kilépő élein elhelyezett kormányfelületek differenciál kitérítésével valósítható meg [2][6].



5. ábra Csupaszárny aerodinamikai elrendezés [23]

Fordított – kacsa – aerodinamikai elrendezésnek (6. ábra) számos előnye van. Talán a legfontosabb, hogy egyensúlyi állásszögeken, a szárnyon és a kormánylapokon azonos irányú iránytóerő keletkezik. A kormánylapok hatékony működését nem zavarja a szárnyakról leváló légáramlat, ami lehetővé teszi a kormányfelületek méretének csökkentését. Ez az elrendezés jelentősen egyszerűsíti a harcirész és a közelségi gyújtó elhelyezését is. Mivel egyensúlyi állásszögeken a kormánylapok állásszöge

$$\alpha_k = \delta + \alpha$$

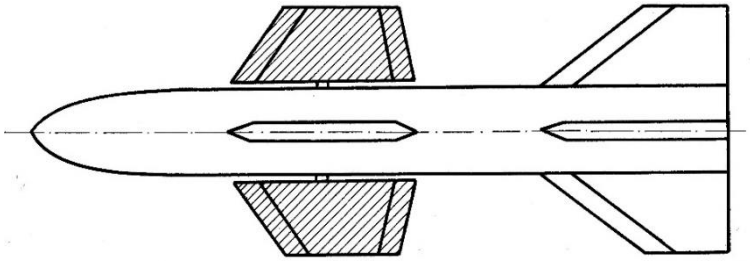


6. ábra Fordított (kacsa) aerodinamikai elrendezés [23]

A szárnyakon olyan $\Delta\bar{Y}_{sz}$irányító erő jöhet létre, ami $\bar{Y}_{sz}$-el ellentétes irányú és teljesen közömbösítheti az $\bar{Y}_k$ pozitív hatását. Mivel a megzavart légáram nem egyformán éri a négy szárnyfelületet ebből következik, hogy a keletkezett kiegészítő erők nagysága sem egyforma. Ennek következtében jelentős dőlési nyomaték keletkezik, ami a kormányok differenciál kitérítésével nem kompenzálható, de rolleronok (pörgettyűs csűrők) alkalmazásával igen.

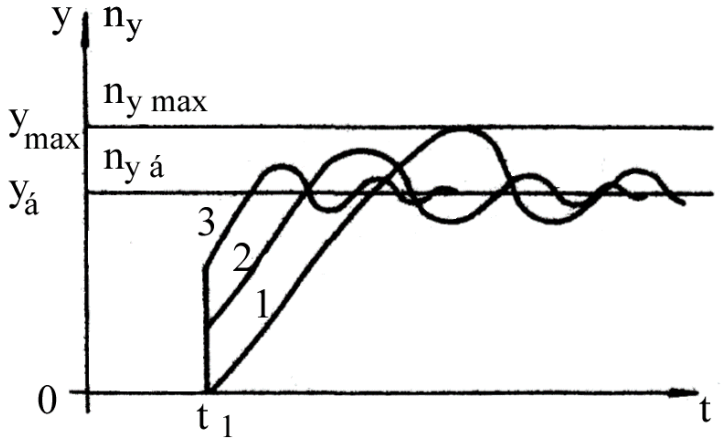
Megvizsgálva az irányító erők és nyomatékok létrehozásának módját, megfigyelhető, hogy a vízszintes síkban elhelyezett kormánypár δ szögre történő kitérítésekor $\bar{Y}_k$ irányító erő és ennek nyomatéka M_{ir} keletkezik. Az irányító nyomaték M_{ir} hatására a rakéta kezd elfordulni a tömegközéppontja körül. A létrejövő állásszög miatt megjelenek az $\bar{Y}_{sz}$ és az $\bar{Y}_t$ erők. A kormányok állásszögének $\alpha_k = \delta + \alpha$ növekedése miatt az $\bar{Y}_{sz}$, az $\bar{Y}_{sz}$, az $\bar{Y}_t$ erők és azok M_{ir}, M_{sz}, és M_t nyomatékai tovább növekednek. Ezek közül az M_{sz} nyomaték változása a legintenzívebb. Valamely α egyensúlyi állásszög esetében létrejön az $M_{sz} = M_{ir} + M_t$ nyomatékegyenlőség és a rakéta tömegközéppont körüli forgása befejeződik. Ekkor a rakéta dinamikus egyensúlyi helyzete kerül. Ekkor az irányító erők eredője $\bar{Y} = \bar{Y}_{sz} + \bar{Y}_k + \bar{Y}_t$ a rakéta tömegközéppontjában hat. Az α és a δ szögek azonos előjelűek, ezért a k_δ egyensúlyi arányossági tényező pozitív lesz [2][6].

Elforgatható[4] szárnyas aerodinamikai elrendezés. (7. ábra). Nagyon hasonlít a fordított elrendezésre, azzal a különbséggel, hogy kormányfelületeket hátrébb – a tömegközéppont környezetében –helyezik el és megnövelik azok felületét. Ezeken keletkezik a rakéta irányító ereje. A rakéta farok részénél rögzített aerodinamikai felületek vannak, melyek a stabilizátor szerepét töltik be (7. ábra).



7. ábra Forgatható szárnyas aerodinamikai elrendezés [23]

Az irányítóerők és nyomatékok létrehozása a fordított rendszernél leírt módon történik. Az elforgatható szárnyas aerodinamikai elrendezés legfontosabb előnye az irányító erő gyors létrehozása, amely a közvetlenül a szárny elfordulásakor keletkezik, melyek forgástengelye körüli inercia nyomatéka is lényegesen kisebb. A szárnyak az irányító erő létrehozásán kívül csűrő nyomatékot is létrehozhatnak. Ez – ellentétben a fordított aerodinamikai elrendezéstől – szárnyankénti külön kormánygépet igényel. Ebben az esetben differenciál kormányokról beszélünk.



8. ábra Az irányító erő létrehozásának átmeneti folyamata
1 – normál, 2 – fordított, 3 – elforgatható szárnyas aerodinamikai elrendezés átmeneti függvényei [2]

Az 8. ábrán az irányító erő és a vele arányos $n = \frac{Y}{G} = \frac{Y}{m \cdot g}$ irányító túlterhelés látható az idő függvényében. A rakéta egyensúlyi állásszöge esetén az irányító erő nagysága $Y_{á}$, a túlterhelés pedig $n_{yá}$.

Az elforgatható szárnyas aerodinamikai elrendezés hátránya, hogy az irányító erők létrehozására nagy kormányfelületek és ennek megfelelően nagy teljesítményű kormánygépek szükségesek, melyek jelentősen növelik a rakéta tömegét.

Az elemzések és a tapasztalatok azt mutatják, hogy mindegyik aerodinamikai elrendezésnek meg vannak az előnyei és a hátrányai. A tervezés során törekednek arra, hogy olyan aerodinamikai

[4] Számos szakirodalomban forgatható szárnyas elnevezéssel találkozhatunk (A szerző megjegyzése)

elrendezést válasszanak, mely előnyei legjobban megfelelnek a rakéta rendeltetésének, a hátrányai pedig ne gyakoroljanak jelentős negatív hatást a rakéta alkalmazási hatékonyságára [2][6].

Például nagy magasságban alkalmazott légiharc rakéták esetében célszerű normál vagy csupaszárny aerodinamikai elrendezést alkalmazni, mert azok jelentős egyensúlyi állásszöggel rendelkeznek, így a szárnyak teljes egészében kihasználtak az irányító erő létrehozásában. Erre nagyon jó példák az AIM-54 és az R-33 légiharc rakéták [19][20].

Az irányítható rakéták hajtóművei

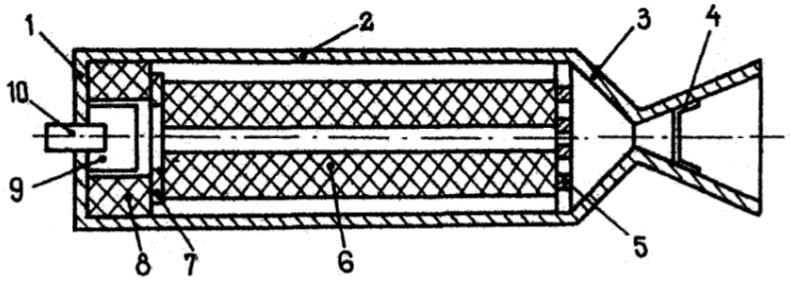
Feldolgozva a vonatkozó irodalmakat [2][3][6][8][9][10][11][12] ebben a részben a repülőfedélzeti irányítható rakétákon leggyakrabban alkalmazott hajtómű típusra kívánok kitérni ezzel is megalapozva a disszertációmban tárgyalt irányítási rendszereket.

A repülőfedélzeti irányítható rakéták egyik legfontosabb egysége a hajtómű. A hajtómű biztosítja a rakéta indítását az indítóberendezésről (kivétel a katapultos indítás), valamint az irányításhoz és a cél elfogásához szükséges sebességet.

A rakétákban kizárólag reaktív hatóműveket alkalmaznak, melyeket a következőképpen lehet csoportosítani:

- sugár hajtómű:
  - turboreaktív;
  - torlósugár;
- rakétahajtómű:
  - folyékony hajtóanyagú;
  - szilárd hajtóanyagú;
- kombinált hajtómű.

A repülőfedélzeti rakétákon leggyakrabban szilárd hajtóanyagú rakétahajtóműveket alkalmaznak, melynek felépítése viszonylag egyszerű (9. ábra).



9. ábra Szilárdhajtóanyagú rakétahajtómű felépítése [2]

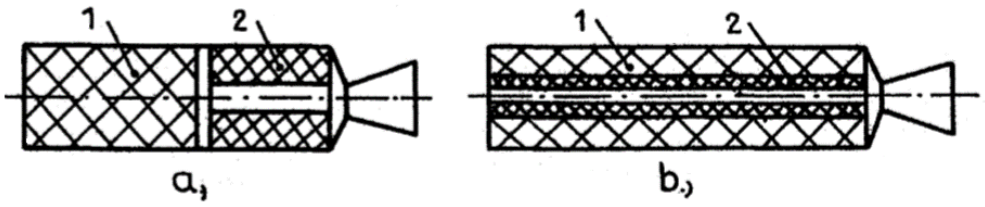
A hajtómű a következő főbb szerkezeti elemekből áll:

- mellső fedél (1);
- hajtómű test (2). Ez leggyakrabban a rakétatest része is egyben;
- hátsó fedél a fúvókával (3);
- záródugó (4);
- diafragma (rács) (5);
- hajtómű töltet (6);
- közbetét (7);

- amortizátor vagy rezgés csillapító (8);
- gyullasztó töltet (9);
- piropatron vagy elektromos gyutacs (10).

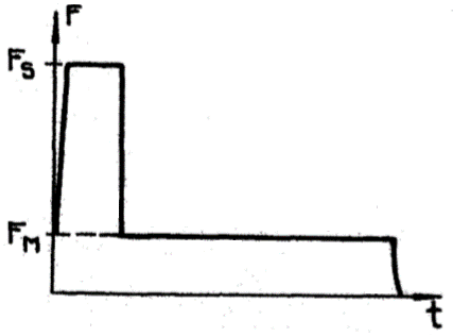
A hajtómű indításakor elektromos feszültség kerül az indító berendezésből az elektromos gyutacsra, mely begyújtja a durva szemcsés fekete lőporból álló gyullasztó töltetet. A megbízható indítás érdekében gyakorta alkalmaznak egyidejű működésű elektromos gyutacsot. A gyullasztó töltet végzi a hajtómű lőportöltetének begyújtását. A töltetben radiális furatok lehetnek, melyek az égőtér egyenletes nyomáseloszlását biztosítják.

Nagyobb indítási távolság ($D_0 > 40$ km) esetében gyakorta előfordul, hogy kétfokozatú hajtóművet alkalmaznak. Ez nem ugyanaz, mint a több lépcsős (űr, illetve interkontinentális ballisztikus) rakétákban alkalmazott megoldás. Ebben az esetben pl. a hajtómű teret osztják két részre és két különböző lőportöltetet alkalmazva bennük (10. ábra). Az *10. a* ábrán a kétkamrás, a *10. b* ábrán pedig az egykamrás hajtómű látható. Mindkettő belsejében menet (utazó) töltet (1), illetve egy start (gyorsító) töltet (2) található. A start fokozat tolóereje és égési sebessége jelentősen (kb. 4–6 szor) nagyobb, mint a menet fokozaté.

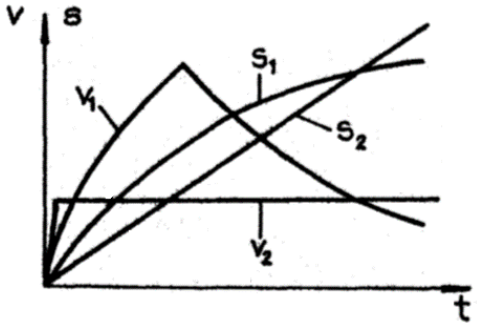


10. ábra Kétfokpzatú szilárdhajtóanyagú rakétahajtómű [2]

Egyfokozatú hajtómű a rakétát rövid idő alatt nagy sebességre gyorsítja, hogy a passzív szakaszon még megfelelő mozgási energiával és energetikai tartalékkal rendelkezzen.

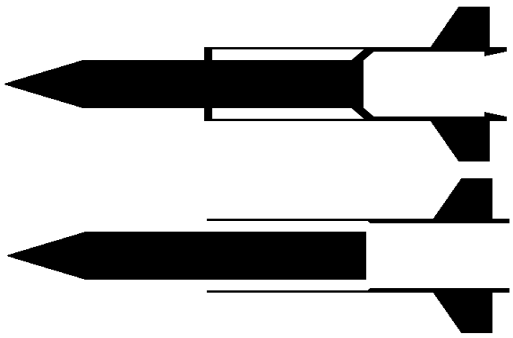


11. ábra A start és menet hajtómű tolóereje [2]



12. ábra Egy- és kétfokozatú hajtóművek sebesség, illetve útviszonyai [2]

Repülőfedélzeti rakétákon az utóbbi években megjelent a kétfokozatú hajtóművek egy érdekes változata (13. ábra). jelenlegi ismereteim szerint az orosz H-31 és a francia Meteor rakéták rendelkeznek ilyen hajtóművel [2][9][10][21][22].



13. ábra Kétfokozató hatómű torlósugárhatóművel [9][10]

A rakétahajtómű startfokozata az eddig is tárgyalt nagy égési sebességgel bíró lőportöltetből áll. Kiégése után az üres hajtómű a menet fokozat utánégető tereként funkcionál. A második fokozat lőportöltete oxigénhiányos[5] lőporból készült. Ez viszont a repülés során külső levegő betáplálást igényel. A 13. ábrán is látható, hogy az első fokozat kiégése után nyitja ki a levegő-beömlő nyílásokat. Természetesen ehhez már egy megfelelő sebesség szükséges, amit a start hajtómű biztosított már a rakétának.

Ahhoz, hogy a rakétát megfelelő sebességre gyorsítsa fel a hajtómű jól megtervezett hajtóanyag (lőportöltet) és lőportöltet forma szükséges. A repülőfedélzeti rakétákban leggyakrabban keverék hajtóanyagot alkalmaznak. Ez tüzelőanyag (kaucsuk- és gyantaszerű anyagok: természetes és mesterséges kaucsuk, karbamid, fenolgyanták, szurok, polimerbutadének, poliuretánok stb.) és oxidátorok (nagy oxigén tartalmú vegyületek: ammónia-, nátrium-, kálium-, lítiumperklorátok és nitrátok), valamint összekötő (ragasztó) anyagok – ez is hajtóanyag – keveréke. A hajtóanyagot öntéssel vagy préseléssel helyezik be a hajtómű térbe, így az kitölti a rendelkezésre álló helyet. Az öntéskor vagy préseléskor alakítják ki a hajtóanyag belső furatait, melyek a megfelelő égési felületet biztosítják.

Hajtóanyag formák

A hajtóanyag égése során az egy másodperc alatt keletkezett gázok mennyisége m_g arányos a töltet égési felületével *S*:

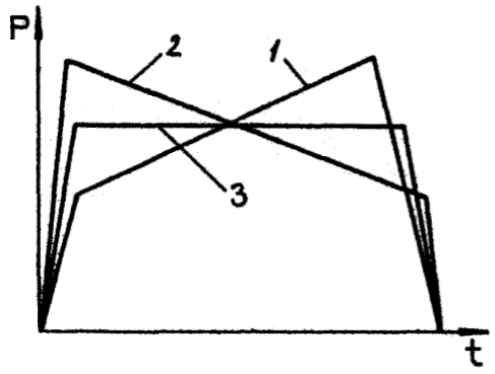
$$m_g = S \cdot \rho \cdot u$$

ahol

- ρ – a töltet sűrűsége;
- u – az égési sebesség.

Ha a hajtómű égése során az *S* felület növekszik progresszív (14. ábra) (1), ha csökken degreszszív (2), stagnálás esetén pedig semleges (3) égésről beszélünk.

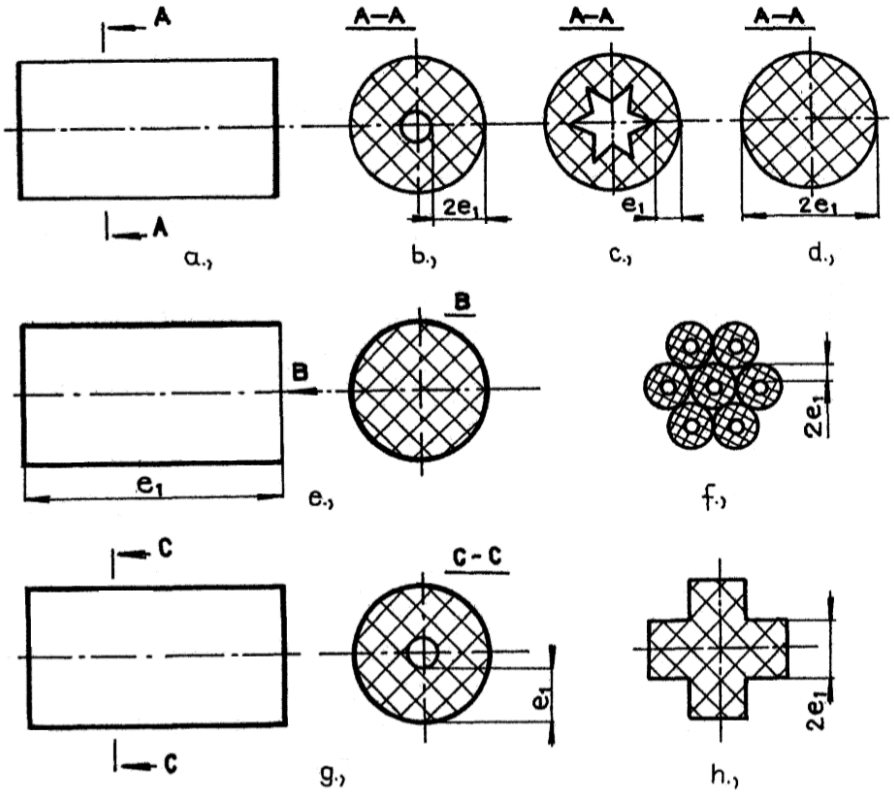
[5] Oxigénhiányos lőpor (robbanóanyag) – a lőpor (robbanóanyag) nem tartalmazza az égéshez szükséges oxidálószer teljes mennyiségét, azt a környező levegőből használja fel.



14. ábra Az égőtér nyomása *p* az idő (*t*) függvényében [2]

Az ábrából látható, hogy a gázok maximális nyomása semleges égés esetén lesz a legkisebb. Ez lehetővé teszi az égőtér falvastagságának a csökkentését. Az égés jellege a töltet formájával – keresztmetszetének kialakításával (az égő felület nagyságának szabályozásával) – befolyásolható. Az égés szempontjából lényeges paraméter még az égő réteg vastagsága e_1, ami gyakorlatilag egyenlő a töltet legvékonyabb falvastagságával, vagy annak a felével (15. ábra), és a hajtómű működési idejének meghatározásához kiinduló adatként szolgál.

A töltet belső keresztmetszetének kialakításán kívül az égés jellege befolyásolható az egyes felületek nem éghető réteggel történő bevonásával. Ezt a hajtóanyag égőtérben történő elhelyezésnek miként jével lehet megoldani. Ha az közvetlenül öntéssel töltik be a hajtóanyagtérbe, akkor a külső felülete nem fog begyulladni és égni.



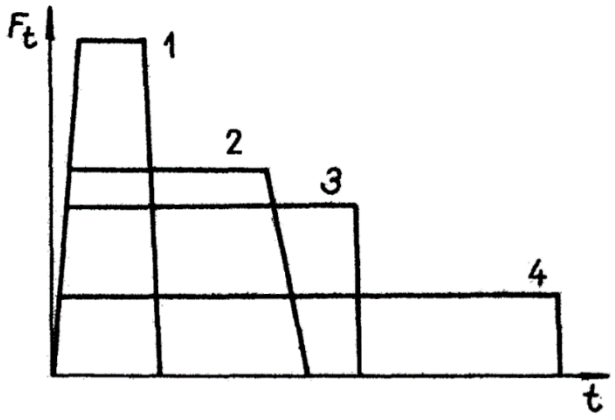
15. ábra Hajtóanyag formák [2]

Ha ennek megfelelően megvizsgáljuk a 15. ábra hajtóanyag formáit:

- a ***d*** és ***h*** ábrán látható töltet forma degresszív, a ***g*** progresszív, a többi pedig semleges jelleget mutat;
- a formák közül az egyik legelterjedtebb az ***a***, ***b*** ábrán látható, amely kör keresztmetszetű csatornával ellátott hengeres test. A töltet homlokfelületeit hővédő réteg borítja, így a töltet a belső és külső felületéről egyforma sebességgel növekvő és csökkenő felületen ég, így az égő felületek összege nem változik;
- az előző pontban leírtak igazak az ***f*** ábrán látható csöves, kötegelt töltetre is. Ezt a formát gyakorta alkalmazzák nemirányítható levegő-föld rakétákban, ahol rövid idő alatt nagy tolóerőt kell kifejteni;
- az ***a***, ***c*** csillag keresztmetszetű kialakítás nagyon gyakori az irányítható légiharc rakéták esetében. Itt is hővédő réteg borítja a homlokfelületeket, a külső felületet az öntési eljárás következtében rés nélkül érintkezik az égőtér falával, így nem ég. Ennek következtében a csillag keresztmetszetű hajtóanyagformával biztosítható az állandó égési felület.
- az ***e*** formájú töltettel rendelkező hajtóműtöltetet menethajtóművekben alkalmazzák, mivel kis égési felülettel rendelkezik, így kis tolóerőt hosszú időn keresztül biztosít.

Ha négy különböző keresztmetszetű, de azonos összimpulzussal rendelkező hajtóanyagforma tolóerő diagramját ábrázoljuk (16. ábra) akkor a következőt kapjuk:

- 1 – csöves, kötegelt töltet (15. f. ábra);
- 2 – csillag keresztmetszetű belső csatornával ellátott töltet (15. c. ábra);
- 3 – csöves töltet (15. b. ábra);
- 4 – homlok felületen égő töltet (15. e. ábra).



16. ábra Tolóerő diagrammok [2]

ÖSSZEGZÉS

Ebben a publikációban a doktori disszertációmhoz kapcsolódóan a repülőfedélzeti irányható rakéták felépítését mutatom be röviden, mellyel alapot kívánok teremteni a leírt matematikai modell jobb megértéséhez.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Gunston, Bill: Korszerű harci repülőgépek fegyverzete, Zrínyi Kiadó 1995, pp. 132–137

[2] Kakula János mk. őrnagy: Rakéták szerkezettana, Főiskolai jegyzet, KGyRMF, Szolnok 1989 pp. 22–30

[3] Lőrincz Attila hdgy.: Repülőfedélzeti fegyverzet komplexum, MH Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, 1990, pp. 48–70

[4] Szilvássy László: A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a Magyar Honvédségben, Doktori (PhD) értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2008, url: http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2008/szilvassy_laszlo.pdf

[5] Szilvássy László: A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a Magyar Honvédségben, (Tanulmány a szerző ZMNE Katonai Műszaki Doktori Iskolában megvédett doktori (PhD) értekezésének főbb eredményeit mutatja be). MTA DAB Műszaki Szakbizottsága, Elektronikus Műszaki Füzetek X. Debrecen, 2011., ISBN 978-963-7064-26-5 url: http://store1.digitalcity.eu.com/store/clients/release/aaa-abchf/doc/musz_fuz_10_2011.09.09-09.21.50.pdf; url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/2011-35_A_HH_fvrensz_mod_lehet_a_MH-ben.pdf

[6] George M. Siouris: Missile Guidance and Control Systems; Springer 2004. ISBN 0-387-00726-1

[7] Szilvássy László: Repülőfedélzeti tűzfegyverek lövedék mozgásának ballisztikai számítása; Repüléstudományi Közlemények XXVI. évfolyam,2014. 1. szám

[8] Szilvássy László: A repülőgépfedélzeti rakéták hajtóműveiben alkalmazott hajtóanyagok, Repüléstudományi Közlemények X/2. pp. 43–50 (1998), url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/1998-01_A_rgfed_rak_hajtom_alk_hajt.pdf

[9] Szilvássy László, Békési Bertold: A katonai repülőgép fedélzeti rakéták hajtóművei, 12th Hungarian Days of Aeronautical Sciences Conference „The Challenge of Next Millenium on Hungarian Aeronautical Sciences" Nyíregyháza, pp. 124–131., eR-Group (1999) (ISBN:963 03 7803 5), url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/1999-03_A_kat_rgfed_rak_hajtom.pdf

[10] Szilvássy László, Békési Bertold: Rakéta hajtóművek, Repüléstudományi Közlemények XI/1., pp. 263–271, (1999), url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/1999-04_SzL-BB-Rak_hajtomuvek.pdf

[11] Szilvássy László, Békési Bertold: Repülőfedélzeti rakéták hajtóművei, Bolyai Szemle Fiatal Tudósok Konferencián elhangzott előadás, Budapest (2002), url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/2002-15-SzL-BB-Rg_rak_hajtomuvei.pdf

[12] Szilvássy László, Dr. Szabó László: Rakéták reaktív hajtóművei, Repüléstudományi Közlemények XVIII/1. pp. 209-216., (2006), url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/2006-22-SzL-SzL_Rak_reaktiv_hajt.pdf

[13] Szilvássy László: Harci helikopterek fegyverei II. – Irányítható rakétafegyverzet, Repüléstudományi Közlemények XXII/1., p. online, 9 p., (2010) url: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2010_1/2010_1_Szilvassy_Laszlo.html

[14] Óvári Gyula, Papp István, Szilvássy László: Rakéta mozgásegyenletek, Hadmérnök X: (3) pp. 56–63. (2015) url: http://dr.sziszilaci.hu/pub/2015-42-Raketa_mozgasegyenletek.pdf

[15] Szilvássy László: Aviation anti-tank missile AT-16 "Scallion" (9A4172 "Vikhr") Repüléstudományi Közlemények XXVI./3., pp. 28–33 (2014) url: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2014_3/2014-3-03-0178_Szilvassy_Laszlo.pdf

[16] Papp István, Szilvássy László, Óvári Gyula: Derivation of the Fundamental Missile Guidance Equations AARMS Volume 14 Issue 4 pp. 341-348. (2015) url: http://uni-nke.hu/uploads/media_items/aarms-vol-14_-issue4_-2015.original.pdf

[17] Szilvássy László: Repülőfedélzeti irányítható páncéltörő rakéták és azok összehasonlítása, Repüléstudományi szemle 2016, ISBN 978-615-5057-70-0, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet 2016, pp. 151–176 url: http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2016.pdf

[18] Óvári Gyula: A Stealth repülőgépek szerkezeti kialakításának néhány kérdése Haditechnika 1991/4. pp. 3-7.

[19] Wikipedia – The Free Encyclopedia: AIM-54 Phoenix, e-dok; url: https://en.wikipedia.org/wiki/AIM-54_Phoenix

[20] Wikipedia – The Free Encyclopedia: R-33 (missile), e-dok; url: https://en.wikipedia.org/wiki/R-33_(missile)

[21] Wikipedia – The Free Encyclopedia: Kh-31 (missile), e-dok; url: https://en.wikipedia.org/wiki/Kh-31

[22] Wikipedia – The Free Encyclopedia: Meteor (missile), e-dok; url: https://en.wikipedia.org/wiki/Meteor_(missile)

[23] A szerző saját munkája

On-board Guided Missile

In my PhD dissertation, I deal with the modelling of aerodynamically controlled air to air missile. In order to replace a missile with a proper mathematical model, it is necessary to have complete knowledge of it. In this publication, I deal with grouping of manageable missiles, basic control procedures, aerodynamic construction of manageable missiles, the purpose of the equipment and the most frequently used missile engines.

Keywords: *on-board guided missile rocket motor missile guidance and control systems*

Papp István
tanársegéd
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Fedélzeti Rendszerek Tanszék
pappi@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-2929-5864

Papp István
Professor's assistant
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of On-Board Systems
pappi@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-2929-5864

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-18-0407-Papp_Istvan.pdf

Vránics Dávid Ferenc, Lovas Róbert, Kardos Péter, Bottyán Zsolt, Palik Mátyás

WRF[1] BENCHMARK MEASUREMENTS AND COST COMPARISON. VIRTUALIZED ENVIRONMENT VERSUS PHYSICAL HARDWARE

The authors performed Weather Research and Forecasting model benchmark measurements on a wide variety of computer platforms while keeping track of the associated costs. The test executions took place in cloud environments, on dedicated, physical servers and personal computers for reference. The unified measurement framework and the use of software container technology ensure the comparability of the results. The derived secondary data supports the planning of resources for the research project, and makes it possible to predict the required computing performance for later tasks during the research progress. The article details the setup and results of the measurements, while explaining the used technology and model. The results show that for smaller scale applications, cloud computing provides a less costly alternative to physical servers, while on a larger scale, usage of a dedicated physical server is advised.

Keywords: *WRF, benchmark, cost, cloud, container, hardware, comparison*

THE GOALS OF THE MEASUREMENT AND COMPARISON

„The Weather Research and Forecasting (WRF) Model is a next-generation mesoscale numerical weather prediction system designed for both atmospheric research and operational forecasting needs.” [1]

Our research subproject, codenamed “UAS_ENVIRON” under project “Increasing and integrating the interdisciplinary scientific potential relating to aviation safety into the international research network at the National University of Public Service - VOLARE” aims at providing a safe and reliable framework for flight support and control systems in case of unmanned aerial flight. One of the focal areas is the meteorological prediction of flight conditions and collection of weather data.

The precedents for this research include setting up a meteorological support system [2] and database [3] for UAVs[2]. Later on, a prototype setup of WRF and weather data collecting UAVs was successfully used for sounding the planetary boundary layer [4].

The current trends of computing technology indicate that cloud, virtualization together with container technologies are going to be the next wave of innovation at several application areas. Cloud providers offer the same performance at an ever cheaper price, while increasing the available rentable capacity. They usually even provide free trial for a limited time period, while renting and configuring a virtual server takes only a few clicks, then the server is ready to boot in even a couple minutes.

Our hypothesis is that there is a point, until a well-scaling distributed application – such as a WRF instance – is cheaper to run in cloud environment, than obtaining, configuring and maintaining a physical server of similar configuration. For the cost estimations, we assume a 3-year

[1] Weather Research and Forecasting
[2] Unmanned Aerial Vehicles

computer system lifetime, and the same contract period for clouds as for physical servers, since it is obviously not feasible to buy and configure the hardware just for a one hour measurement.

The performance data presented in this article is measured on the actual systems described in the later chapters.

WRF BENCHMARK METRICS

The output of the benchmark script lists the most important metrics measured, for example:

```
items:      149
max:        26.893060
min:        2.911170
sum:        495.158710
mean:       3.323213
mean/max:   0.123571
```

The *item* count is the number of time steps processed. *Max* and *min* represent the maximum and minimum time in seconds taken by processing a time step, while *sum* represents the total processing time of all items. The average time per time step is represented by the *mean* value. This is the sum divided by the item number.

Additionally, the average GigaFLOPS value[3] can be determined by dividing the total operation count value of the benchmark – defined in billion floating point operations – by the mean value.

Simulation speed is the ratio of the model time step to the measured average time per time step.

The most significant metrics are the mean and the sum. As the item count is constant through our measurements, we will use the sum value for representation of performance [5].

MEASUREMENT SETUP

Docker concept

Docker is the world's leading open-source software container platform [6]. It simplifies software dependency handling, and ensures portability between different hardware, platforms, operating systems and architectures while supporting secure and agile deployment of new features.

For the purposes of benchmark measurement and the follow-up result comparison, the most important factor is portability, which simplifies setting up the environment on a wide variety of host machines in physical and cloud environments.

Docker images encapsulate environment settings and implement software dependencies (e.g. binaries and libraries) through inheriting other images. Figure 1 presents a comparison between traditional operating system virtualization and Docker software container technology. Docker also provides a simple command line interface to manage, download (pull) and create new images by Docker engine but further sophisticated tools are also available for complex, workflow-oriented and

[3] Billion floating point operations per second

orchestrated usage scenarios, such as the Occopus cloud and container orchestrator tool [7].

A related work on performance measurement compares high performance computing resources in cloud and physical environment, with and without utilizing the Docker software container technology [8]. The results show that the performance loss caused by the utilization of Docker is 5-10%, negligible compared to the 10-15× improvement in deployment time. The comparison shows that the expected performance of cloud resources is slightly lower than the performance of physical systems.

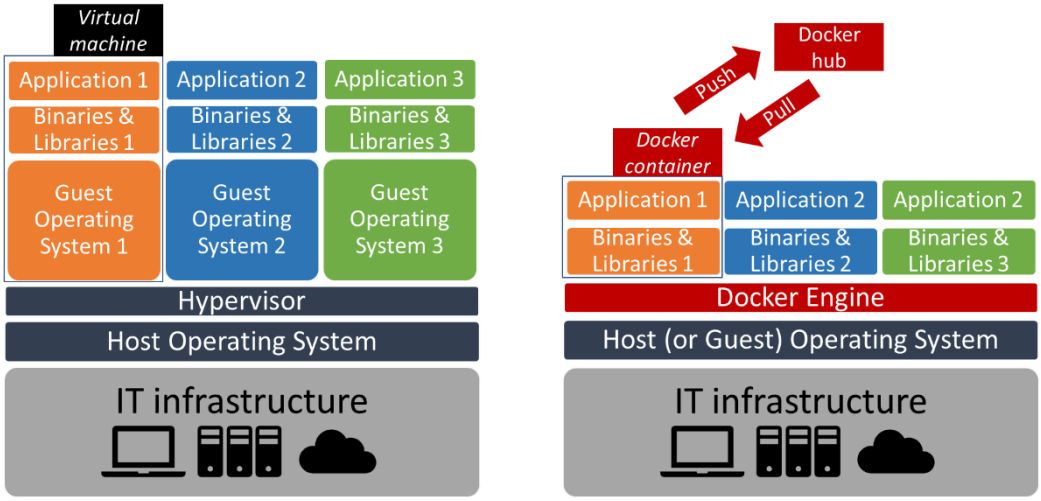


Figure 1. Comparison of traditional operating system virtualization with Docker software container technology including Docker hub for publishing and storing images (figure is the authors' own work)

Actual Docker image setup

Our Docker image contains WRF version 3.7.1 (August 14, 2015), compiled with gcc version 5.3.1 20160413 (Ubuntu 5.3.1-14ubuntu2.1), based on operating system Ubuntu 16.04 LTS. The prepared image is available on the official Docker hub as *andrewid/wrf_benchmark*.

WRF setup

A benchmark setup is used to measure and compare performance of systems based on a common indicator. To ensure comparability, the same WRF input and parameters are used. The indicator is usually derived from the execution time of the benchmark.

The WRF setup for this benchmark consists of a 48-hour forecast time, 12 km horizontal resolution on a 425 by 300 grid with 35 vertical levels case over the Continental U.S. (CONUS) domain on October 24, 2001 with 72 seconds model time step. The time period for the actual benchmark measurement is 3 hours, starting from October 25, 2001 00Z. This input data is available online. [9]

The actual item count is 150 in the benchmark, but the first one is discarded because it contains initialization and input/output operations [5].

The measured operation count for this benchmark is 30.1 billion floating point operations.

Machine setup

Docker ensures the portability between hosts. WRF version, compiler and its version is identical through the benchmarked machines.

A system is a specific instance of a platform. For example, based on Windows platform, different systems can be set up which differ in operating system versions, available number of cores or memory.

The most notable parameters of a system are the following:

1. name of system (product name, hostname, institution);
2. operating system and version;
3. processor: manufacturer, type and speed; include cache sizes if known;
4. cores per socket and sockets per node;
5. main memory per core;
6. interconnect: type (e.g. Infiniband, Gigabit Ethernet), product name, and network topology (if known) [5].

During the measurements, the following computer systems were examined:

Name of system	OS and version	Processor	Cores	Main memory	Other relevant information	Price in EUR/hrs
Google Cloud	CentOs 7.3	vCPU (VM instance)	8*, 16, 18*, 20*, 22*, 24* cores	32 GB	5 measurements and pricing on 16 CPU, only 1 on 8, 18, 20, 22, 24	0.472
MTA Cloud (SZTAKI & Wigner)		vCPU / Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2640 v3 @ 2.60 GHz	2, 4, 8 cores	8 GB	m1.xlarge, KVM, currently free, pricing to be determined	0.000
Microsoft Azure F4S*	CentOs 7.3	vCPU (VM instance)	4 cores	2 GB/core	F4S type VM, local SSD	0.210
Microsoft Azure DS3-V2	CentOs 7.3	vCPU (VM instance)	4 cores	3.5 GB/core	DS3_V2 type VM, local SSD	0.310
Scaleway bare metal*		Intel(R) Atom(TM) CPU C2550 @ 2.40 GHz	4 cores (dedicated)	2 GB/core	C2S (only one measurement, no significant difference from VM)	0.024
Scaleway virtual machine		vCPU / Intel(R) Atom(TM) CPU C2750 @ 2.40 GHz	4 cores	1 GB/core	VC1M type VM	0.012
Dell Latitude E6540	Ubuntu 14.04.5	Intel(R) Core(TM) i7-4600M CPU @ 2.90 GHz, 4096 KB L3 cache, HT	2 core/1 socket (4 core with HT)	4 GB/core DDR3	2000 EUR price with 3 years factory warranty as expected lifetime => 0.076 EUR/hrs; 0,14362 kWh adapter consumption, ~40 HUF/kWh = 0.130 EUR/kWh => 0.019 EUR/hrs power; server room, networking,	0.095

Name of system	OS and version	Processor	Cores	Main memory	Other relevant information	Price in EUR/hrs
					maintenance not included, it is an off-the-shelf laptop	
Meteor24*		Intel Xeon E5645 (HT enabled) @ 2.40 GHz	6 core/2 socket (12 core with HT/socket = 24 core)			No estimate
Home PC*		Intel i7-4500U (HT enabled) @ 1.80 GHz	2 core/1 socket (4 core with HT)			No estimate
Cloud.hu X5670*		Intel Xeon E5670 @ 2.93 GHz	16 cores		52 HUF/hrs	0.168
Cloud.hu X5650*		Intel Xeon E5650 @ 2.67 GHz	8, 16 cores		35 HUF/hrs, 52 HUF/hrs	0.168
Server with 4xE7-4870*		Intel Xeon E7-4870 @ 2.4 GHz (HT enabled)	10 cores/4 socket (80 cores with HT) max; 20, 40, 44 tested			No estimate
RackForest 2xE5-2620v4*		Intel Xeon E5-2620v4 @ 2.1 GHz (HT enabled)	8, 16 cores (16, 32 cores with HT)	16 GB	61,595 HUF/mon, 730 hrs/mon, 309 HUF=1 EUR	0.273
RackForest 1xE3-1230v5*		Intel Xeon E3-1230v5 @ 3.40 GHz (HT enabled)	4 cores (8 cores with HT)	8 GB	33,655 HUF/mon, 730 hrs/mon, 309 HUF=1 EUR	0.149

Table 1. Available data of tested computer systems and pricing

The first five columns of Table 1 describe the system setup, while the last two describe and estimate the Euro/hours maintenance cost on a three years' time period, if sufficient data is available.

Accuracy of measurement

In case of cloud infrastructures, the overprovisioning of resources and the multi-tenancy may cause unpredictable loads on the virtualized CPUs, network, etc. That is why the measurements have been repeated on such systems.

MEASUREMENT RESULTS

WRF Scalability

Our repeated test runs have shown, however, that the difference between the repeated measurements' results is non-significant, and the values are representing the actual system under test quite prominently. For example, in case of the 4 vCPU Scaleway machine, three consecutive results provided *16.517*, *16.530* and *16.523* as the *mean* value. Based on this experience, some measurements were not run repeatedly. These results are marked below with an asterisk (*) symbol and are only measured once.

The mean values from the repeated measurements were used in all the other cases.

System	max	min	sum	mean	mean/max
Google Cloud* (24 vCPU)	37.189	1.669	299.467	2.010	0.054
Google Cloud* (22 vCPU)	36.126	1.739	314.213	2.109	0.058
Google Cloud* (20 vCPU)	34.495	1.802	320.354	2.150	0.062
Google Cloud* (18 vCPU)	32.553	1.966	344.769	2.314	0.071
Google Cloud (16 vCPU)	37.247	2.126	386.162	2.592	0.070
Google Cloud* (8 vCPU)	40.477	3.353	590.536	3.963	0.098
Meteor24* (24 CPU)	7.474	4.900	763.965	5.127	0.686
MTA Sztaki (8 vCPU)	27.633	2.870	492.018	3.302	0.120
MTA Sztaki (4 vCPU)	34.626	5.027	902.782	6.059	0.175
MTA Sztaki (2 vCPU)	38.675	8.799	1479.297	9.928	0.257
MS Azure DS3-V2 (4 vCPU)	53.195	5.525	935.723	6.280	0.118
MS Azure F4S* (4 vCPU)	52.330	5.452	918.367	6.164	0.118
Dell Latitude E6540 4 CPU	54.299	5.746	963.313	6.465	0.119
Dell Latitude E6540 3 CPU	56.459	6.538	1131.684	7.595	0.135
Dell Latitude E6540 2 CPU	59.800	7.096	1180.622	7.924	0.133
Dell Latitude E6540 1 CPU	50.983	11.764	1906.052	12.792	0.251
Home PC* (4 CPU)	37.673	9.009	1551.132	10.410	0.276
Scaleway* (4 CPU)	67.352	15.248	2490.115	16.712	0.248
Scaleway (4 vCPU)	66.261	15.025	2461.995	16.523	0.249
Cloud.hu X5670* (16 vCPU)	16.986	3.664	667.207	4.478	0.264
Cloud.hu X5650* (16 vCPU)	38.476	4.905	841.519	5.648	0.147
Cloud.hu X5650* (8 vCPU)	33.485	7.426	1265.526	8.493	0.254
Server with 4xE7-4870* (44 core)	2.926	1.550	254.659	1.709	0.584
Server with 4xE7-4870* (40 core)	24.358	1.614	284.540	1.910	0.078
Server with 4xE7-4870* (20 core)	22.752	2.545	430.434	2.889	0.127
RackForest with 2xE5-2620v4* (32 core)	20.338	1.166	204.863	1.375	0.068
RackForest with 2xE5-2620v4* (16 core)	15.986	2.036	342.232	2.297	0.144
RackForest with 1xE3-1230v5* (8 core)	24.411	4.815	762.793	5.119	0.210

Table 2. WRF performance data

The *sum* values and *core (thread) numbers* are represented on the following chart for each system of Table 1, with the core numbers specified and values measured in Table 2.

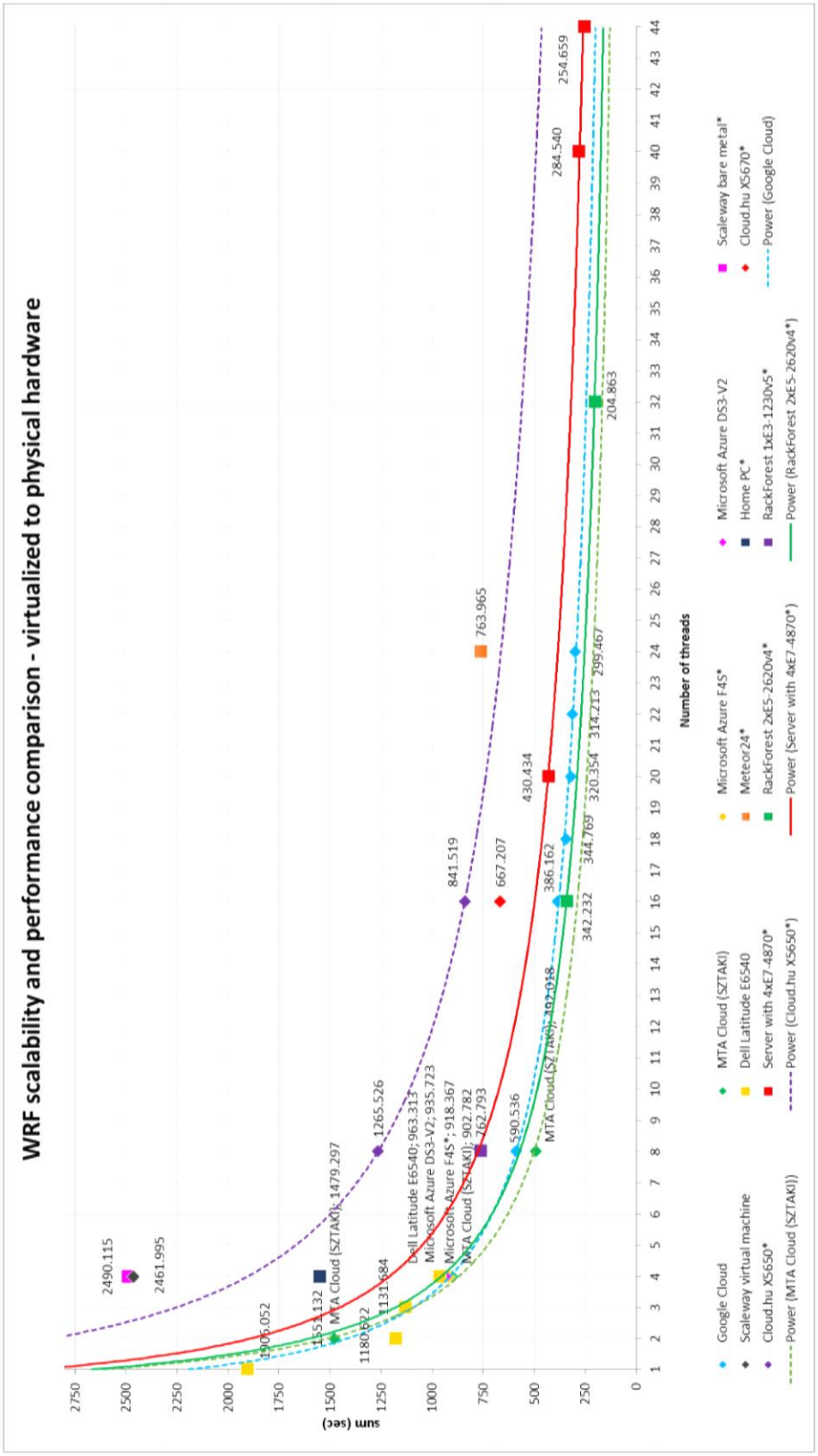


Figure 2. WRF performance data

The performance characteristics are showing a nearly hyperbolic pattern. As the diagram is representing the sum value in seconds on the *y* axis instead of simulation speed or GFLOP/second value, a hyperbolic function is interpolated onto the points instead of a logarithmic one, as

they are expected to never have a coordinate with $y \leq 0.0$. That would mean the test was executed in 0.0 or less seconds. The hyperbolic function is represented with a solid line in case of physical servers, and with a dashed line in case of virtual servers.

The measured data shows some odd values that may need some explanation.

The Scaleway machines have shown a significantly lower performance than the others. The main reason for this is that these machines utilize Intel Atom CPUs, which sacrifice computing performance for better, lower energy consumption.

The measurement of the Dell notebook shows an odd curve between the 1 to 4 core values, a higher 2-core or lower 3-core value would be expected to match the expected trend. This may be WRF code specific, as 7 different runs on this same machine followed the same pattern.

Figure 2 shows the hyperbolic trend lines stretched onto the measured points.

More data and diagrams can be found on the benchmark website's results page. [10]

Physical hardware versus virtual hardware performance comparison

The results also show that virtualized services keep up with the physical competition in sense of performance and scalability.

Figure 2 displays physical server data with "■" symbols, while virtual servers are represented with "♦" symbols. The trend lines show that some cloud service providers (dashed trend lines) perform just slightly worse than physical servers (solid trend lines), some were even measured as performing better. The Scaleway bare metal versus virtual machine 4-core data shows that the virtual machine performed even slightly better than the close-physical counterpart.

The 4-core notebook and desktop PC data sits between the performance trends of two measured cloud providers, while multiple cloud providers are extremely close, just slightly faster than them in case of 4-core measurements.

Cost comparison of cloud service providers and physical hardware

In 2014, the Wigner Data Center and the Institute for Computer Science and Control (SZTAKI) initiated the MTA Cloud project together as a joint effort to establish a federated community Cloud for supporting the research activities of the further mostly non-IT specialized member institutes of the Hungarian Academy of Sciences. The recently (Q2/2016) opened OpenStack and Docker container based cloud infrastructure combines resources from Wigner and SZTAKI relying on the nationwide academic internet backbone and other federated services, e.g. eduGain and HEXXA for authentication and authorization. The total capacity of the two deployed cloud sites is 1160 virtualized CPU cores with 3.3 TB memory and 564 TB storage facility (to be extended in 2017). Currently, there is no charge for the MTA Cloud users but a special payment model is to be introduced soon. The cost comparison charts show MTA Cloud with 0.0 cost because of this. The following chart is based on the values in Table 1.

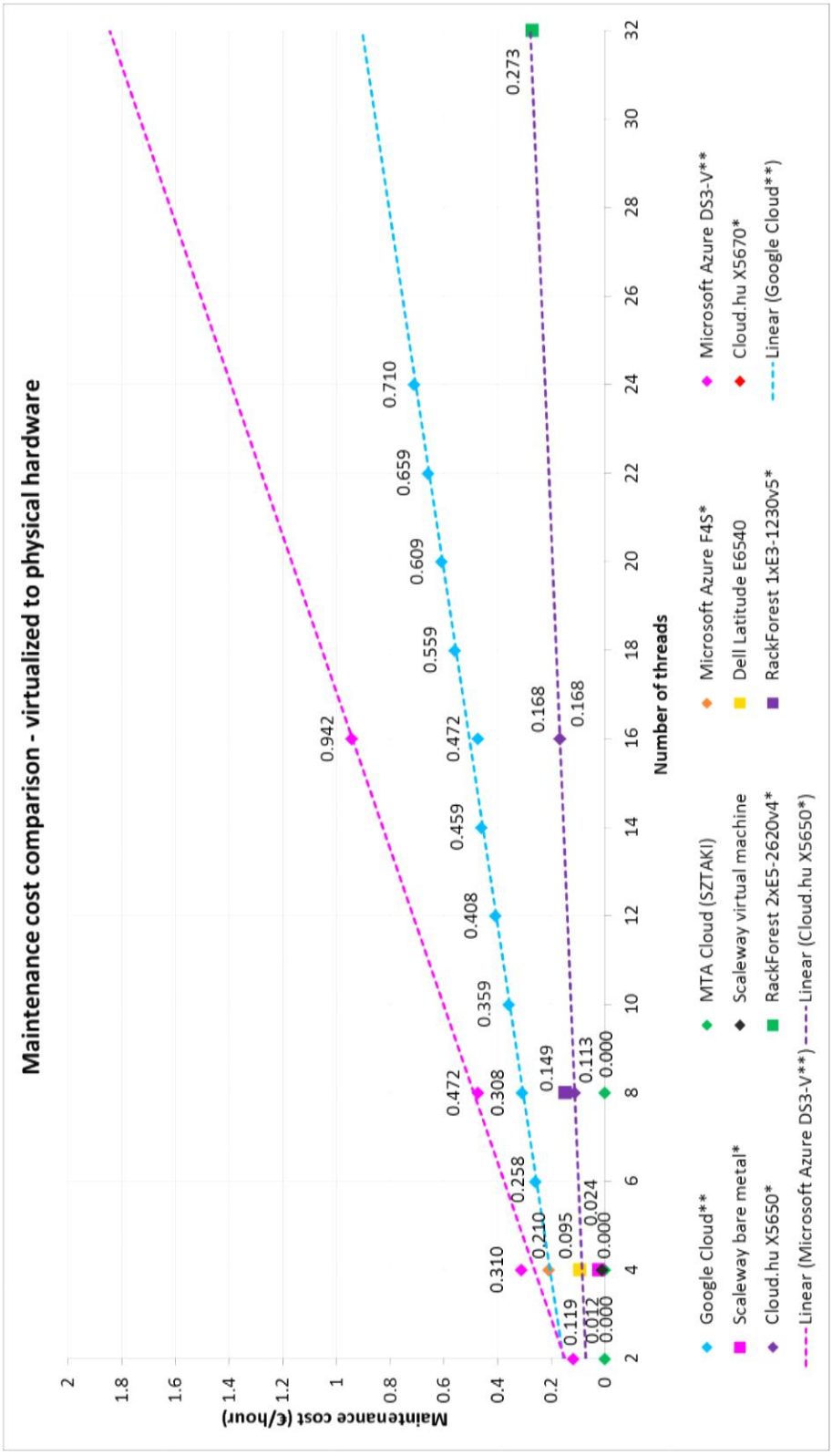


Figure 3. Maintenance cost values

For this diagram, the "*" still indicates that a host was only measured once. However, "**" means that some cost data are not the representing the actual cost experienced during the measurements, but are offered configurations/packages from the provider. These are present just to indicate the cost trend (which is linear, based on the data), and are omitted from the later results, as they do not

have actual performance measurements related. The actual values are off the trend on this diagram for Microsoft Azure DS3-V, which includes extra price for storage, and for Google Cloud, where the configuration had a discount at the time compared to the online prices.

In case of cloud service providers, the maintenance cost is very straightforward to calculate, they usually charge for their services in a per-hour or per-month basis.

Physical server maintenance costs, however, are much harder to estimate, because it includes varying factors like power consumption, heating-cooling of server rooms, unexpected break-down, and operator/administrator cost. While some of these factors can be used for calculation with their maximum values, the end result will still be a rough estimation. For this reason we do not provide cost data for the most unreliably estimable cases.

Some cloud providers, like Microsoft [11], Google [12] and Amazon [13] provide detailed TCO[4] calculators partly to cope with this problem, partly to show that cloud services are cheaper as a 3-year server investment. Our experience is that these calculators are not applicable directly for several countries (including Hungary) where e.g. the cost of labor force and electricity differ significantly from the US territories. Therefore, their results are not comparable because of such applied assumptions. For this reason we combined the performance measurement results with the hourly maintenance cost to determine the outcome of our hypothesis.

Combined results

Ultimately, based on the measured data, it is possible to calculate the cost (in Euro) of a computational unit (in TFLOP), using the following formula:

$$C_P = \frac{C_M * t_{sum}}{O} \tag{1}$$

Where C_P is performance cost, C_M is maintenance cost, t_{sum} is the measured total execution time, and O is the total floating point operation count.

If we multiply maintenance cost (which we have in Euro/hour, so we divided it by 3600 to bring it to Euro/seconds), with the measured sum value (which we indicated in seconds) then we get the actual cost of the benchmark run in Euro.

As noted on the WRF benchmark homepage [5], the measured operation count for this benchmark is 30.1 GFLOP. If we divide the calculated Euro cost for a benchmark run by this value, we will get the cost for a GFLOP in case of WRF in Euro/GFLOP.

These values are then converted to Euro/TFLOP by multiplying them with 1000 for the sake of human-readability.

[4]Total Cost of Ownership



Figure 4. Performance cost values

Figure 4 visualizes the values from Table 3. For each thread number, the lowest value is the cheapest; meaning it costs less to run the same WRF model with the same parameters on a computer system that is closer to 0.0 on the *y* axis than the ones above it.

Note again, that MTA Cloud does not have a comprehensive and final payment model yet,

therefore its cost is still 0.0 on the diagram.

System / number of threads	2	4	8	16	18	20	22	24	32
Google Cloud			1.677	1.683	1.780	1.879	1.913	1.970	
MTA Cloud (SZTAKI)	0.000	0.000	0.000						
Microsoft Azure F4S*		1.780							
Microsoft Azure DS3-V2		2.677							
Scaleway bare metal*		0.552							
Scaleway virtual machine		0.273							
Dell Latitude E654		0.842							
Cloud.hu X567*				1.363					
Cloud.hu X565*			1.323	1.380					
RackForest 2xE5-262v4*									0.516
RackForest 1xE3-123v5*			1.528						

Table 3. Performance and cost combined, €/TFLOP

An interesting finding is that the Scaleway performance was the worst measured, but still because of the extremely low pricing it is the most cost effective system to run WRF instances on 4 threads. This may be possible because of the relatively low power consumption of the Intel Atom processors, and the aggressive pricing strategy of Scaleway.

The Microsoft Azure solutions however prove to be the costliest, most probably because of their grade of additional services and built-in (but actually not used) support costs.

In between these values sits the business-grade Dell notebook, its estimated cost only contains the one-time hardware price (3-year warranty included) and the maximum power consumption. Other costs are excluded from the estimation, as it is an off-the-shelf notebook.

8-thread values show that the 8-core RackForest physical server is between Google Cloud and Cloud.hu performance cost.

Two 16-core configurations on Cloud.hu are very close to each other, while Google Cloud is costlier. It is also showing an increasing trend in performance cost with more cores.

The 32-cores RackForest data shows that with so many parallel threads it is still expected to be less expensive to rent an actual physical server than to contract a cloud provider for a virtual machine with a similar configuration.

Related works

Grid computing can be considered as a predecessor of cloud computing from several aspects, and WRF modelling has been benchmarked on Grid computing platforms, including the German D-GRID infrastructure, before the rising of cloud computing and container based platforms in the area of high-performance applications. [14]

Later some other widespread cloud computing platform have been investigated, including Amazon, but these studies focused particularly on multi-VM and MPI executions of WRF. [15][16]

Docker container and partly the Amazon (EC2) based execution of WRF models have been already investigated by NCAR in order to avoid software dependencies, to improve education and research activities, and also to allow the reproducibility of simulations. [17]

However, the related works did not provide detailed benchmark results focusing on cost factors

on various (mostly cloud based) platforms, and they covered only the most prominent Grid and cloud providers. Our studies attempted to overcome on these limitations, and involved computational resources e.g. from different European cloud providers (such as Scaleway, Cloud.hu, and MTA Cloud) and cost analysis as well.

Beside this project, more than 20 research teams have started utilizing the MTA Cloud in 2016 with no or little experiences with advanced cloud usage scenarios such as multi-VM deployment. The presented Docker based WRF simulation together with its benchmark serves as a valuable use case for the further development of SZTAKI's Occopus cloud and container orchestrator tool [7] as a part of MTA Cloud.

CONCLUSION

The measurements were successfully executed and evaluated on multiple hosts, making it possible to compare and publish the results with precisely estimated cost in most cases.

Our hypothesis stands: for less threaded or short, occasional measurements the cloud service providers usually offer the same WRF performance at lower costs, while for higher scaled scenarios, physical servers are the less costly option if we assume continuous, and long-term load on them. For example, in case of 4 threaded measurements, the cost of performance for a laptop is around four times more expensive compared to the service of the cheapest commercial cloud provider. Meanwhile, based on the trends in case of 32 core measurements, the cost of performance for a physical server is expected to be 4-5× less costly compared to the cloud providers.

Still, the actual point where we can say that the cost advantage turns from virtualized to physical hardware would be very hard to determine. This is due to the varying factors during the measurements and the limited or missing cost data for some hosts.

The Docker setup is already reused during our latest research with different WRF cases, the results and cost estimation may also be interesting to other meteorological research projects that are using applications similar to WRF for modeling weather.

REFERENCES

[1] The Weather Research & Forecasting Model, http://www.wrf-model.org/index.php (22.03.2017.)

[2] Hadobács K., Vidnyánszky Z., Bottyán Zs., Wantuch F., Tuba Z.: A pilóta nélküli légijárművek meteorológiai támogató rendszerének kialakítása és alkalmazhatóságának bemutatása esettanulmányokon keresztül. *Repüléstudományi Közlemények*, XXV 2 (2013), 405–421.

[3] Bottyán Zs., Wantuch F., Tuba Z., Hadobács K., Jámbor K.: Repülésmeteorológiai klíma adatbázis kialakítása az UAV–k komplex meteorológiai támogató rendszeréhez. *Repüléstudományi Közlemények*, XXIV 3 (2012), 11–28.

[4] Szabó Z., Istenes Z., Gyöngyösi Z., Bottyán Zs., Weidinger T., Balczó M.: A planetáris határréteg szondázása pilótanélküli repülő eszközzel (UAV). *Repüléstudományi Közlemények*, XXV 2 (2013), 422–434.

[5] WRF V3 Parallel Benchmark Page, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/benchv3/ (22.03.2017.)

[6] Mouat, A.: *Using Docker: Developing and Deploying Software with Containers*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2015.

[7] Kacsuk P., Kecskeméti G., Kertész A., Németh Zs., Kovács J., Farkas Z.: Infrastructure Aware Scientific Workflows and Infrastructure Aware Workflow Managers. *Science Gateways. Journal of Grid Computing,* 14 (2016), 641.

[8] Muhtaroglu, N., Kolcu, B., Ari, I.: Testing Performance of Application Containers in the Cloud with HPC Loads, in Iványi, P., Topping, B. H. V., Várady, G. (Editors), *Proceedings of the Fifth International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering*. Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, Paper 17, 2017. doi:10.4203/ccp.111.17

[9] conus12km_data_v3, http://www2.mmm.ucar.edu/WG2bench/conus12km_data_v3 (22.03.2017.)

[10] WRF 12 Kilometer CONUS Benchmarks, http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/WG2/benchv3/12KM_Results_20100414percore.htm (22.03.2017.)

[11] Total Cost of Ownership (TCO) Calculator PREVIEW, https://www.tco.microsoft.com/ (22.03.2017.)

[12] TCO Pricing Calculator, https://cloud.google.com/pricing/tco/ (22.03.2017.)

[13] AWS Total Cost of Ownership (TCO) Calculator, https://awstcocalculator.com/ (22.03.2017.)

[14] Ploski, J., Scherp, G., Petroliagkis, T., Hasselbring, W.: Grid-based deployment and performance measurement of the Weather Research & Forecasting model. *Future Generation Computer Systems,* 25 3 (2009), 346–350.

[15] Fenn, M., Holmes, J., Nucciarone, J.: A Performance and Cost Analysis of the Amazon Elastic Compute Cloud (EC2) Cluster Compute Instance. White Paper, 10 Aug 2010.

[16] Duran-Limon, H. A., Flores-Contreras, J., Parlavantzas, N., Zhao, M., Meulenert-Peña, A.: Efficient execution of the WRF model and other HPC applications in the cloud. *Earth Science Informatics*, 9 (2016), 365.

[17] Hacker, J., Exby, J., Gill, D., Jimenez, I., Maltzahn, C., See, T., Mullendore, G., Fossel, K.: A containerized mesoscale model and analysis toolkit to accelerate classroom learning, collaborative research, and uncertainty quantification. *Bulletin of the American Meteorological Society,* 2016. (in press)

WRF ÖSSZEHASONLÍTÓ MÉRÉSEK A TELJESÍTMÉNY ÉS KÖLTSÉG FÜGGVÉNYÉBEN VIRTUALIZÁLT ILLETVE FIZIKAI HARDVEREK ESETÉN

A szerzők számítógépes rendszerek széles palettáján végeztek teljesítménymméréseket az időjárás kutató és előrejelző (WRF) modell használatával, miközben a kapcsolódó költségeket is nyomon követték. A tesztesetek lefuttatására felhő környezetben és dedikált fizikai kiszolgálókon, illetve viszonyításként személyi számítógépeken is sor került. Egységes mérési keretrendszer és a szoftver konténer technológia alkalmazása biztosítja az eredmények összevethetőségét. A származtatott eredmények segítik a kutató projekt erőforrásainak tervezését, illetve lehetővé teszik a későbbi feladatokhoz szükséges számítási kapacitás becslését. A cikk részletezi az alkalmazott beállításokat és kapott eredményeket, miközben kitér az alkalmazott technológia és modell sajátosságaira. Az eredmények fényében azt mondhatjuk, kevesebb párhuzamos szál esetén inkább megéri felhőszolgáltatást bérelni, míg több párhuzamos szál esetén érdemes dedikált fizikai szervert fenntartani.

Kulcsszavak: *WRF, teljesítménymérés, költség, felhő, konténer, hardver, összehasonlítás*

Vránics Dávid Ferenc (MSc) doktoranduszhallgató, informatikus Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola Biztonságtechnika kutatásterület vranicsd@gmail.com orcid.org/0000-0003-0637-476X	Vránics Dávid Ferenc (MSc) PhD Student, computer scientist National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering Security Technology vranicsd@gmail.com orcid.org/0000-0003-0637-476X
Lovas Róbert (PhD) tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet robert.lovas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-9409-2855	Lovas Róbert (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control robert.lovas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-9409-2855
Kardos Péter (MSc) részlegvezető, meteorológus Hungarocontrol Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. Repülőtéri Meteorológiai Részleg Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102	Kardos Péter (MSc) Head of unit, meteorologist Hungarocontrol Hungarian Air Navigation ServicesLtd. Aerodrome Meteorological Unit Peter.Kardos@hungarocontrol.hu orcid.org/0000-0001-8857-4102
Bottyán Zsolt (PhD) egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék bottyan.zsolt@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-0729-2774	Bottyán Zsolt (PhD) Associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aerospace Controller and Pilot Training bottyan.zsolt@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-0729-2774
Palik Mátyás (PhD) intézetigazgató, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet palik.matyas@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2304-372X	Palik Mátyás (PhD) Director of institute, associate professor National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation palik.matyas@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2304-372X

This work was supported by the European Regional Development Fund (GINOP 2.3.2-15-2016-00007, "Increasing and integrating the interdisciplinary scientific potential relating to aviation safety into the international research network at the National University of Public Service - VOLARE"). On behalf of Project VOLARE we thank for the usage of MTA Cloud (https://cloud.mta.hu/) that significantly helped us achieving the results published in this paper. The project was realised through the assistance of the European Union, and co-financed by the European Regional Development Fund.



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-19-0400_Vranics_David_Ferenc_et_al.pdf

Hollandi Marcell, Kutrovácz Lajos, Simon Sándor

PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP GYÁRTÁSA

A közelmúltban komoly fejlődésnek indult a pilóta nélküli légijárművek különböző célú felhasználása. Jelen közleményben bemutatásra kerül egy új fejlesztésű többcélú pilóta nélküli repülőgép. A cikk röviden ismerteti a repülőgép fontosabb jellemzőit, lehetséges felhasználási módjait, feladatköreit. Foglalkozunk a pilóta nélküli repülőgép gyártásában alkalmazott gyártási technológiák ismertetésével, a kifejlesztett pilóta nélküli repülőgép gyártásának tervezésével, a gyártandó darabszám függvényében alkalmazandó gyártási technológia kiválasztásával. A kompozit alkatrészek felépítése és a gyártásukhoz szükséges szerszámok tervezése is részletesen ismertetésre kerül. Foglalkozunk a repülőgép szerelésének tervezésével, ütemezésével és a gyártási költségek elemzésével.

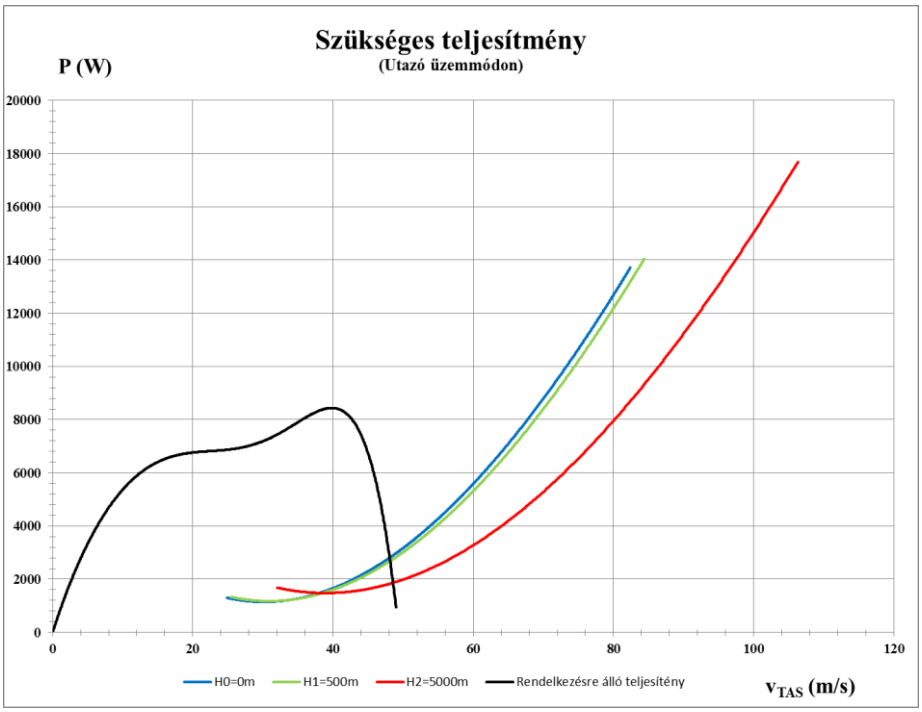
Kulcsszavak: *Pilóta nélküli repülőgép, feladatkörök, kompozit, szerszámok, gyártás tervezés, költségelemzés,*

A TERVEZETT PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP BEMUTATÁSA

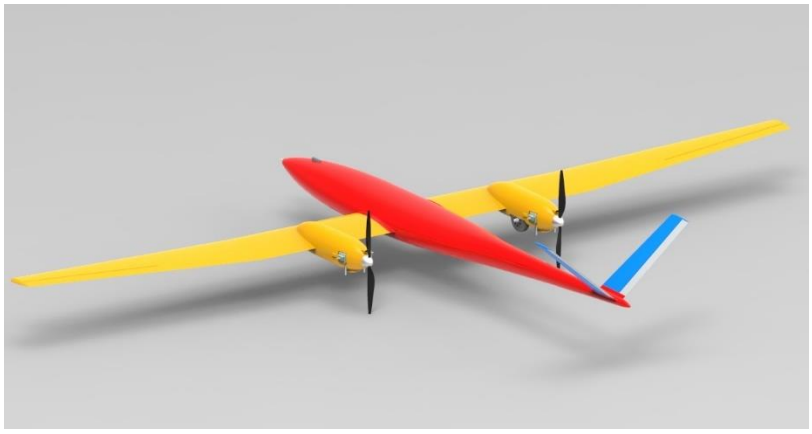
Napjainkban az élet elképzelhetetlen lenne repülés nélkül, megjelenésétől és fejlődésétől fogva csökkentek a távolságok, fellendítette a kereskedelmet, és döntő szerepe van a 20. és 21. század fegyveres konfliktusaiban. Kevesen tudják azonban, hogy a repülés hajnalától kezdve a légijárműveket nem csak emberek vezették, hanem úgynevezett robotpilóták is. Az utóbbiakat nevezzük pilóta nélküli légijárműveknek, vagy ismertebb nevükön drónoknak. Bár csaknem egyidősek pilóta által vezetett légijárművekkel, igazán csak a 20. század második felében terjedtek el. Manapság pedig már mindenki tarthat ilyen eszközöket és repülhet vele akár a lakásában, otthonában is. A történelmük során bizonyították képességeiket, alkalmazhatóságukat és sokoldalúságukat. A századfordulóig csak a harctereken bizonyítottak, napjainkban viszont már a civil szférában is kezdenek elterjedni. Ebben a cikkben az utóbbi oldalt szeretnénk erősíteni, és megmutatni, hogyan könnyíthetik meg a mindennapi életet a pilóta nélküli légijárművek.

A tervezett repülőgép szerkezete

A bemutatásra kerülő HMX-16B-04 típusú repülőgép egy polgári többcélú pilóta nélküli légijármű. A tervezés során több koncepció terv is készült, melyeket különböző szempontok alapján hasonlítottunk össze majd választottuk ki az többcélú felhasználhatóság szempontjából a legjobbat. A repülőgép repülési tulajdonságait aerodinamikai számításokkal ellenőriztük a koncepció tervezés, és a részletes kidolgozás szakaszában egyaránt. Az aerodinamikai számítások bemutatására jelen mű keretein belül nincs lehetőség, azokat az olvasó az [1] számú irodalomban láthatja részletesen kidolgozva. A repülőgép Penaud diagramja az 1. ábrán látható A tervezés során törekedtünk minél egyszerűbben gyártható szerkezetet tervezni. A repülőgép 3D modellje az 2. ábrán látható.



1. ábra A repülőgép szükséges teljesítmény diagramja



2. ábra HMX-16B-04

A repülőgép, kialakítását tekintve: hagyományos elrendezésű, úgynevezett pillangó vezérsíkos középszárnyas, dugattyús toló motoros, orr futóműves szerkezet. Jellegzetessége a törzsben kialakított raktér, nyitható kamra ajtókkal. A raktérben a feladatnak megfelelő hasznos teher helyezhető el. A szállítható hasznos teher tömege teljesen feltöltött repülőgép esetén 20–25 kg.

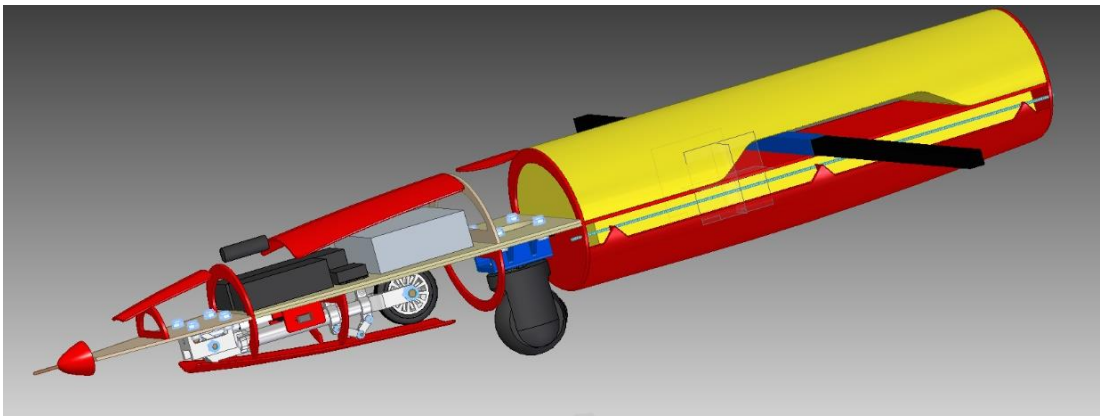
A repülőgép a következő feladatkörökben alkalmazható:

- térképészet;
- mezőgazdaság (vadkárok felmérése, termés vizsgálata, vetőmag bombázás);
- erdészet, mezőőrség;
- ipari vezetékek felügyelete;
- eltűnt személy felkutatása;
- csomag szállítás.

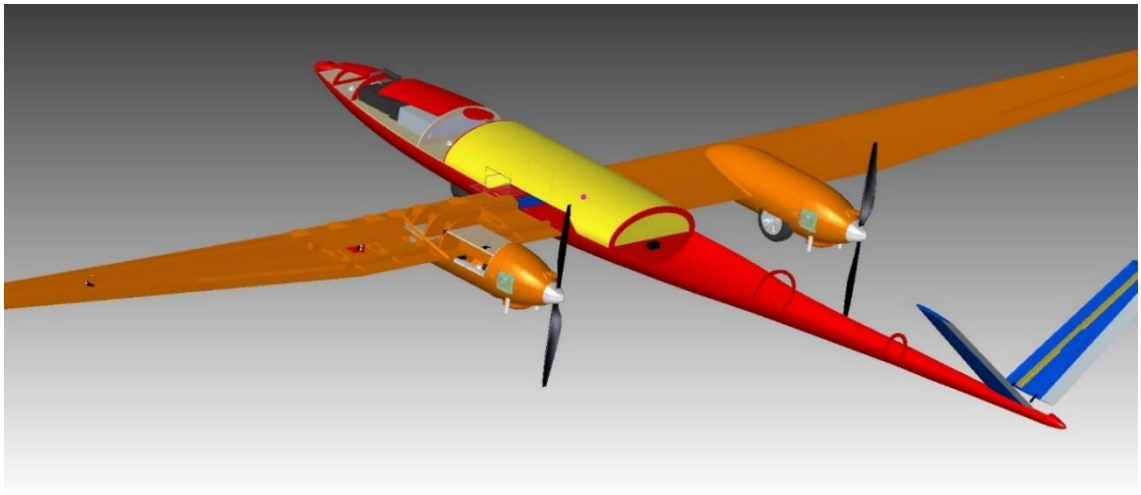
Hasznos teherként a raktérbe egy póttartály is behelyezhető, ezzel megduplázható a repülőgép hatótávolsága. A felszereltségét tekintve a repülőgép fedélzetén két kamera található. Az egyik

egy mereven előre néző csőkamera, ezt a pilóta használja amennyiben pilóta vezeti a légijárművet. A másik pedig a törzs alsó részén rögzített gimbal kamera, ezt az operátor használja a feladat függvényében. Az általunk tervezett légijármű képes az önálló repülésre, de a satcom modul segítségével a pilóta bármikor átveheti felette az irányítást.

A repülőgép kompozit héjszerkezet felépítésű. A következő fő részegységekből épül fel: törzs, szárny és vezérsíkok. A törzs elején található rekesz egy opcionálisan használható súlykamra, az elülső részben a súlykamra mellett található az akkumulátor, robotpilóta, satcom modul és a futómű vezérlő elektronika. A két előbb említett rekesz alatt található az orr futómű kamrája. A következő rekeszben található az üzemanyagtartály és ez alatt elválasztva a raktér. A törzs bordákkal merevített, amik az elektronikai berendezéseknél és az orr futómű bekötésénél sűrűbben helyezkednek el. A szárnyon találhatóak a hajtómű gondolák, melyekben a hajtómű bekötések mellett a fő futóművek is találhatóak. A fő futóművek a motorgondolába húzhatóak be. A szárny középső egyenes része bordákkal merevített, a bordák a hajtóműgondolák alatt a futómű bekötéseknél sűrűbben helyezkednek el. A szárnyon található a csűrőlap, amely ívelőlapként is funkcionál, valamint a féklap. A vezérsíkon található a magassági/oldalkormány. A repülőgép belső szerkezeti felépítése látható a 3. és 4. ábrákon.



3. ábra A törzs szerkezete



4. ábra A repülőgép szerkezete

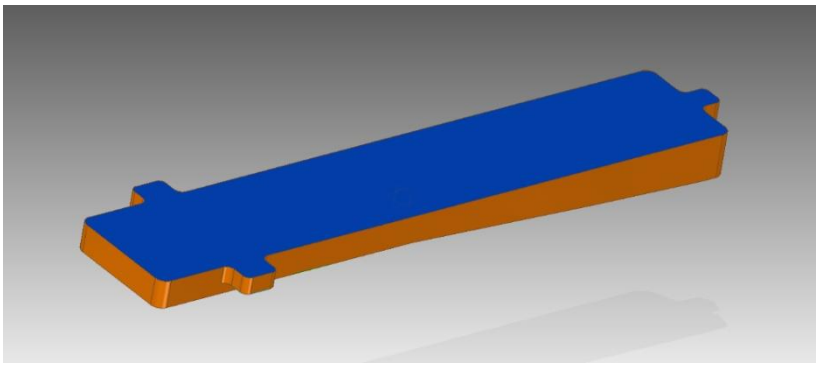
A repülőgép gyártásának tervezése

A repülőgép gyártásának tervezésekor meg kell határoznunk a gyártandó darabszámot, és fel kell mérnünk, hogy a rendelkezésre álló eszközökkel ez hogyan valósítható meg. Jelen kutatási feladat esetében feltételeztük, hogy a gyártóbázis a későbbiekben, a meghatározott igények szerint kerül kialakításra, tehát az én esetemben egy fikcionális gyártó üzemről van szó, eszköz oldalról csak a gazdaságosság jelent korlátot. A gyártandó darabszám tekintetében figyelembe vettük, hogy az ilyen eszközök polgári célú alkalmazása még nem elterjedt, de már a küszöbön van. A repülőgép tervezésénél a nemzetközi piacot céloztuk meg, mivel valószínűleg a nagyobb országokban fogják elsőként tömegesen alkalmazni a pilóta nélküli rendszereket a civil szférában. A repülőgép saját fejlesztésű, így a prototípus és a nullszériás gyártás során lehetőség nyílik a gyártástechnológia finomítására, és a tömeggyártásra való alkalmasságának vizsgálatára is. Ezek alapján a jelenleg vizsgálandó gyártáshoz a darabszámot két prototípus és nyolc nullszériás darabban határoztuk meg.

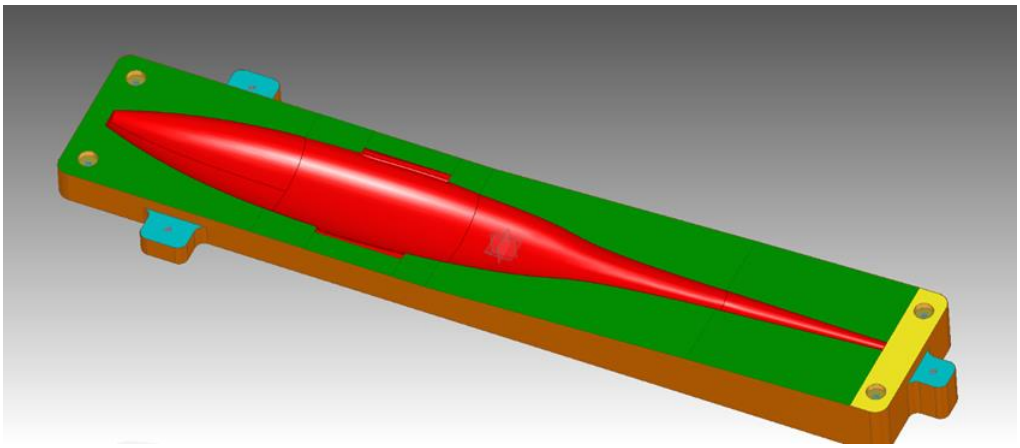
A kompozit alkatrészek gyártásához szükség van gyártó szerszámokra. A szerszámok tervezésénél törekedtünk arra, hogy a lehető legkisebb számú szerszámot kelljen legyártani, és ezek megmunkálhatóak legyenek a ma elérhető szerszámgépeken. A kompozit alkatrészek, elemek gyártásához szükséges szerszámok készülhetnek műfából, műgyantából és alumíniumból. Az első két anyag olcsóbb, és könnyebben megmunkálható, mint az alumínium, azonban az utóbbi időállóbb. A jövőbeni sorozatgyártás lehetőségét szem előtt tartva a szerszámok alapanyagául az alumíniumot választottuk. A szerszámok Solid Edge ST8 program segítségével kerültek megtervezésre, és az EdgeCam 2016 R2 megmunkáló programmal szimuláltuk a gyártásukat. A repülőgép szerszámban készülő elemei a következőek: törzs burkolat, szárny burkolat, motorgondola burkolat és a vezérsík burkolat. Az itt felsorolt elemek gyártásához általában két szerszám szükséges, egy alsó és egy felső. A gyártósablonok tartalmazzák a bennük gyártandó elem negatívját. A gyártás során törekednünk kell arra, hogy a szerszámnak ez a része tükörsima, polírozott legyen, különben a szerszámban lévő felületi hibák rámásolódnak az elkészült alkatrészre is. A szerszámoknak biztosítaniuk kell az ellendarabjukkal való „tökéletes” kapcsolódást is. Ezeknek az érintkező felületeknek is kiváló minőségűeknek kell lenniük, aminek a két szerszám egymásra fordításánál, összeillesztésénél van jelentősége. A szerszámoknak biztosítani kell az egymásra helyezhetőséget is, ezt a szerszámok méretőtől függően különböző módon oldható meg. A kisebb szerszámoknál a két szerszám felet csavarokkal lehet összeszorítani, és megfelelő illeszkedésüket kiüthető központosító csapokkal biztosítani. A nagyméretű szerszámok esetén a megfelelő illeszkedést fixen szerelhető csapokkal oldottuk meg, az összeszorító erőt pedig a szerszám tömege biztosítja. Ebből következik, hogy a nagy szerszámokat csak gépi erővel lehet mozgatni, ezért a szerszámokon gyűrűs csavarokat lehet rögzíteni az üzemi daruval történő mozgatáshoz. A repülőgép kompozit elemeinek gyártásához 26 szerszám szükséges. Valamennyi szerszám műveletelem sorrendje elkészült, de terjedelmi korlátok miatt a cikk további részében csak egy nagy és egy kisebb - reprezentatívnak tekinthető – szerszám példáján keresztül kerülnek bemutatásra a szerszámok gyártásához szükséges megmunkálási igény felmérések, a szükséges megmunkálási módok és azok sorrendjének meghatározása.

A törzs gyártó szerszáma

A nagyméretű szerszámok közül a törzs gyártószerszámát mutatjuk be. A szerszám kiinduló előgyártmánya egy 3955 mm × 1005 mm × 265[mm-es alumínium tömb. Az előgyártmányok anyaga ENAW 7021-T79 alumínium öntvény, melyet a kívánt méretűre darabolnak. A fűrészelés pontossága az Alu Cuttting Hungary Kft.-vel történő egyeztetés után: hosszúság +/-0,5 mm, szélesség ± 0,5 mm, magasság –0/+5 mm. A szerszámok két befogásban kerülnek megmunkálásra, az 5. és 6. ábrákon látható az első és második befogás szerint. A szerszámon az egyes felületeket különböző színek jelzik, ezek segítségével követhető a műveletelemek sorrendjét.



5. ábra A törzs alsó szerszáma az első befogás szerint

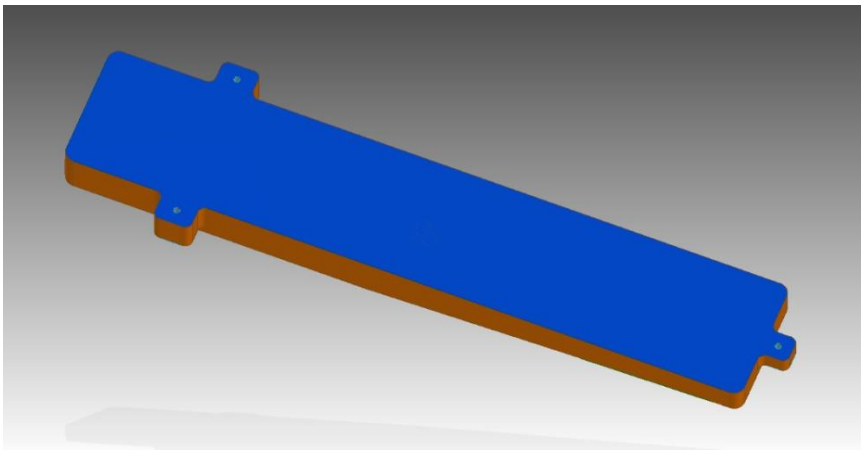


6. ábra A törzs alsó szerszáma a második befogás szerint

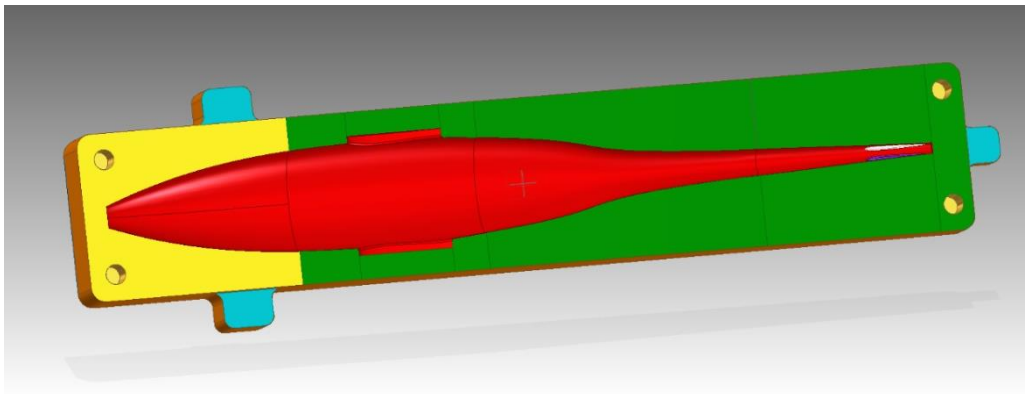
A munkadarabot a gépasztalon az asztalra rögzíthető készülékekkel kell pozícionálni az 5. ábrán látható első befogás szerint, hosszabbik oldalán ütköztetni, és az ütközőkre szorítani, felülről nem szükséges szorítani, mert a stabil fekvéséből és a tömegéből adódóan nem fog elmozdulni. A munkadarabot tehát először az első befogás szerint „fejjel lefelé” kell a munkaasztalra helyezni, majd először egy síkmarás következik, ezzel elkészül az ábrán sötétkékkel színezett felület. Ez a műveletelem a kész felületet adja, és simításnak felel meg, a célja csak a felületi szennyeződések és egyenetlenségek eltávolítása. Ezután következik a narancssárgával jelölt felületek megmunkálása, azonban a felületet ebben a befogásban nem munkáljuk meg teljes magasságában, csak annyira, hogy a következő befogáshoz elkészüljenek a készülékek számára a támasztó és szorító felületek. Tehát a felületen végrehajtandó műveletelemek a következőek: nagyolás adott magasságig, majd simítás adott magasságig. Ezután a munkadarabot át kell fordítani a második megfogás szerinti helyzetbe. Ebben az esetben a készülő szerszám már az

általunk megmunkált simított felületen fekszik fel a gépasztalra, és a részben simított oldalfelületein van megtámasztva. A következő műveletelem ismételten egy simító síkmarás, amellyel a 6. ábrán a sárgával jelölt felület készül el. A következő műveletelem a narancssárga és világoskék felületek nagyolása. Majd ez után következik a 6. ábrán zölddel, pirossal és arany színnel színezett felületek nagyolása. Ebben az esetben a zöld és piros felületek nagyolása egy úgynevezett teraszoló nagyolás. Megfelelő szerszám és fogásmélység meghatározásával a teraszok magasságát nem szükséges egy további teraszoló nagyolással csökkenteni. Az aranyszínű felület pedig a rögzítendő csap felfekvő felülete mivel ugyanabban a műveletelemben készül, mint a zöld és a piros felületek, így olyan szármarót kell választani, amely „Z” irányú előtolásra, forgácsolásra is képes. A következő művelet a narancssárga és világoskék felületek simítása és ezáltal készre munkálása, majd a zölddel jelölt felület simítása gömbmaróval és a zöld felület alsó sík részének simítása síkmaróval. Ezután az aranyszínű felületek simítása következik szármaróval, majd a piros felület simítása következik, amely a gyártandó törzs fél alakja. Ezt a felületet két lépésben profilozással kell megmunkálni, előbb egy 3 mm átmérőjű majd egy 1 [mm] átmérőjű gömbvégű maró segítségével. Ezután az aranyszínű, valamint a világoskék felületen található furatok megmunkálása következik: előfúrás, furatbővítés, simítás, majd menetmarás. Ezzel a törzs alsó szerszámának gépi megmunkálása befejeződött. A szerszámot a továbbiakban ellenőrizni kell, ha szükséges a képződött sorját el kell távolítani. Végül a kész munkadarab piros felületét polírozni kell.

A törzs felső szerszáma az első és második befogás szerint a 7. és 8. ábrákon látható.



7. ábra A törzs felső szerszáma az első befogás szerint

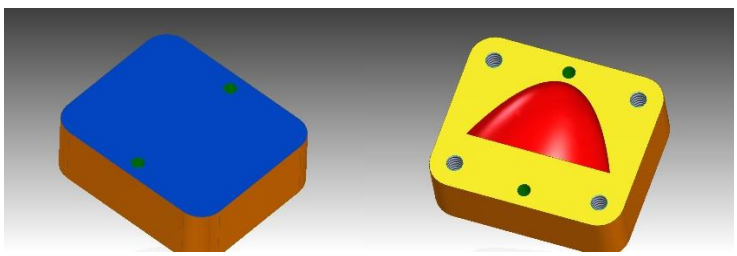


8. ábra A törzs felső szerszáma a második befogás szerint

Ennek a szerszámnak a megmunkálása már öt tengelyes megmunkáló gépet igényel a 8. ábrán lilával és fehérrel ábrázolt felületek miatt, melyek a vezérsíkok csatlakozó felületei. A kiinduló előgyártmány méretei, valamint a megmunkáló gépen való elhelyezésének módjai megegyeznek az alsó szerszám esetében ismertetettel. A szerszám megmunkálásához szükséges műveletelemek sorrendje az első befogás szerint a következőek. Az 7. ábrán kékkel jelölt felület síkmarása, majd a narancssárga felületek nagyolása adott mélységig, ezek után ugyanakkora mélységig ugyanezen felületek simítása. Ezután kerülhet sor a kék felületen látható furatok elkészítésére, ennek menete a következő: központozás, előfúrás, furat bővítése, majd menetmarás. A második befogásban elvégzendő műveletelemek sorrendje a következő módon alakul. A 8. ábrán látható narancssárga és világoskék felületek nagyolása. Ezt követi egy síkmarás, amellyel az ábrán látható sárga felület készül el. A következő műveletelem a zöld, piros és aranyszínű felületek nagyolása, a zöld és piros felületek esetében ez egy teraszoló nagyolás. Ez a műveletelem hasonló az alsó szerszám ugyanilyen módon színezett felületeinek megmunkálásához. A következő műveletelem a narancssárga és világoskék felületek simítása és ezzel készre munkálása. Ezután a zöld felületek simítása következik. Ezt követően az aranyszínű felületek simítása, ezekbe a hornyokba illeszkednek majd a központosító csapok. A pirossal jelölt felületek készre munkálása két profilozó műveletből áll, egy 3 mm-es majd egy 1 mm átmérőjű gömbvégű marószerszám segítségével. Az ábrán lilával és fehérrel jelölt felületek csak ezután munkálhatóak meg, ehhez a megmunkáló központ főorsó fejének szögben állíthatónak kell lennie. A két említett felületcsoport megmunkálásának menete a következő: a felületek nagyolása szármaróval, a felületek simítása 3 mm átmérőjű gömb végű maróval, majd ugyanez a műveletelem még egyszer 1 mm átmérőjű gömb végű maróval. Ezzel a szerszámgépi megmunkálása befejeződött. Az elkészült munkadarabot ellenőrizni kell, a keletkezett sorját el kell távolítani, valamint a lilával és fehérrel jelölt felületcsoportok összeszűkülő felületeit tűreszelővel ki kell reszelni. A munkadarab piros, lila és fehér felületeit ezek után polírozni kell.

Az orr gyártó szerszáma

A kisméretű szerszámok gyártásának bemutatására az orr szerszámát választottuk ki. A megmunkálás itt is két befogásban történik. A következő 9. ábrán a törzs orr részének alsó szerszáma látható az első befogás szerint. A szerszám két felét csavarokkal lehet egymáshoz szorítani, és kiüthető központosító csapokkal központosítani. A szerszámok kisméretűek, kézzel szállíthatóak, az előgyártmány méretei mindkét szerszámfél esetében: 125 mm ×100 mm × 45 mm. A munkadarabot satuba szorítva kell a gépasztalra helyezni.

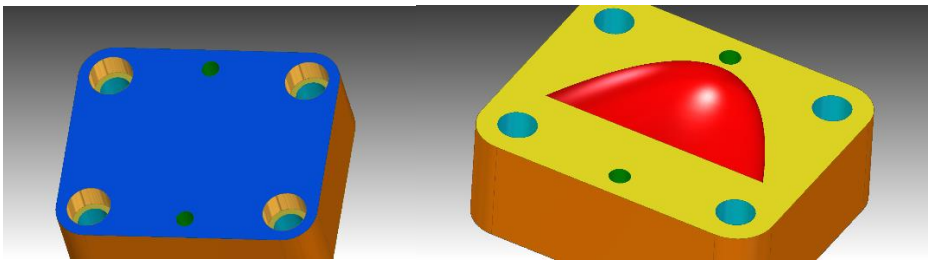


9. ábra A törzs orr részének alsó szerszáma az első és második befogás szerint

A műveletelem sorrend az első befogás szerint a következő: a kék felület síkmarása, a narancssárga felület nagyolása, ameddig a satu engedi, majd ugyanezen felület simítása. Ezt követően a

munkadarabot át kell fordítani a második pozícióba, majd ismét satuba szorítani. A második befogásban elvégzendő műveletelemek sorrendje: narancssárga felület nagyolása, sárga felület síkmarása, piros felület nagyolása, narancssárga felület simítása, piros felület profilozása 3 mm majd 1 mm átmérőjű gömb végű szármaróval. Ezután készülnek el a sárga felületen látható furatok. A zölddel jelölt furatok a következő módon készülhetnek el: központozás, fúrás, majd dörzsárazás, a menetes furatok pedig a következő módon: központozás, fúrás, menetfúrás. Az elkészült szerszámot ezután ellenőrizni kell, és sorjátlanítani, majd a piros felületeket polírozni.

A következő 10. ábrán az orr felső szerszáma látható az első és második befogás szerint.



10. ábra A törzs orr részének felső szerszám az első és második befogás szerint

A szerszám megmunkálása közel azonos az alsó szerszáméval, a különbség, hogy ebben az esetben az első befogásban munkáljuk meg a furatokat. Az ábrán zölddel jelölt furatok esetében: központozás, fúrás, dörzsárazás, a süllyesztett furat esetében pedig: központozás, fúrás, süllyesztés. A szerszámot elkészülte után ellenőrizni kell, majd a piros felületet pedig polírozni.

A szerszámok befoglaló méretei és megmunkálási ideje

Az egyes szerszámok előgyártmány méreteit, és a gépi megmunkálás idejét tartalmazza a következő 1. táblázat.

Megnevezés	Előgyártmány befoglaló méretei [mm]	Gépi megmunkálás ideje [h]
Törzs alsó szerszám	3955×1005×265	221
Törzs felső szerszám	3955×1005×265	250
Orr alsó szerszám	125×100×45	3
Orr felső szerszám	125×100×45	3
Törzs vég alsó szerszám	125×85×35	2
Törzs vég felső szerszám	125×85×35	2
Szárny alsó szerszám (2 db)	3005×905×155	116×2
Szárny felső szerszám (2 db)	3005×905×155	99×2
Motorgondola elülső rész alsó szerszám (2 db)	555×255×115	21×2
Motorgondola elülső rész felső szerszám (2 db)	555×255×135	30×2
Motorgondola hátsó rész alsó szerszám (2 db)	355×285×125	35×2
Motorgondola hátsó rész felső szerszám (2 db)	355×275×125	35×2
Szárnyvég szerszám (2 db)	235×45×30	2,5×2
Vezérsík alsó szerszám (2 db)	805×305×55	44×2
Vezérsík felső szerszám (2 db)	805×305×55	43×2
Vezérsík vég szerszám (2 db)	205×40×15	1,5×2

1. táblázat Az előgyártmányok befoglaló méretei és a megmunkálási idők

Az alkatrészek gyártása

A repülőgép főbb alkatrészei kompozitból, a merevítő és tartó alkatrészek pedig rétegelt lemezből, valamint műanyagból készülnek. A prototípus és a 0 széria gyártandó darabszámából kiindulva a kompozit alkatrészek gyártására a kézi laminálást választottuk. A nem kompozit alkatrészek gyártását később ismertetem.

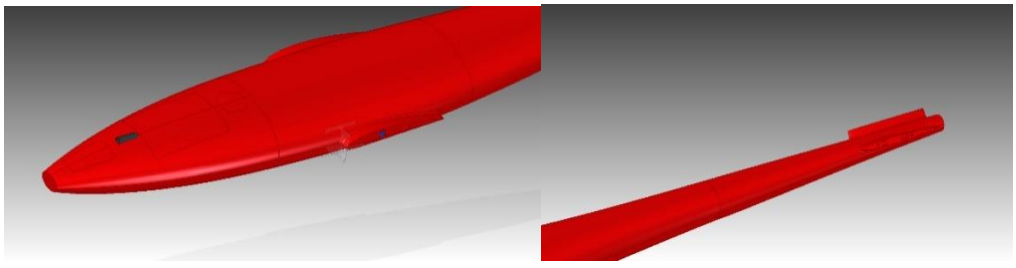
A kompozit alkatrészek gyártása

A kompozit elemek rétegrendjét a következő anyagok alkotják. A laminálóshoz használt gyanta és edző típusa: L-285-ös laminálló gyanta H-286-os edzővel. A felhasznált mátrixanyagok 49 g/m^2-es üvegszövet és 100 g/m^2-es kétirányú szénszövet. A felhasznált maganyagok: NOMEX aramid-papír méhsejt és AIREX R63 zárt cellás PVC hab.

A törzs kompozit alkatrészeinek gyártása

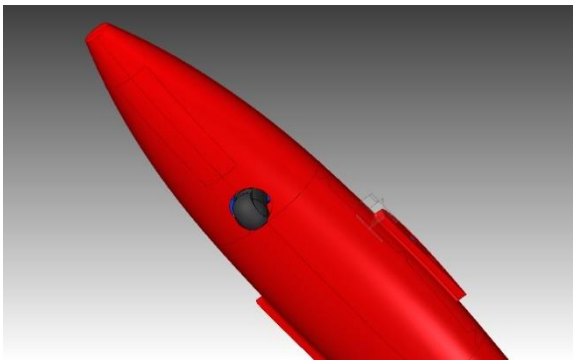
A törzs szerelése a törzs kompozit elemeinek gyártásával kezdődik. A gyártáshoz szükséges a kompozit elemek rétegrendjének meghatározása. A rétegrend kiválasztásához megvizsgáltuk a kereskedelemben kapható hasonló méretű repülőgép modellek és pilóta nélküli repülőgépek rétegrendjét. A választott rétegrendet a gyártási folyamat során ismertetjük. A kompozit törzs gyártása a gyártó szerszámok alakadó felületeinek formaleválasztóval való bekenésével kezdődik. A törzs gyártásához szükséges szerszámfelek esetében az egyes lépések párhuzamosan végezhetőek. A formaleválasztó réteg felvitele után kezdődhet az alakadó felületek festékszóróval történő festése. A festék alkalmazása nem szükségszerű, ezzel meg lehet adni a repülőgép alapszínét, amelyre később további minták festhetőek. A festést követően meg kell várni amíg az már nem folyik, a felszíne még ragad. A festés során ügyelni kell, hogy a festékréteg egyenletes legyen. Amíg a festés szárad, le lehet szabni a gyártáshoz szükséges további anyagokat, ezek a következőek: üvegszövet, méhsejt cellás maganyag, szeparátor fólia és vákuum filc. Az üvegszövet szabása során nem kell törekedni a pontos alakra és méretre a lényeg, hogy megfelelően borítsa az alakadó felületeket, a többi leszabandó anyag esetében viszont törekedni kell a pontosságra, ennek érdekében sablonokat alkalmaznak a vágás során. Ezután kikeverhető a gyártáshoz szükséges gyanta, és a szerszámba helyezhetőek mindkét szerszámfél szárnycsonkjain később kialakítandó csatlakozók magjai. Ezek ideiglenesen helyezendőek a szerszámba, a feladatuk, hogy a gyártás befejeztével a nyílások egyszerűbben kialakíthatóak legyenek. A festék megszáradása után az első üvegszövet réteget behelyezik a szerszámtestbe, és átitatják gyantával. Festőhenger segítségével viszik fel a gyantát a szerszámba helyezett üvegszövetre. A művelet során ügyelni kell, hogy ne legyenek légbuborékok az üvegszövet alatt, a sarkokat mikroballonos gyantával kell kitölteni. Ezt követően meg kell várni, amíg a gyanta részben térhálósodik, a méhsejt cellás maganyag csak ezután helyezhető a szerszámba, majd vákuum fóliával borítják és hőkezelik. A hőkezelés után a behelyezett maganyagra kerül a következő, már a szeparátor fóliára laminált szövetréteg, amelyet szintén gyantával kell átitatni, amit a vákuum filc szerszámba helyezése követ. A vákuum filc feladata, hogy a vákuumozás során kiszoruló, a szeparátorfólián átfolyó gyantafelesleget felszívja. A következő lépés a szerszám borítása vákuum fóliával, majd kompresszor segítségével létrehozzuk a szükséges nyomást. Az alsó szerszámfél vákuumozása után a szerszámok a hőkamrába kerülnek, a hőkezelés időtartama és hőmérséklete az alkalmazott gyantától függ. A hőkezelés után a szerszámokat ki kell venni az autoklávból, és hagyni kell őket kihűlni, a vákuumfólia és a szeparátorfólia segítségével a vákuum filc eltávolítható. Ezzel elkészült a törzs

héj alsó és felső része. Az elkészült kompozit elemeket ellenőrizni kell, ha a rétegek illeszkedése nem megfelelő, akkor a hiba függvényében el kell dönteni, hogy javítható vagy selejt. A következő lépésben eltávolítható a szerszámból kilógó felesleges szövet. Az alkatrészek vizsgálatánál mind a külső, mind a belső felületeket alaposan át kell nézni. A felületek vizsgálata után a további szerelés megkönnyítésének érdekében a törzs felső felén található szárnycsonkokról el kell távolítani a szárnybekötések, a chesterton, az üzemanyag vezetékek és a csatlakozók helyére helyezett magokat. Ahol ilyen módon megbontottuk a rétegrendet, ott a sérült méhsejt cellákat mikroballonos, aerozilos gyantával ki kell tölteni, ezt a gyantát kell használni az alkatrészek ragasztásához is. A sérült cellák kitöltése után meg kell várni, amíg a ragasztó megköt. Majd a törzs alsó részében a merevítő bordák helyének, a felső részében az üzemanyagtartály helyének bejelölése és a felületek előkészítése után megkezdődhet a beragasztásuk. A ragasztásnál fontos, hogy egy lépésben csak egymástól független különálló alkatrészek ragaszthatóak a ragasztó hosszú kötési ideje miatt. A törzs felső felébe beragasztható az üzemanyagtartály és az elülső merevítők, és a következő lépéshez összeragasztható a hasznos terhet tartó lemez és a chesterton tartó. Amíg a ragasztó köt, előkészíthetőek a következő lépésben beragasztandó alkatrészek, illetve a további kompozit alkatrészek gyártása. A ragasztó megkötése után a törzs felső részébe beragasztható a hasznos terhet tartó lemez, amely a beragasztott üzemanyagtartályhoz pozícionálható, és az elülső tartó lemez, amely majd az orr futóművet és az orrsúlyt tartja, ez az alkatrész a beragasztott merevítőkhöz pozícionálható. A törzs alsó felébe beragasztható az elektronikát tartó lemez, amelyen már előzetesen rögzítésre kerültek a futómű kamraajtó mozgatásához szükséges szervó tartó alkatrészek és a gimbal kamera tartója. Ezek után ismét meg kell várni, amíg a ragasztó megköt. Majd be lehet helyezni a vezérsíkokat és a törzs elejét összekötő kábelkötegeket, ezek a kábelek kötik majd össze a robotpilótát a vezérsíkokat üzemeltető szervókkal és a kamraajtó szervókkal és a szárnyban található szervókkal. Ezután már egymásra rakható a két szerszámfél, előtte a ragasztásban résztvevő felületeket be kell kenni ragasztóval, majd a szerszám összezárása után meg kell várni amíg, megköt a ragasztó. Miután a ragasztó megkötött, a felső szerszám eltávolítható, és a készülő törzset ki lehet emelni az alsó szerszámfélből. A törzs ezután egy szerelőpadra helyezhető, ahol ki kell vágni a csatlakózó és szerelő nyílásokat, a kamra ajtót, a gimbal kamera szerelőnyílását és a futóműkamra ajtaját. A kivágás minősége jelentősen javítható előre elkészített sablonok segítségével, a sablonok ráilleszthetőek a kész alkatrészre, így garantálva, hogy a kivágandó nyílások mindig minden gyártott törzsön ugyanoda kerüljenek. A törzs felső részén ki kell vágni az üzemanyagtöltő nyílást, az elektromos egységek elérhetőségét biztosító nyílást, a csőkamera helyét és az opcionális súly behelyezéséhez szükséges nyílást, a gimbal kamera szerelőnyílását, valamint a vezérsík csonkokon is ki kell vágni a rögzítéshez szükséges nyílásokat. Az említett kivágásokat szemlélteti a következő 11. ábra.



11. ábra Törzs felső részének nyílásai

A törzs alsó felén ki kell vágni a kamraajtót, a gimbal kamera nyílását és a futómű kamraajtót. A kivágott kamraajtókra ezután ráragasztják a mozgatásukhoz szükséges nyáklemezeket. A futómű kamraajtó nyílásán keresztül beszerelhető az orr futómű, a kivágott kamera szerelőnyíláson keresztül pedig beszerelhető a kamera. A futóművet és a mozgató aktuátort a beépítés előtt tesztelni kell. A raktér nyíláson keresztül beszerelhetőek a kamraajtó mozgatásához szükséges szervók. Majd a mozgó kamraajtók felszerelése következik. A törzs alsó részének nyílásait szemlélteti az 12. ábra.



12. ábra A törzs alsó részének nyílásai.

Utolsó lépésként a törzsbe kerülő elektronika beépítése következik, ekkor kerül behelyezésre a robotpilóta, az akkumulátor és a futómű vezérlő és a csőkamera. A beépített elektronikát előzetesen tesztelni kell, a kamerák esetén a képminőséget, a gimbal kamera esetében az egyes kameramódokat és a különböző irányokba történő mozgást is tesztelni kell.

A törzs orr része esetén hasonló a gyártási technológia és a rétegrend is megegyezik az előző esetével. A szerszámfelek formaleválasztóval történő kezelése, majd festés. Amíg a festés szárad, elő lehet készíteni a rétegrendnek megfelelő anyagokat: üvegszövet, méhsejt cellás maganyag, szeparátor fólia és vákuum filc, valamint bekeverhető az impregnáláshoz szükséges gyanta. Miután a festék már nem folyik, behelyezhető az első üvegszövet réteg, amelyet ecset segítségével itatnak át gyantával, ezt követően mikroballonos gyantás ragasztót kell a sarkokra vinni, és várni kell amíg a gyanta részben térhálósodik. Majd a szerszámba helyezhető a méhsejt cellás maganyag, ezután vákuum fóliába kerül, majd hőkezelik, és a szeparátor fóliára laminált második üvegszövet réteg csak a hőkezelés után kerülhet a szerszámba, majd ráhelyezik a vákuum filcet. Ezután a szerszámok vákuumcsomagolásba helyezhetőek, a szerszámok kis mérete miatt ebben az esetben többször felhasználható vákuumzacskó használható. A megfelelő nyomás beállítása után a hőkamrába helyezhetőek. A hőkezelés után a szerszámokat ki kell venni, és megvárni, amíg lehűlnek, majd kivehetőek a vákuum csomagolásból, és eltávolítható a vákuum filc és a szeparátor fólia. A felesleges üvegszövetet le kell vágni, és az elkészült alkatrészeket ellenőrizni kell. Majd a ragasztandó felületekre ragasztót kell felvinni, és a szerszámok összezárhatóak. A megfelelő összeszorítás érdekében a felső szerszámfélre súlyt kell rakni. A ragasztó megkötése után a szerszámot ki lehet nyitni, és az elkészült orr részt ki lehet venni, ezután már csak a pitotcső helyét kell kifúrni, és beragasztani a pitotcsövet. Miután a ragasztás megkötött, az orr részt az előzőekben elkészült törzshöz kell ragasztani.

A törzsvég esetén a gyártási technológia megegyezik az orr rész gyártásának technológiájával, így ezt már csak röviden kerül ismertetésre. A gyártáshoz szükséges műveletek a következőek:

a szerszámfelek formaleválasztóval való kezelése, festés, rétegrendnek megfelelő anyagok szabása, üvegszövet réteg impregnálása a szerszámban, sarkok ragasztózása, méhsejt cellás maganyag behelyezése, majd hőkezelés, majd üvegszövet réteg impregnálása szeparátorfólia és vákuum filc behelyezése, vákuumcsomagolás majd hőkezelés. A hőkezelés után vákuumcsomag felesleges üvegszövet és szeparátor fólia és vákuum filc eltávolítása, majd minőségellenőrzés. Ezután a ragasztandó felületekre ragasztót kell felvinni, és a szerszámfelek összezárhatóak. A ragasztó megkötése után a szerszám nyitható, a kész alkatrész eltávolítható, és hozzáragasztható a törzshöz. Miután a ragasztó megkötött, a törzs elkészült.

A szárny kompozit alkatrészeinek gyártása

A szárny szerelésének első művelete a szárny kompozit héjának létrehozása. A szárny héját alkotó kompozit szerkezet rétegrendje a következő: üvegszövet, kétirányú karbon szövet, herex hab, üvegszövet. A szárny alsó és felső felének gyártása egymással párhuzamosan történhet. A szerszámok alakadó felületeit formaleválasztóval kell bevonni, be kell helyezni a csatlakozási pontokhoz a magokat, és le kell szabni a rétegrendnek megfelelő anyagokat, és be kell keverni a gyantát. Elsőként egy üvegszövet réteget kell a szerszámba helyezni és gyantával átitatni, majd a karbon szövetet szintén gyantával kezelni. Ügyelni kell rá, hogy ne legyenek légbuborékok, és a szerszám sarkos részeire mikroballonos ragasztót kell felvinni. Majd a szerszámba helyezhető a herex hab és a lezáró üvegszövet réteg. Ezt szintén gyantázni kell majd a szeparátorfólia és a vákuum filc következik. Ezt követően a vákuumfóliát kell a szerszámra helyezni, és kompresszor segítségével beállítani a megfelelő nyomást. Miután ez mindkét szerszámnál megtörtént, a hőkamrába helyezhetőek. A hőkezelés után a szerszámoknak ki kell hűlnie, ezután eltávolítható a vákuumfólia és a vákuum filc, valamint a szeparátor fólia. A szárny alkatrészeinek beragasztása előtt ellenőrizni kell az elkészült kompozit héjak minőségét, és el kell távolítani a csatlakozási pontokról a magokat. Az alkatrészek közül a futómű rögzítő merevítő keretet előre össze lehet ragasztani, és a bordák is felfűzhetőek a főtartó alsó részére a kompozit gyártás közben. Első lépésben a főtartó alsó része a felfűzött bordákkal együtt, a segédtartó, és a felső szerszámba pedig a főtartó felső része, ragaszthatóak be. A ragasztó kötése után a főtartó középső részei ragaszthatóak be. Ebben a lépésben már elhelyezhetőek a hosszabbító kábelek és csatlakozók a szárnyban. A következő lépésben a chesterton fészek ragasztható be. Majd pedig a futómű felfogató kerete. Ezek után a ragasztandó felületekre felviszik a ragasztót, és összezárható a két szerszámfél. A ragasztó megkötése után a szerszám felnyitható, és a szárny kiemelhető. Ezek után a szükséges szerelő és a féklap nyílások kivágása következik, a nyílások kivágása után behelyezhetőek a csűrőlapot és a féklapot mozgató szervók tartói. A féklapra kivágás után fel kell ragasztani a mozgatásához szükséges nyáklemezt. Beszerelhetővé válik a csűrőlap mozgató és a féklap mozgató szervó, továbbá a szárny rögzítéséhez szükséges rögzítő csapok. Végül zsanérozható és felszerelhető a féklap és a csűrőlap is. A jobb oldali szárny esetében ugyanezeket a gyártási és szerelési műveleteket kell elvégezni.

A motorgondola két elemből épül fel, az első részből, amely a motorgondola és a szárny kapcsolódása, és a hátsó részből, amely magát a motort tartalmazza majd. A motorgondolák a bal és jobb oldali félszárny esetében ugyanazokkal a szerszámokkal gyárthatóak. A motorgondolák rétegrendje megegyezik a szárny rétegrendjével. A motorgondola első és hátsó részének gyártása párhuzamosan folyhat. Az első lépés a szerszámok alakadó felületeinek formaleválasztóval kezelése, és a rétegrendnek megfelelő anyagok leszabása illetve a gyanta bekeverése. Az első

réteg az üvegszövet, amelyet át kell itatni gyantával, majd a kétirányú karbon szövet réteg következik, ezt szintén gyantával kell kezelni, ezután a sarkokra mikroballonos ragasztót kell felvinni. A következő lépésben a herex hab és a lezáró üvegszövet réteg kerül behelyezésre, ezt ismételten gyantával kell kezelni, majd a szeparátorfólia és végül a vákuum filc kerül a szerszámba. Ezután a szerszámok vákuum csomagolásba helyezhetőek, és a kívánt nyomás beállítása után a hőkamrába kerülnek. A hőkezelés és a szerszámok lehűlése után ki kell venni a sablonokat a vákuum csomagolásból és el kell távolítani a vákuum filcet és a szeparátor fóliát, valamint a felesleges üvegszövetet le kell vágni, és ellenőrizni az elkészült alkatrészek minőségét. A kompozit elemek gyártása közben előkészíthetőek a motorgondolába építendő alkatrészek, így a motorgondola felsőrészéhez tartozó bordák és hosszanti merevítők összeragaszthatóak, és a ragasztás után a hosszanti merevítőhöz rögzíthető a gázkart működtető szervó. Az elkészült motorgondola kompozit elemek kiemelhetőek a szerszámból, és a felső rész esetében szerelőnyílást, az alsó rész esetében pedig a futómű helyét, a futómű kamra ajtaját és futóművel nyíló burkolatelemet. Az előkészített merevítő szerkezet beragasztható a motorgondola felső részébe. Az alsó részbe csak merevítő bordák kerülnek. A motorgondola felső részében ezután rögzíthető a kamraajtót mozgató szervó. Ezt követően a főfutómű beépíthető a szárnyba, és felragasztható a motorgondola alsó része. A futóművet és a mozgató aktuátort próbapadon kell tesztelni a beépítése előtt. A ragasztás megkötése után zsanérozható a kamraajtó, és felszerelhető a futóművel nyíló burkolatelem. A következő művelet a motorgondola felső részének ragasztása a szárnyhoz. Ezután következik a tűzfal felragasztása, ez tartja majd a motort. Amíg a ragasztó köt, a motorra felszerelhető a tartó adapter a légcsavarkúp és a légcsavar. A motort beépítés előtt a műszaki leírásnak megfelelően próbapadon kell járatni adott ideig, a motor csak akkor építhető be, ha a próbajárat alatt nem volt semmi rendellenesség. A motor beépítése után a motorgondola hátsó részének felszerelése következik. A jobb oldal esetében ugyanezeket a lépéseket kell végrehajtani. A szervókat beépítés előtt minden esetben tesztelni kell.

A szárny elkészítéséhez szükséges utolsó kompozit alkatrész a szárnyvég. A szárnyvég rétegrendje megegyezik a szárnyéval. A gyártási technológia röviden a következő. A gyártósablon alakadó felületének formaleválasztóval való kezelése. A rétegrendnek megfelelő anyagok leszabása. Az első üvegszövet réteg szerszámba helyezése és gyantázása, majd a kétirányú karbon szövet réteg gyantázása, a sarkok ragasztózása. Ezután a herex hab és a lezáró üvegszövet a szeparátor fólia és a vákuum filc következik. A szerszám ezután vákuum csomagolásba, majd hőkamrában kerül hőkezelésre, a megfelelő nyomás beállítása után. A hőkezelés után a szerszám kivehető a vákuum csomagolásból, eltávolítható a vákuum filc és a szeparátor fólia. Az elkészült alkatrész kivehető a szerszámból és a minőség-ellenőrzés után felragasztható a szárnyra. A jobb oldal esetében ugyanezeket a műveleteket kell elvégezni.

A vezérsík kompozit alkatrészeinek gyártása

A vezérsík rétegrendje megegyezik az előző fejezetben bemutatott szárny rétegrendjével. Az első lépés a szerszám alsó és felső részének formaleválasztóval való kezelése, a rögzítési pontokhoz a magok behelyezése és a rétegrendnek megfelelő anyagok leszabása. Majd a szerszámba kerül az első üvegszövet réteg és a kétirányú karbon szövet, ezeket gyantával kell átitatni, ügyelve arra, hogy a szövetek alatt ne maradjanak légbuborékok, a szerszám élesen sarkos részeire mikroballonos gyantát kell felvinni. A következő lépésben a szerszámba helyezhető a herex hab és a lezáró üvegszövet, ezt szintén gyantával kell átitatni, majd a szeparátor fólia és a vákuum filc kerül a

szerszámba. Ezt követően a szerszámok vákuum csomagolásba kerülnek, és a kívánt nyomás beállítása után hőkamrába helyezhetőek. Amíg tart a hőkezelés, előkészíthető és összeragasztható a főtartó és tesztelhetőek a szervók. A hőkezelés után a kihűlt szerszámok kivehetőek a vákuum csomagolásból, és eltávolítható a vákuum filc és a szeparátor fólia, valamint levágható a felesleges üvegszövet. A kompozit alkatrész minőségének ellenőrzése után a vezérsík alsó felébe beragasztható a főtartó és behelyezhető a hosszabbító kábelköteg, amely a törzsben végigfutó kábelköteghez csatlakoztatható, és eltávolíthatóak a csatlakozók helyét jelölő magok. A ragasztó kötése után be kell ragasztózni a vezérsík felső résszel érintkező felületeit, és ezek után összezárható a szerszám. A ragasztó kötése után a szerszám kinyitható, és a kész alkatrész eltávolítható. Majd a vezérsík felső részén ki kell vágni a szervók szerelőnyílását, a kivágott nyíláson keresztül pedig beragasztható a szervótartó. A ragasztó kötése után behelyezhetőek a szervók, és beragaszthatóak a törzshöz való csatlakozást segítő multiplex csatlakozó és a tájoló csap. A jobb oldali vezérsík gyártásánál ugyanezeket a lépéseket kell elvégezni.

A vezérsík vég gyártása megegyezik az előző fejezetben bemutatott szárnyvég gyártásával. Miután a vezérsík vég elkészült felragasztható, a vezérsíkra. Az utolsó a kormányfelület zsanérozása és összekapcsolása a szervókkal.

A kisebb alkatrészek gyártása

A repülőgépben található merevítő és tartó alkatrészeket a felhasznált anyagok alapján csoportosíthatjuk. A törzsben és szárnyban található merevítő bordák és főtartók laminált herex habból készülnek. Az eljárás során az alkatrészeknek megfelelő mennyiségű anyagot leszabják a herex táblából, majd a kivágott alkatrészre két oldalról üvegszövetet laminálnak. Erősebb szerkezetet kapunk, ha az alkatrészeket két félből ragasztjuk össze, ebben az esetben mindkét fél mindkét oldalára üvegszövetet laminálunk, majd összeragasztjuk őket.

A törzsben található padlólemezek, bordák, valamint a szárnyban található bordák és merevítő elemek rétegelt lemezből készülnek. A megfelelő vastagságú lemezből vághatóak lézerrel. A lézervágás előnye, hogy az alkatrészekben található kivágások is elkészíthetőek vele. A padlólemezekhez kapcsolódó egyéb alkatrészek rögzítéséhez szükséges furatok pedig asztali fúrógéppel is elkészíthetőek.

A szárnyban és a vezérsíkban található szervók, valamint a futóművek behúzását biztosító aktuátorok tartói 3D nyomtatással készülnek. Ezeken az alkatrészeken ébredő erők elhanyagolhatóak, feladatuk a kereskedelmi alkatrészek megfelelő pozícióban való tartása. A 3D nyomtatott alkatrészek alapanyaga ABS. A 3D nyomtatott elemek úgynevezett szálas nyomtatással készülnek. Ez azt jelenti, hogy az alapanyag adott átmérőjű szál, melyet a nyomtató fej felhevít és extrúdál a fúvókán keresztül. Ezen alkatrészek szilárdsága függ a falvastagságtól és a kitöltés sűrűségétől.

A szárnyakban és a törzsben található chesterton fészek az úgynevezett göngyöléses eljárással készül. A szerszám felületét-, ami a fészekbe helyezhető chesterton méreteivel rendelkezik-, formaleválasztóval vonják be, majd erre göngyölik fel a gyantával átitatott üvegszövetet.

A szárnyon és a vezérsíkon található kormányfelületek XPS habból készülnek. A habot CNC habvágóval a kívánt formájúra vágják. A vágás után üvegszövetet kell laminálni a kormányfelületekre.

A repülőgép gyártásának ütemezése

A repülőgép gyártásán és szerelésén négy ember dolgozik, a munkások számát a saját tapasztalataim és a nagyméretű szerszámok alapján határoztuk meg. Ebben a fejezetben a gyártás ütemezésére koncentrálunk, a gyártás menetét nem ismertetjük részletesen, az látható az előző fejezetben. Az ütemezés során arra törekedtünk, hogy minél kevesebb legyen a gyártáson/szerelésen dolgozó emberek állásideje.

A gyártás a legnagyobb kompozit elemek előállításával kezdődik, mivel ezeknél a későbbiekben a szerelés során a ragasztó hosszú kötési ideje miatt, és-mert ahogyan korábban is olvasható egy lépésben csak egymással nem összefüggő alkatrészek ragaszthatóak, sok lenne a várakozási idő.

A gyártás a törzs szerszámainak előkészítésével formaleválasztózásával kezdődik. A törzs esetében két munkás dolgozik a felső részen és kettő az alsó részen. Majd a szerszámokat alapszínre festik. A festést egy munkás végzi, a maradék három a rétegrendnek megfelelő anyagokat szabja le. Ezt követően a rétegrend felépítése következik a korábbi fejezetnek megfelelően, majd vákuumozás és az első hőkezelés. Ezek a műveletek a munkaidő első feléig tartanak. A munkaidő második felében a bal oldali szárnyfél rétegrendjének megfelelő anyagok leszabása, a szerszámok előkészítése és a rétegrend felépítése és hőkezelése történik. A szárny esetében szintén egy szerszám félen két ember dolgozik.

A következő munkanapon a hőkezelés után a törzs rétegrendjének befejezése történik, majd ismételten vákuumozása és hőkezelése. A nap folyamán kinyomtathatóak a szárnyakba ragasztandó 3D nyomtatott szervótartók (6 óra). A következő a jobb oldali szárnyfél gyártása az előző bekezdésnek megfelelően. Ezek a műveletek a munkanap kétharmad részét veszik igénybe. A hátralévő időben a törzsbe elsődlegesen beragasztandó alkatrészeket kell előkészíteni és a kamraajtó mozgató szervókat tesztelni, és el kell indítani a kamera tartó 3D nyomtatását (13,5 óra). A hőkezelés befejeztével a törzs szerszámaiba beragaszthatóak az első lépésben ragasztandó alkatrészek (lásd. előző fejezet). Majd egy munkás elkezdi leszabni a törzs orr és záró eleméhez szükséges anyagokat és felépíti azok rétegrendjét és a hőkezelőbe viszi. Ezek a szerszámok kisméretűek így egy ember foglalkozik mind a négy szerszámmal. Egy munkás elkészíti a törzsbe építendő kábelköteget. Egy munkás előkészíti a szárnyakba építendő alkatrészeket. A negyedik munkás pedig a törzsbe utolsó körben ragasztandó alkatrészeket készíti elő, kinyomtatja a törzsbe építendő maradék négy 3D nyomtatott alkatrészt (4 óra), ellenőrzi a beépítendő szervókat és a futómű mozgató mechanikát.

A következő napon a törzs végelemeivel dolgozó munkás befejezi azok rétegrendjének felépítését, és ismételten a hőkezelőbe viszi azokat. A maradék három munkás beragasztja a törzsbe az összes ragasztandó alkatrészt és behelyezi a kábelköteget, ekkor a törzs felső részén két, az alsó részén pedig egy munkás dolgozik. A következő lépésben a szárnyba első lépésben ragasztható alkatrészek beragasztása. Ekkor szárny felenként két-két munkás dolgozik.

Miután a törzsvég és az orr részek hőkezelése befejeződött, a szerszámaik összezárhatóak, az említett művelet végrehajtása egy munkást igényel. A szárnyba beragaszthatóak a második körben ragasztandó alkatrészek, ez szárny felenként egy-egy munkást igényel. A maradék munkás elkészíti a szárnyakba építendő kábelkötegeket, és ellenőrzi a beépítendő szervókat, ez egy egész napos művelet. A törzs záró elemeivel és a szárnnyal foglalkozó munkások első feladatuk

befejezése után a törzs ragasztandó felületeit ragasztózzák, és felkészítik a szerszám feleket az összezárásra, majd koordinálják azok összezárását.

A következő napon egy munkás kinyitja a törzsvég és orr rész szerszámait és eltávolítja a kész termékeket, majd az orr részen kialakítja a pitot cső helyét és be is ragasztja. A maradék három munkás a törzs szerszámok felnyitását koordinálja, majd eltávolítják a törzset a szerszámból. Majd két munkás a törzsön kialakítandó nyílásokat készíti el. Egy munkás pedig a szárnyba 3. lépésben ragasztandó alkatrészeket ragasztja be. Majd a törzs záró elemeivel befejező munkás segítségével behelyezik a szárny felekbe a kábelkötegeket. A törzs nyílásain dolgozó munkások közül az egyik előkészíti a fedeleket, kamra-és raktérajtókat a végső szereléshez, a másik pedig beszereli a futóművet és a kamerákat.
A következő napon, egy munkás a szárnyba ragasztandó utolsó alkatrészeket ragasztja be, majd felkészíti a szerszám feleket az összezárásra. Egy munkás a repülőgép motorjait teszteli és készíti elő. Egy munkás a motorgondolák és a vezérsíkok rétegrendjének megfelelő anyagokat szabja le. A negyedik munkás pedig a motorgondolákhoz és a vezérsíkokhoz szükséges alkatrészeket készíti elő, teszteli a beépítendő szervókat és a fő futóműveket. A nap folyamán kinyomtathatóak a vezérsíkba ragasztandó szervótartók (2,5 óra).

A következőkben, a szárny felek összezárásához szükséges ragasztandó felületek ragasztózása, ez szárny felenként két-két munkást igényel. A ragasztózás után a munkások a szerszámok összezárását koordinálják. A feladatok befejeztével a motorgondolák és a vezérsíkok rétegrendjét építik fel. Ekkor egy munkás foglalkozik a motorgondolák elülső részeivel (4 szerszám), egy munkás a motorgondolák hátsó részeivel (4 szerszám), egy-egy munkás pedig a vezérsík bal és jobb oldalának, és a szárnyvégek szerszámaival (4–4 szerszám). A rétegrend felépítésével a hőkezelőbe viszik a szerszámokat.

A következő munkafázisban két munkás a szárnyak szerszámainak nyitását koordinálja és eltávolítja a szárnyakat a szerszámokból. Majd a szárny feleken kialakítandó nyílásokon dolgoznak. Egy munkás dolgozik a motorgondola szerszámain (8 szerszám), eltávolítja a hátsó részeket a szerszámokból, kialakítja rajtuk a szükséges nyílásokat, a motorgondola elülső részekbe beragasztja az első körben ragasztható alkatrészeket. A negyedik munkás a vezérsík, a vezérsík záró elem, és a szárnyvég szerszámokkal foglalkozik (8 szerszám). A vezérsík-és szárnyvégeket eltávolítja a szerszámokból, a vezérsík alsó szerszámokba pedig beragasztja a ragasztandó alkatrészeket.

A következő napon, egy munkás a törzs fedeleit szereli a törzsre egy másik munkás a törzsbe építendő vezérlő elektronikát helyezi el a törzs elülső részében, majd összekapcsolja azokat a kábelköteggel, majd teszteli a működésüket. Egy munkás a motorgondola elülső rész felső szerszámaiba beragasztja az utolsó alkatrészeket, majd az alsó szerszámokból eltávolítja a motorgondola alsó részeket és kivágja a szükséges nyílásokat. A negyedik munkás a vezérsíkok alsó részeiben rögzíti a kábeleket, majd szerszámokat zárja össze. Miután ezekkel végzett a szárny felekre zsanérozza a csűrőlapokat és a féklapokat majd beragasztja a szervótartókat (a szervókat előzetesen beszerelte a tartókba).

A következő fázisban a szárny feleken 1–1 munkás dolgozik, beszerelik a futóműveket, felragasztják a motorburkolat elülső részének alsó és felső elemeit, összekapcsolják a szervókat a csű-

rőlapokkal és féklapokkal, visszahelyezik a kivágott fedőlemezeket, és felragasztják a szárnyvégeket. Egy munkás kinyitja az összezárt vezérsík szerszámokat, eltávolítja, a kész vezérsíkokat kialakítja a szükséges nyílásokat, zsanérozza a kormányfelületeket, beragasztja a szervótartókat és a vezérsík záró elemeket. A negyedik munkás a motorokat készíti fel a későbbi beszerelésre.

A következő munkafázisban a vezérsík fedőlemezek a helyükre kerülnek. Az egyes részegységek (törzs, szárny vezérsíkok) elektronikáját a végső összeállítás előtt külön-külön is tesztelik. Ebben a fázisban van lehetőség az egyedi festés elkészítésére. Végül a teljes repülőgép összeszerelhető és el kell végezni a teljes rendszer tesztet, és fel kell készíteni a repülésre.

A repülőgép összeállítása és tesztelése

A repülőgépet a teljes összeállítás céljából próbapadra kell helyezni. Elsőként a törzs kerül próbapadra, majd a törzsben kialakított chesterton fészken keresztülvezetjük a chestertont. A következő lépésben a bal, majd a jobb oldali szárnyat csatlakoztatjuk a chesterton és a tájoló csapok segítségével, a szárnyakat ütközésig toljuk. Végül a vezérsíkok kerülnek felhelyezésre, ezt segíti a tájoló csap és a multiplex csatlakozó. Az elektromos egységek csatlakoztatása után ellenőrizni kell a súlypont helyzetét, majd az akkumulátor behelyezésével áram alá helyezzük a gépet, és távirányító segítségével teszteljük az egyes szervók, a futómű vezérlő, és a motorok működését, majd programozzuk az említett egységeket. A programozás során beállított értékeket átvesszük a robotpilótába. A robotpilóta csak a műszaki leírásában leírtak szerint programozható.

A berepülés feltételei a következőek: bizonyítani kell, hogy a repülőgép a biztonságos repülésre alkalmas. Ehhez szükségesek az aerodinamikai és mechanikai számítások. A repülés előtt terhelési vizsgálatokat kell végezni a repülőgép szárnyain, kormányfelületein, a futóműveken és a motorbekötéseken. El kell végezni a súlypont mérést és összevetni azt annak ideális helyzetével. Tesztelni kell a kormányfelületek és féklapok kitérését és be kell járatni a motorokat. A légcsavarokat ellenőrizni kell, és ha szükséges, kiegyensúlyozni, majd tolóerőt kell mérni.
A programozás és az elektromos egységek tesztje után kerülhet sor a berepülésre. A berepülés csak megfelelő, erre a célra kijelölt helyen és időben történhet. Ekkor nem csak a pilóta nélküli repülőgép repülési tulajdonságait, hanem a vezérlés és a robotpilóta által elérhető összes képességét is tesztelni kell, továbbá fontos a különböző vészhelyzetek szimulálása is. A berepülés során mindvégig meg kell hagyni az emberi beavatkozás lehetőségét. A berepülést csak képzett és gyakorlott pilóta végezheti. A berepülés során megadott számú fel-és leszállást kell teljesíteni, és a különböző repülési feladatokat is többször kell végrehajtani.

A repülőgép tömege üresen 43 kg a meghatározott felszálló tömege 75 kg. A repülőgép a nagy rendelkezésre álló motorteljesítmény miatt túlterhelhető. A saját központi üzemanyag tartályába 24 l kerozin tölthető ez 20 kg terhet jelent. A feladat típusától és a szállítandó teher függvényében kell meghatározni, hogy mennyi kerozint kell betölteni. Amennyiben a feladat csak a fixen rögzített gimbal kamerát igényli, úgy a raktérben rögzíthető üzemanyagtartályba további 24 l kerozin tölthető, ezzel kitolva a hatótávolságot és a repülési időt. Az összeállított repülőgép látható a 13. ábrán.



13. ábra Az összeállított repülőgép

Továbbfejlesztési lehetőségek

A repülés biztonságosabbá tételének érdekében a robotpilóta programját bővíteni lehet egy most fejlesztés alatt álló ALOFT (Autonomous Locator of Thermals) szoftverrel. A szoftver segítségével a repülőgép képes lesz a felfelé áramló meleg levegő, az úgynevezett termik források felismerésére és kihasználására. A felismert termik forrásokat képes koordináták alapján raktározni, és ha legközelebb ugyanazon az útvonalon repül, akkor az útvonalat már az elraktározott termik források alapján optimalizálja. A tesztek során öt órás repülési időt értek el hajtómű nélkül, csak az ALOFT szoftver használatával. A szoftver részletes leírása megtalálható a források között. Mivel a most ismertetett repülőgépnek vitorlázó szárnyai vannak, így a motorok leállása esetén képes lehet a szoftver segítségével biztonságos terep fölé vitorlázni, majd leszállni.

A repülőgép tervezésének kezdetén felmerült a katapultos indítási lehetőség, ám az üzemanyag-befogadó kapacitása miatt ezt elvetettük. Azonban alkalmazásától függően fennállhat az igény az ilyen módon történő indítására. Az Arcturus UAV Portable Launching System (PLS) által tervezett rendszer, és az általunk tervezett repülőgép kis módosítással alkalmassá tehető az erről a PLS rendszerről való indításra. A céggel történt telefonos beszélgetés során magyarázták el a szükséges módosításokat. [Arcturus UAV].

A repülőgép szenzorokkal történő felszerelésével a repülő képes lehet érzékelni a saját távolságát a közelébe kerülő tereptárgyaktól, objektumoktól. A szenzorok csatlakoztathatóak a robotpilótához.

A repülőgép éjszakai láthatósága növelhető ledek segítségével. A ledek a repülőgép szárnyvégein és a törzs végén kerülnének elhelyezésre, és mint a valódi repülőgépek esetében, megadott sorrendben villannának fel.

A repülőgép törzsének és a szárny felső részének napelem cellákkal borítása. Ezzel az elektromos egységek áramigénye fedezhető lehet. Ennek ellenére akkumulátorra továbbra is szükség van az éjszakai, vagy rossz időben történő repülések alkalmával.

A gimbal kamera behúzhatóvá tételével, a repülőgép kényszer leszállása esetén megvédhető a kamera.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Hollandi Marcell Diplomamunka: Pilóta nélküli repülőgép tervezése és gyártása, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2016

UAV MANUFACTURING

Nowadays, the way of using an Unpersonned Aerial Vehicle is developing. In this article we introduce a new multirole UAV. The article will review the UAV's most important features and it's possible way of usage. We explain the recently used manufacturing technologies in UAV processing and explain the expanded UAV's production designing. You can read about how we choose the manufacturing method for the specified production number. You can also read about the tools which are necessary for the production of composite parts. In this article we explain the production method of the composite parts, and the assembling method of the aircraft. In the last part of this document you can read about possible developments for the designed UAV.

Keywords: *UAV, processing, multirole, composite parts, assembly, development*

Hollandi Marcell (MSc) Gépészmérnök Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány és Technológia Tanszék hmarcell026@gmail.com orcid.org/0000-0003-1565-0041	Marcell Hollandi (MSc) Mechanical engineer Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical engineer hmarcell026@gmail.com orcid.org/0000-0003-1565-0041
Kutrovácz Lajos mester oktató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gyártástudomány és -technológia Tanszék kutrovac@manuf.bme.hu orcid.org/0000-0001-8959-472X	Lajos Kutrovácz master teacher Budapest University of Technology and Economics Department of Manufacturing Science and Engineering kutrovac@manuf.bme.hu orcid.org/0000-0001-8959-472X
Simon Sándor (MSc) okl. gépészmérnök, repülőgépész Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály Repülőműszaki Felügyeleti Osztály, osztályvezető simon.sandor@hm.gov.hu	Sándor Simon (MSc) mechanical & aeronautical engineer Ministry of Defence State Aviation Division Airworthiness & ATC Department, head of dept. simon.sandor@hm.gov.hu

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-20-0373_Hollandi M-Kutrovacz_L-Simon_S.pdf

Károly Krisztián, Mikó Gyula

KIS MAGASSÁGÚ BALLONOK HONVÉDELMI ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI, KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A MAGYAR HONVÉDSÉG TÁVKÖZLÉSI IGÉNYEINEK TÁMOGATÁSÁRA

Napjainkban a ballonok katonai alkalmazása reneszánszát éli. Az iraki és afganisztáni hadszíntereken egyaránt megtalálhatóak voltak a megfigyelő és átjátszó pontként telepített léghajók. A földrajzilag tagolt, nagy kiterjedésű, illetve elzárt területek összekapcsolására egyre nagyobb igény jelentkezik, így a magas költségekkel járó műholdas kommunikáció mellett célszerű minden más alternatív platformot megvizsgálni. Kutatásunkban a kis magasságú kötött ballonok honi alkalmazási lehetőségeire fókuszálunk. Megvizsgáljuk ezen platformok megfigyelőpontként és kommunikációs átjátszó állomásként történő alkalmazási lehetőségét. A nemzetközi kitekintés mellett kiemeljük a honi alkalmazás perspektíváit is.

Kulcsszavak: *ballon, kis magasságú platform, nagy magasságú platform, kommunikációs átjátszó, rádió*

BEVEZETÉS

Napjaink katonai műveleteiben elengedhetetlen a saját híradó-informatikai rendszerek redundáns szervezése annak érdekében, hogy információs rendszereink túlélőképességét növeljük. Ennek módja a különböző platformok egyidejű, egymástól elkülönített alkalmazása, például: mikrohullámú-, optikai gerinchálózat, műholdas- és bérelt vonalak alkalmazása, esetlegesen internetes VPN[1]-ek használata.

A mikrohullámú és optikai gerinchálózatok nagy sávszélességet biztosítanak költséghatékony módon, ugyanakkor érzékenyek a környezeti katasztrófákra, és az ellenség is aránylag könnyen pusztíthatja őket. Magyarországon katasztrófavédelmi szempontból az ár-, és belvizek általi elöntéseknek, illetve a szupercellákból lezúduló hirtelen nagy mennyiségű esőnek, villámlásoknak van a legnagyobb esélye. Ezen károk következtében, többek között sérülhet a mikrohullámú adótornyok áramellátása is, leszakadhatnak a felsővezetékek, az áramellátás infrastruktúráját elöntheti a víz. Vagyonbiztonsági szempontból további kockázat a felsővezeték lopásból eredő károk. Harci cselekmények során a mikrohullámú adótornyok az ellenség, illetve terroristák számára kiváló célpontok (jól azonosítható, állandó telepítésű, könnyen felismerhető objektumok), illetve a harcoló csapatoknak ideális tájékozódási pontok, ezért pusztításuk szintén kézenfekvő. A több száz kilométeren át futó optikai vonalak könnyen válhatnak terroristák célpontjaivá. A fontos transzporthálózati vonalak átvágásával jelentős kieséseket okozhatnak. Az internetes VPN-ek, bérelt vonalak mobilhálózati úton, vagy a már említett mikrohullámú, esetleg optikai vonalakon épülnek ki, ezek esetleg még inkább kitettek a veszélynek a magasabb információbiztonsági kockázat miatt. Ezen sebezhetőségi kockázatot jól kompenzálják a műholdas összeköttetési módok, melyeknek hátránya a komoly fenntartási költségek.

[1] Virtual Private Network – Virtuális Magánhálózat

Korunk egyik legnagyobb információtechnológiai kihívása a földrajzilag tagolt nagy kiterjedésű, illetve elzárt területek közötti információs összeköttetések megvalósítása, ahol nagy területen oszlik el kisszámú felhasználó. Ezen felhasználókat a népszerű cellás, illetve vezetékes megoldásokkal összekapcsolni rendkívül költséges lenne, hiszen a hálózat bővítésének megtérülése a kisszámú felhasználó miatt kérdéses, továbbá a műholdas terminálok, vonalak fenntartása, bérlése hasonlóan aránytalanul magas költségeket emésztene fel.

Köztes megoldást jelenthetnek a ballonok, melyek távközlési átjátszóállomásként alkalmazva a kiesett adótornyokat, műholdakat bizonyos körülmények között helyettesíthetik, esetlegesen kiválthatják.

Az általunk vizsgált ballonok hasonlóan érzékenyek a szélsőséges időjárási viszontagságokra, azonban a katasztrófák, vagy harci cselekmények következményeként rombolt infrastruktúrájú területeken – könnyű telepíthetőségük, és alacsonyabb költségvonzatuk révén – az újjászervezett távközlési vonalak első hordozói lehetnek.

Jelen esszé részben egy korábbi kutatómunka aktualizálása [1], amely azért vált időszerűvé, mert a korábban feltárt területeken szignifikáns változás állt be.

Kutatási célunk meghatározni azon technikai architektúrák körét, amelyek sikerrel alkalmazhatók katonai kommunikációs célokra, valamint javaslatot tenni egyes fejlesztési irányokra, továbbá behatárolni a felhasználás korlátait. Kutatásunknak nem része a ballonokon alkalmazott felderítő eszközrendszer (kamerák, szenzorok, lokátorok) elemzése.

A VIZSGÁLT PILÓTA NÉLKÜLI LÉGI ESZKÖZÖK MEGHATÁROZÁSA

A dolgozatban tárgyalt, összehasonlítás alapjául szolgáló eszközöket, célszerű pontosan definiálni. Általánosan elfogadható az a tény, hogy kommunikációs átjátszási célokra az ad-hoc módon telepíthető, légi hordozó platform megoldások közül a legkézenfekvőbb pilóta nélküli légijármű rendszereket (UAS[2]) alkalmazni [2] a személyzettel rendelkező rendszerekkel szemben, mert így lényegesen megnyújtható a levegőben töltött órák száma, relatíve alacsony költségek mellett.

Pilóta nélküli helikopterek, azok a speciális fajtái a légi járműveknek, amelyek forgó szárnyaik révén képezik azt a felhajtóerőt, amellyel a magasba emelkednek. Képesek vertikális fel-, és leszállásra, jól manőverezhetőek. Irányításuk távvezérléssel, vagy automatika révén valósul meg. Napjainkban a széles körben elterjedt pilóta nélküli polgári, illetve katonai elektromos multirotoros repülő eszközök kis súlyuk és alacsony teherbíró képességük miatt, nem alkalmazhatók kommunikációs átjátszóként, mert az átjátszó állomások súlya a több tíz kilogrammot is elérheti [2]. Megítélésünk szerint az alkalmazás elsődleges korlátja, hogy az akkumulátorok kapacitása elégtelen a hosszabb repülési idő biztosításához.

Pilóta nélküli merevszárnyú repülőgépek alatt értjük azon eszközöket, melyek szárnya fix (esetlegesen több állású), és hajtóművük tolóereje következtében szárnyaikon felhajtó erő képződik,

[2]Unmanned Airial System – Pilóta nélküli légijármű rendszer

így emelkednek a magasba. Jó manőverező képesek, irányításuk távvezérléssel, vagy automatikával valósul meg. Katonai alkalmazásuk széleskörű, kezdve a megfigyelés-adatszerzésen át a csapásmérésig, ismertebb típusaik pl.: Global Hawk, Predator, Euro Hawk, stb.) [2].



1. ábra Merevszárnyú és forgószárnyas pilóta nélküli repülő eszközök [3][4]

A forgószárnyas és merevszárnyú pilóta nélküli légi járművek mellett a hajtóművel nem rendelkező, ezáltal csendesebb, nagyobb repülési idővel és nagyobb teherbírással rendelkező léggömbök és léghajók is kiválóan alkalmazhatóak kommunikációs átjátszó eszközök hordozására. Az 1178/2011/EU rendelet az alábbiak szerint határozza meg a ballon, és a léghajó fogalmát: *„A ballon levegőnél könnyebb, hajtómű nélküli légi jármű, amelynek repülését gáz vagy a fedélzeti fűtőberendezéssel melegített levegő biztosítja. E rész alkalmazásában ballonnak minősül a hőléghajó is annak ellenére, hogy hajtóművel van felszerelve”* [5].

„A léghajó levegőnél könnyebb, hajtóművel felszerelt légi jármű, kivéve a hőléghajót, mely e rész alkalmazásában a ballon fogalmába tartozik” [5].



2. ábra A HAV3 típusú léghajó és egy meteorológiai léggömb [6][7]

Lényeges eltérés a léggömb, léghajók és más repülő eszközök között, hogy míg előbbiek „úsznak”, lebegnek, a forgó és merevszárnyú repülő eszközök repülnek. Megkülönböztetünk továbbá kikötött és szabadon lebegő léggömböket, léghajókat, a kikötött verziók jellemzően alacsonyabb magasságban jellemzőek (30 m–5 km), míg a szabadon lebegők akár több tíz kilométer magasságig emelkedhetnek.

A kikötött pilóta nélküli légi eszközök egy speciális hibrid formája a helikite. Ez a platform a ballon és a repülő „sárkány” test kereszteződéséből született, Sandy Allsop keze nyomán Angliában 1993-ban [2]. A lebegéshez szükséges héliumot egy lapított ellipszoid formájú ballonban tárolja, a sárkány test aerodinamikai kialakítása biztosítja, hogy a nagy szélben is megfelelően

vitorlázzon, így jobban ellenáll az időjárási viszontagságoknak, mint a hagyományos léggömbök. A következő ábrán egy helikite figyelhető meg:



3. ábra A léggömb é**s „sárkány”** test kereszteződése a helikite [8]

BALLONOK KATONAI ALKALMAZÁSÁNAK FONTOSABB MÉRFÖLDKÖVEI

Az első hőlégballon alkalmazásáról szóló írások 1709-ből Portugáliából származnak, míg az első léghajó 1852-ben emelkedett a magasba. Az első katonai bevetésre porosz részről 1870. szeptember 24-én került sor a franciaországi Strasbourgban léghajó formájában. Nem sokkal később (1885) az Egyesült Államokban már komoly munka kezdődött meg a kimondottan katonai célú léggömbök, léghajók fejlesztése terén. Kezdeti alkalmazási területük a felderítésre, híradásra, és tűzvezetésre korlátozódtak. 1878-ban a ballonok alkalmazása révén életre hívták a Brit Királyi Légierőt [9].

Már az első világháborúban próbálkoztak kezdeti távirányítási megoldásokkal a meteorológiai megfigyelő ballonok tekintetében. Ezek rádiótelegráffal kerültek ellátásra, és távolról volt lehetőség a ballon szelepének nyitására, amely így képes volt leszállni [9].

A ballonok, léghajók korai, valamint első világháborús tapasztalatai is rámutattak, hogy elsődlegesen nem a csapásmérés eszközei: nem voltak alkalmasak nagy bombaterhek cipelésére, és alacsony manőverképességük révén a légi harcból is kiszorították őket a repülőgépek. A Nagy háborút követően többnyire elavult technológiának gondolták, túlélését a léggömbzárak alkalmazása jelentette. A kötött ballonok jó szolgálatot tettek 1940-ben a brit sziget védelme során, ahol 1466 darab léggömböt engedtek 1000 m magasságra, és közéjük hálókat feszítettek, melyekbe az ellenséges repülőeszközök beleakadtak és lezuhantak [9].

1939 májusában a legnagyobb merevtörzsű léghajó a 213,9 tonnás német Graf Zeppelin II (LZ130), 245 m hosszal és közel 200 000 m^3-es térfogattal, radarral kémfeladatokat hajtott végre a brit légtérben [9].

1958. július 21-én bocsátották fel a legnagyobb nem merevtörzsű léghajót, 43 000 m^3-es térfogattal, amely 123 m hosszú és 26 m átmérőjű volt. Az amerikai haditengerészet szolgálatában állt közel két évig, majd tengerbe zuhant és megsemmisült. A legnagyobb magasság, amit ember nélkül felbocsájtott ballon elért, 51 815 m volt, melyet az 1,35 millió m^3-es Winzen típusú léggömb ért el 1972 októberében Kaliforniában [9] [10].

A következő jelentősebb mérföldkő a ballonok katonai alkalmazásában amerikai oldalról a vietnámi háború volt. 150–170 m^3-es, faroksíkokkal ellátott léggömböket emeltek 300 m-es magasságba, amelyek rádióátjátszó pontokként működtek, és képesek voltak 35–40 km-t lefedni [9].

A ’80-as években előtérbe kerültek a kötött léghajókra szerelt rádiólokátor állomások, mint például a TCOM cég 700 m^3-es 125 kg hasznos teherbírású léghajója, amely 750 m-es magasságban dolgozik és ellenáll maximum 90 km/h-ás vízszintes szélsebességnek, ahol a széllökések nem haladhatják meg a 130 km/h-át. A cég által gyártott kábelek 5000 kg szakítószilárdságra lettek tervezve a kisebb, és 30000 kg-ra a nagyobb léghajók esetében. A korszak legnagyobb léghajói közé sorolható a Bahama szigeteknél telepített, USA vámhatóságának szolgálatában álló 365B/H (Mk7-S) 11640 m^3-es térfogattal és 59,2 m-es hosszal. Össztömege 5200 kg, melyből 1800 kg lehet a hasznos teher. Szolgálati magassága 3000–4500 m, maximum 160 km/h földközeli szélsebesség mellett, továbbá földi rögzítése egy 30 m sugarú körpályán valósul meg [9].

Megállapítható a ballonok elmúlt háromszáz éves története alapján, hogy speciális adottságaik újra és újra felkeltették a hadiipari fejlesztők figyelmét. Alkalmazásuk révén alakultak meg a nagyhatalmak légierői, melyek a hadviselési teret a szárazföldi és vízi dimenzióból kiterjesztették a levegőbe is. Folyamatos konkurenciát jelentettek számukra a repülőgépek, melyek időről-időre felülkerekedtek a versenyben, javarészt magasabb manőverező képességük, megbízhatóságuk és az időjárási viszontagságoknak való jobb ellenállásuk okán. Azonban a ballonok egyes tulajdonságai ismét felkeltették a fejlesztők, kutatók figyelmét.

KORUNK FŐBB BALLONOS PROJEKTJEINEK ÁTTEKINTÉSE

Napjainkban a NATO[3] hadseregekben a ballonok egyik fő alkalmazási területe az ISR[4] – megfigyelő platformok hordozása. Az iraki és afganisztáni műveletekben számos katonai objektum táborvédelmi rendszerének része volt a ballonokra szerelt kamera és egyéb megfigyelő rendszerek. A ballonok, léghajók alkalmazását tekintve egy szűkebb szeletet képviselnek a kommunikációs átjátszó pontok.

A vizsgált pilóta nélküli lebegő légi eszközökből kiemelten vizsgáljuk a sztratoszféra közeli (17–22 km) valamint a kis- és közepes magasságú (300 m – 5 km) ballonokat, léghajókat. A

[3] North Atlantic Treaty Organization – Észak-atlanti Szerződés Szervezete

[4] Intelligence, Surveillance, Reconnaissance – Hírszerzés, Megfigyelés, Felderítés

sztratoszférikus eszközök nagyobb kiterjedésű területen (például: Magyarország), rálátás szempontjából összemérhetőek a műholdak által nyújtott lefedettségi lehetőségekhez. A kis és közepes magasságú lebegő eszközök kisebb területet képesek lefedni, alkalmazásuk elsősorban a távközlési tornyok helyettesítésére irányulhat.

Az Egyesült Államok hadserege által fejlesztett HAV304[5] léghajó (2. ábra, bal) a maga 38 ezer m^3-es térfogatával képes 6000 m-es üzemi magasságban akár 3000 km megtételére pilótával, vagy pilóta nélkül, 21 napos szünetmentes üzemelés mellett. Elsődlegesen felderítő feladatokra készítették, de rendelkezik kommunikációs átjátszó és erőkövető (BFT[6]) képességekkel is. Mindezidáig egy prototípus készült az eszközből, mely 2012-ben tette meg első útját az Army kötelékében, majd 2013-ban leállították a projektet a horribilis költségek miatt. A vállalkozást az amerikai fejlesztési ügynökség, a DARPA[7] finanszírozta a LEMV[8] projekt részeként, majd a törlés után az eszköz átkerült brit tulajdonba. A vállalkozás teljes költsége (tervezés, fejlesztés, és bizonyos mértékig a tesztelés) 154 és 517 millió dollár közé tehető, mert a teljes projekt nem valósult meg. Ez az összeg többszörösen túlszárnyalja a magyar Gripen projekt költségét [11]. A repült órák költsége a 2010-es tesztelési időszakban 10–20 ezer dollár /óra, melyhez adódott egy 10 ezer dollár/repülés költség is [12]. Megállapítható, hogy bár a léghajó és a rá felszerelt eszközök kielégítik a kor technikai színvonalán elvárható képességeket, a projekt költsége a rendszeresítés és alkalmazás nélkül is messze felülmúlja nemhogy a Magyar Honvédség, de még egy domináns haderő, a US Army képességeit is. Kérdésként merül fel, hogy érdemes-e ennyi funkciót egy platformra felszerelni? A válasz, hogy nem feltétlenül a platformok diverzitása jelenti a költségtöbbletet, hanem a sztratoszférikus léghajó technológia kialakítása. A történeti áttekintésből látható, hogy sztratoszférikus ballonok sikeres katonai alkalmazására még nem került sor, továbbra is jelentős kutatások szükségesek a technológia kialakításához. A sztratoszférikus ballonozás kialakítására jelenleg is folynak kutatások, például a Thales Stratobus projektje, vagy a Google Loon (jelenleg X company Loon) vállalkozása.

A Stratobus az ígéretek szerint, olyan kommunikációs relé lett volna a sztratoszférában, amely pilóta nélkül képes huzamosabb időn át folyamatos szolgáltatást biztosítani. A kor elvárásainak megfelelően a mobilkommunikációból ismert, szélessávú negyedik generációs (4G) LTE[9] szabvány szerint. A projektet két év után 2016. április 26-án lezárták, költségeit tekintve Franciaország 17 millió eurót költött rá. Azonban érdemes megfigyelni, hogy a sztratoszférikus ballonozásban érdekelt kutatások, és ballongyártó cégek adatai alapján a sztratoszférában maximum 90 km/h-ás szélre készültek a kutatók [13]. Ez alapján meglehetősen aggályos a világhírű Google és Raeven Aerostar cégek Loon projektje is. Maga a „Loon” elnevezés egy szójáték a „baloon”, mint ballon, valamint a „loon”- őrültség szavakból származik. A koncepció lényege, hogy irányítatlan ballonokra telepítenének távközlési platformokat, amelyek LTE hálózattal fednék le a földfelszín nehezen elérhető területeit. A ballonok pozícionálását, azok magassági helyzetének változásaival oldanák meg. Ha egy nagyobb légáramlat elsodorná a ballont, az automatika lejjebb,

[5]Hybrid Air Vehicle – Hibrid Légijármű
[6]Blue Force Tracking – Baráti erők követése
[7]Defense Advanced Research Projects Agency – USA Védelmi Kutató Ügynöksége
[8] Long Endurance Multi-Intelligence Vehicle – Hosszú alkalmazási idejű többszenzoros felderítő jármű
[9] Long Term Evolution – 4. generációs mobilhálózati szabvány megnevezése

vagy feljebb engedné a ballont, hogy ellentétes irányú légörvénybe kerüljön, amely visszapozícionálná eredeti helyére. Az elképzelés komoly szkepticizmust váltott ki a szakemberekből, de az elnevezés alapján, még a cégen belül is. Mindemellett elmondható, hogy a vállalkozások mögött komoly tőke invesztíció állt. A Google Loon projektet nemrég átvette az X company, amely egy újabb jel arra nézve, hogy a tech óriás is kihátrál a kezdeményezés mögül. Egy ilyen prototípus a 4. ábrán látható. További érdekesség, hogy a 2014-ben prognosztizált maximum 90 km/h-ás szélerősség helyett, 162 km/h-ás szélsebességet is mértek a tesztek során [14].



4. ábra A Raeven Aerostar nagy magasságú ballonja kommunikációs átjátszó állomással felszerelve [15]

2005-ben telepítették az Egyesült Államok iraki műveleteihez a MARTS[10] rendszert, amely kimondottan olyan kötött léghajókból állt, amelyek kommunikációs átjátszó pontként üzemeltek alacsonyabb magasságokban. A rendszert a haderő egyik legnagyobb ballonos beszállítója a TCOM LP szállította, képes volt SINCGARS, EPLRS és FALCON I szériájú rádiók adásainak átjátszására sík területen, egy 125 km sugarú körben megszakítás nélkül 15 napon keresztül [16]. A léghajó maximum 85 km/h-ás szélnek, valamint kézifegyvereknek állt ellen. Érdemes megjegyezni, hogy az itt felsorolt léghajók könnyedén áldozatul eshetnek a légvédelmi rakétáknak, valamint repülő eszközökről és helikopterekről is könnyedén pusztíthatók akár fedélzeti géppuskákkal is. Térfogatuk 1800 m^3, teherbírásuk 225 kg, maximális repülési magasságuk 900 m volt. A rendszer teljes költsége 14 millió dollár körülire becsülhető, amelyből 16 ballont üzemeltettek [17]. A korabeli érvelések szerint összességében költséghatékonyabb volt léghajókat üzemeltetni, mint távközlési adótornyokat építeni a megszállt területeken, és azokat őriztetni [18]. A cég jelenleg is szállít ballonokat olyan hadszínterekre, ahol az Egyesült Államok

[10]Marine Airborne Re-Transmission System – Tengerészgyalogos Légi Relé Rendszer

is jelen van. Valamint az USA Mexikóval közös határszakaszára, elsődlegesen megfigyelési feladatokra. Az alábbi táblázatban kiemelünk jelenlegi kínálatukból három platformot, melyek jól alkalmazhatók különböző szintű katonai átjátszó pontokként.

Megnevezés	71M	28M	17M
Típus	Kötött léghajó	Kötött léghajó	Kötött léghajó
Szint	Stratégiai	Hadműveleti	Harcászati
Üzemi magasság	4600 m	1500 m vagy 900 m	300 m
Hasznos teher	1600 kg	385 kg vagy 570 kg	90 kg
Üzemidő	30 nap	14 nap	7 nap
Maximális szélsebesség	130 km/h	92 km/h	74 km/h
Széllökések maximális sebessége	167 km/h	130 km/h	101 km/h
Lehetséges max. áramellátás	23,5 kVA	3 kVA vagy 5 kVA	1 kVA

1. táblázat A különböző műveleti szintű, amerikai kötött léghajók összehasonlítása [19]

A táblázatból jól látható, hogy a kötött léghajók paramétereiket tekintve megfelelnek a különböző műveleti szintek elvárásainak. 2012-ben három darab 28M kötött léghajó 12,2 millió dollárba került, míg 2011-ben 15 db harcászati szintű kötött ballonért 38 millió dollárt fizettek ki [20]. 2014-ben az USA Irakba 90 millió dollárért telepített hét darab 17M kötött léghajót és 14 átjátszó tornyot [21]. A fenti árak tartalmazták a teljes költséget úgy, mint ISR megfigyelő rendszerek (lokátorok, kamerák), technikai támogatás, kezelők kiképzése, kiszolgáló eszközök, telepítés, javító készletek stb. Itt is meg kell említeni, hogy a költségek megközelítik, sőt esetenként meghaladják a magyar Gripen projekt kiadásait. Az 5. ábrán egy 17M harcászati szintű kötött léghajó látható.

Célszerű megemlíteni az Európai Unió (EU) ABSOLUTE[11] [23] és CAPANINA[12] [24] projektjeit. Az ABSOLUTE projekt fő célkitűzése olyan, főleg lebegő légi platformok kutatása, amelyek kommunikációs átjátszó pontként üzemeltethetők veszélyhelyzetekben, illetve nem várt események és ideiglenes tömegrendezvények során. A projekt főleg a kismagasságú (LAP[13]) lebegő eszközökre fókuszált, azon belül is a helikite-okat [25] preferálta. A léggömb és sárkány test hibrid megoldásának köszönhetően, sikerült olyan kötött lebegő eszközt alkotni, amely 300 méteres üzemi magasságával, stabilan ellenáll a 75 km/h-ás szélnek is, mindezt egy 34 m^3-es térfogatú ballonnal, 10 kg teherbírással. A platform földi megtáplálás mellett elbírja egy LTE mobilkommunikációs bázisállomás antennáit, és legszükségesebb elektronikáját. A rendszer telepítési ideje megközelítőleg 1 óra. Szállításához elegendő egy pick-up, azonban a kijuttatás szempontjából kritikus az utak járhatósága. Afganisztáni műveleteik során alkalmazták már az USA, a brit, az ausztrál és norvég katonák is [2]. A helikite-okkal végzett kutatások során, értékes mérések készültek a lefedettségi kísérleteknél. 300 m-re felengedett ballonokról mérték, hogy különböző távolságokon van-e még stabil LTE összeköttetés. A használt frekvenciasávok 700 MHz és 2,6 GHz, illetve az alkalmazott modulációk a QPSK, a 16 QAM és 64

[11] Aerial Base Stations with Opportunistic Links for Unexpected & Temporary Events - veszélyhelyzetekben, illetve nem várt események és ideiglenes tömegrendezvények során kommunikációs átjátszó pontként üzemeltethető lebegő légi platformok

[12] Communication from Aerial Platform Networks Delivering Broadband Information for All – Szélessávú Adatkommunikációs Megoldások Mindenkinek Légi Lebegő Platformokról Biztosítva

[13] Low Altitude Platform – Alacsony Magasságú Platform

QAM voltak. Az elvárásoknak megfelelően megállapítható, hogy az alacsonyabb számú fázisállapottal rendelkező modulációk jobb eredményeket produkáltak hatótávolság tekintetében, azonban 15 km távolságban a 2,6 GHz-es sávban még így is voltak problémák (10 km-ig jól alkalmazható QPSK modulációval a rendszer). A 700 MHz-es sáv egyaránt jól vizsgázott 10 és 15 km-es távolságban. A mérések valós környezeti viszonyok között, közepesen átszegdelt területen történtek. Költségeik lényegesen alacsonyabbak a korábban említett ballonokhoz képest. Az USA szárazföldi hadereje az afganisztáni műveleteihez 50 ezer dollár/ készlet áron vásárolt helikite-okat [26], egyébiránt a hivatalos forgalmazótól átlagosan 6000 dollárért megvásárolható az alap platform [27], amelyre további ISR szenzorok és relék szerelhetők.



5. ábra TCOM LP 17M harcászati szintű kötött léghajó [22]

A kutatás további fontos eredménye, hogy bár az alacsony magasságban alkalmazható helikiteok aránylag olcsók, és alkalmazásuk könnyebb a nagy magasságú társaikénál, a kutatók a közepes magasságú platformokban látják a jövőt, valamint tervben van 2000 m-ig növelni a helikite-ok maximális üzemi magasságát. A helikite-ok melletti érvként fogalmazták meg költséghatékonyságukat, sokoldalúságukat, az arányosan jó teherbírást. Valamint a kárhelyszíneken, a hibaelhárítás során, az első telepíthető bázisállomások lehetnek. Az ABSOLUTE projekt egy új irányvonalat is megnyitott a ballonok lehetséges alkalmazása terén. A kizárólag ballonokon alapuló átjátszó állomások alkalmazása helyett, sokkal célszerűbb földi, légi és műholdas kommunikációs megoldásokat felhasználó hibrid rendszer kiépítése, ahol a ballonok csak a hirtelen felmerülő igények kielégítését szolgálják ideiglenes jelleggel. A dinamikus alkalmazhatóság érdekében olyan kognitív rádiórendszerekbe integrálva, amelyek rugalmas csatornakihasználással, és forgalomszervezéssel elősegítik a kommunikációs hálózat optimális működését [2][28].

A CAPANINA projekt olyan nagy magasságú platformok (ballonos) vizsgálatát végezte, amelyek szélessávú adatkapcsolatot (legfeljebb 120 Mbit/sec) képesek biztosítani nagy területen (átlagosan 60 km átmérőjű körben). A 2003–2006. közötti kutatások – a számos gyakorlati életben is jól alkalmazható technológiai eredmény mellett – kimutatták, hogy a technológia alkalmazásának legnagyobb gátja annak költsége. Egyelőre nincs reális piaci kereslet a technológia iránt. Gazdasági kimutatásaikból jól látható, hogy azonos célra fejlesztett repülő és lebegő platformok fejlesztési és várható fenntartási költségei közötti különbség négyszeres a ballonok

kárára [2]. Ezen megállapításokat látszik megerősíteni a Thales és Google korábban említett sztratoszférikus projektjei.

A fenti alkalmazásokon túl megjelentek olyan kommunikációs átjátszók, amelyek meteorológia léggömbökön alapulnak [29]. Ezen ballonok olyan kisméretű, néhány légköbméteres eszközök, amelyek minimális súllyal emelkednek nagy magasságokig (kb. 30 km). Természetesen nem kötött ballonokról beszélünk, ezért nagymértékben ki vannak téve a széljárásnak, továbbá a nyomáskülönbség miatt a sztratoszférában „kipukkadnak", és a kommunikációs egység egy ejtőernyővel tér vissza a földre. A levegőben töltött idő 30–45 perc. A technológia fónia és folyamatos adatátvitel céljaira nehezen alkalmazható, mert nem célszerű, és nem kifizetődő félóránként léggömböket eregetni. A gyakorlatban legfeljebb a napi egy-, vagy kétszeri felemelkedés folyamán, az ellátási területen telepített érzékelőktől gyűjtheti be hatékonyan az információt. Másik komoly korlátja, hogy a visszatérő egységek nagy földrajzi területen érhetnek földet. Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai alapján, akik napi egy ballont eresztenek fel, a visszatérő egységek szerte a Kárpát-medencében érkeznek vissza, nem ritka az országhatáron túli landolás [30]. Mindez komoly információbiztonsági kérdéseket vet fel, ugyanis a kommunikációs átjátszók és a rejtjelező kulcsok könnyen kompromittálódhatnak.



6. ábra BHE ballonos megfigyelő rendszer (Mikó Gyula)

A terület magyar vonatkozását tekintve szükséges megemlíteni Sós Mihály mérnök nevét. A Sós Mihály által vezetett cégek, műhelyek tudományos igénnyel kutatták a ballonok magyarországi alkalmazásának lehetőségeit [31]. Napjainkban az ISR célokra és kommunikációs átjátszóként is alkalmazható alacsony magasságú kötött ballonok fejlesztésével kapcsolatosan a BHE Bonn Hungary Kft. neve említhető. A 28 köbméteres héliummal töltött kötött ballon 150-200 méteres magasságból alkalmas légi megfigyelésre és kommunikációs átjátszó állomásként való alkalmazásra is. A léggömbre erősített platform kb. 5 kg hasznos teher hordozására alkalmas. A léggömb rendelkezik távolról vezérelhető vészleeresztő szeleppel, ami kötél szakadás esetén lehetőséget biztosít a ballon gyorsított földet érésére. Alapkiépítésben két tengelyen stabilizált nappali és hőkamera szenzort, légnyomásmérőt, szélsebesség mérőt, GPS[14] vevőt és

[14] Global Positioning System – USA Globális Helymeghatározó Rendszer

vezeték nélküli MIMO[15] adatrádiót hordoz. Az adatrádió több kilométeres hatótávolságon belül biztosítja a valós idejű HD[16] videojel átvitet [32].

HONI ALKALMAZÁS LEHETŐSÉGEI

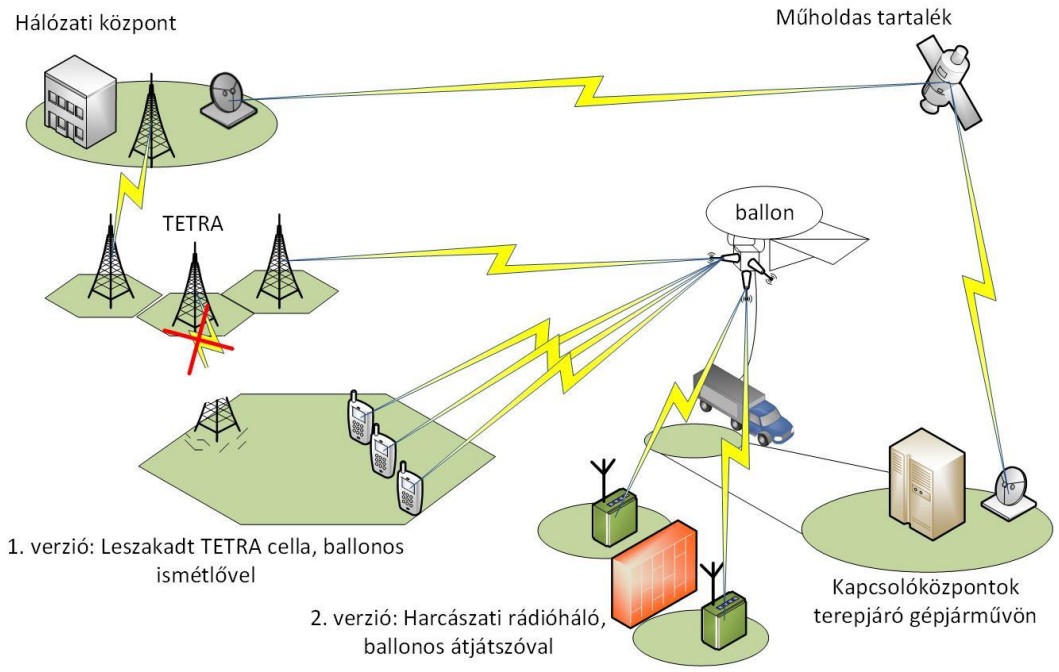
Az autonóm, robot sztratoszférikus léggömbök és léghajók kutatás – fejlesztés – innovációja (K+F+I), valamint üzemeltetése és üzemben tartása Magyarország számára, azok költség vonzatai miatt jelen technikai és gazdasági körülmények között nem reálisak. Bár egyes kutatások a nagy magasságú platformokon (HAP[17]) települő kommunikációs átjátszó pontokat tekintik a pilóta nélküli ballonokra telepített relék jövőjének, azok ár/érték aránya országunknak, nemhogy honvédelmi, de magasabb kormányzati szinten sem térülne meg.

A kutatásaink alapján általánosan elmondható, hogy a ballonok K+F+I tevékenységének és üzemeltetésének költsége magasabb más pilóta nélküli repülőeszközökénél. Nemzetközi példákból látható (TCOM LP kötött léghajói), hogy a piacon fellelhetők olyan professzionális alacsony és közepes magasságú (LAP[18]) eszközök, amelyek kommunikációs átjátszó pontként a gyakorlatban is alkalmazhatóak akár katonai feladatokra is. Természetesen a nagyhatalmaknak sem kifizetődő a csak reléként történő alkalmazás, ezért e lebegő eszközöket többnyire elsődlegesen ISR platformok hordozására, másodlagosan kommunikációs átjátszó pontként alkalmazzák. Ezek fenntartási költségei bár alacsonyabbak a sztratoszférikus platformokénál, megítélésünk szerint Magyarország számára még így is irreálisan magasak lennének. Jelen viszonyok között nem lenne elfogadható ilyen ballonok alkalmazása, hiszen nagyjából azonos költségek mellett, a komolyabb előnyökkel járó korszerű vadászgépeket is lehet üzemeltetni, és már a Gripen flotta is komoly terheket ró a költségvetésre. Továbbá a kis darabszám sem feltétlenül váltaná be a hozzá fűzött reményeket. Bár üzemelés közben a lebegő eszközök képesek a repülő eszközöknél hosszabb távon a levegőben maradni, és ellátni feladatukat minimális beavatkozással, az elvárásokkal ellentétben költségeik többszörösére rúghatnak a repülőkhöz képest.

Mint azt a korábbi kutatásban [1] is megállapítottuk, a meteorológiai léggömbök alkalmazása reléként nem javasolt, alacsony rendelkezésre állásuk, a visszatérő modulok sztochasztikus viselkedése és információbiztonsági kihívásai, valamint az időjárási megkötések miatt.

Megítélésünk szerint az alacsony magasságú (30 m – 300 m) kötött ballonok és helikite-ok katonai alkalmazása aszimmetrikus, hibrid [33][34][35] és küszöb alatti műveletekben, harcászati szinten, zászlóaljak és dandárok támogatására hordoz magában potenciált. Az elsődleges alkalmazást itt is az ISR platformok hordozása jelentheti, csak másodlagosan érheti meg kommunikációs relékkel történő felszerelésük. Magyar vonatkozásban további opciót jelenthet, kormányzati szinten az EDR[19] bázisállomások antennáinak kiegészítő hordozó eszközeként. Az alábbi ábrán a kis magasságú kötött ballonok lehetséges honi alkalmazásának egy verziója látható.

[15] Multiple Input – multiple output – Többszörös bemenet és többszörös kimenet
[16] High Define – Nagyfelbontású
[17] High Altitude Platform – Nagy Magasságú Platform
[18] Low Altitude Platform – Alacsony Magasságú Platform
[19] Egységes Digitális Rádiótávközlő Rendszer (honi TETRA)



7. ábra Kis magasságú kötött ballonok alkalmazása kommunikációs átjátszóként, változat (szerzők)

Az ábrán megfigyelhető, hogy bár a ballon csak kiegészítő, mégis fontos szerepet tölt be az állandó hírközlő hálózatban történő kiesések kezelésére, a tábori híradó hálózat támogatására. A relé üzemmód mellet természetesen ISR platformokkal (elsődlegesen kamera) is célszerű ellátni a felderítés támogatása érdekében, valamint egy erőkövető rendszer támogatására is megfelelő, illetve a hatókörön kívüli harcászati rádióhálókat is képes összekapcsolni a különböző változatokban. A 300 m-es üzemi magasság nagyobb rádiófrekvenciás rálátást (RLOS[20]) lenne képes biztosítani a terminálok számára, valamint ezen rendszerek alacsony sávszélesség igénye sem okozna komolyabb problémákat. Létezik olyan hazai gyártású harcászati adatrádió rendszer, mely ballonos telepítés esetén alkalmas 40–50 km hatótávolságban 10–20 Mbit/sec adatátviteli sebességű vezeték nélküli gerinchálózat kiépítésére [32].

Az esetlegesen felmerülő kapcsolástechnikai, illetve átjátszással kapcsolatos áramköri feladatokat a ballon felbocsátási helyén települő terepjáró gépjárműre telepített kapcsolóközpont végezné.

Véleményünk szerint érdemes lenne fontolóra venni a kis magasságú kötött ballonok honi alkalmazásának lehetőségét, mint a fenti példán is látható, a több funkciós platform alacsony költségek mellett valósítható meg, és használatuk komoly előlépést jelenthet a vizuális felderítés és kommunikációs átjátszás területén egyaránt.

Bár hazánknak jelenleg nincs egységes, saját katonai erőkövető rendszere, a nemzetközi műveleti tapasztalatok arra engednek következtetni, hogy idővel a Honvédségnél is szükségessé válik az alkalmazásuk. Az erőkövető rendszerek egyik komoly dilemmája, hogy a terminálok és hálózati központok közötti vezeték nélküli kapcsolat (AI[21]) korántsem tökéletes, melynek főleg fizikai-technológiai korlátai vannak. A földfelszíni cellakapcsolt trönkölt rádiórendszereket alkalmazó megoldások (pl.: KFTS[22]) kommunikációs hálózata aránylag könnyen blokkolható, pusztítható.

[20] Radio Line of Sight – Rádiófrekvenciás közvetlen rálátás
[21] Air Interface – Vezeték nélküli interfész
[22] Kosovo Force Tracking System – NATO koszovói erőkövető rendszere

A műholdas átviteli utakat alkalmazó rendszerek (pl.: IFTS[23], FBCB2 BFT[24]) [36][37] adatátviteli költségei magasak, és a gyakorlati tapasztalatok alapján nem elhanyagolható a szolgáltatás kiesések időaránya a lefedetségi problémák miatt (pl.: mozgó terminálok erősen átszegdelt, vagy beépített területen próbálnak kapcsolatot teremteni GEO[25] pályás műholdakkal, ahol takarás miatt gyakori a kiesés). Ilyen szituációkban az alacsony és közepes magasságokban (300 m – 5 km) operáló ballonokra telepített relék, komoly támogató szerepet játszhatnának. Adott területeken működő terminálok hasonló szögben látnák a ballonokat, mint a műholdakat. A területi lefedettséget és a szolgáltatás minőségét tovább növelné, hogy a lényegesen alacsonyabban működő átjátszók (néhány száz méteres magasság a több száz, esetleg ezer kilométer helyett) nagyobb vételi jelszinteket lennének képesek nyújtani. Ez hatótávolság és szolgáltatás biztonság növekedéssel, valamint a takarásban lévő területek jobb ellátásával járna együtt.

Összességében megállapítható, hogy a ballonok elsődleges alkalmazási módja az ISR platformok hordozása, másodlagos a kommunikációs átjátszó állomások hordozása, mely nem zárja ki az egyidejű telepítést és alkalmazást. Ennek egyik fő oka a költségekben mutatható ki. Napjainkban egyik fő alkalmazási platformja a kis magasságú kötött léghajók formájában történhet. Az erőkövető rendszerek vezeték nélküli kommunikációs interfészének támogatására is jól alkalmazhatóak lennének az alacsony magasságú kötött léghajók. Fontos kiemelni, hogy támogatására, megerősítésre és nem kiváltására, mert az alacsony adatforgalmi igény esetén a műholdas csatornák bérlése még mindig kifizetődőbb egy teljes ballonos rendszer üzemeltetésénél.

Megítélésünk szerint a ballonos platformokon elhelyezhető adaptív antenna rendszerek fejlesztése [38][39][40][41], illetve kis magasságú kötött ballonok alkalmazási lehetőségei a katasztrófavédelmi feladatok [42][43][44] kommunikációs igényeinek kiszolgálása tükrében újabb tudományos kutatásokat indukálhatnak.

Magyarország számára jelen gazdasági körülmények között, egy lehetséges opciót jelenthet a kis magasságú kötött ballonok alkalmazása néhány tucat készlet erejéig, amelyet célszerű úgy kialakítani, hogy helyet kapjanak rajta egyidejűleg ISR szenzorok (elsődlegesen kamera) és rádió átjátszó pontok. Természetesen „csak” támogató, megerősítő szerepkörben, nem kiváltva komplett hálózatokat, növelve az igénybe vehető eszközök spektrumát, biztosítva a parancsnokok számára a feladathoz leginkább illő platform kiválasztásának lehetőségét.

BEFEJEZÉS

Megvizsgálva a létező pilóta nélküli lebegő eszközök által nyújtott lehetőségeket, megállapítható, hogy léteznek olyan technológiák, amelyek képesek támogatni akár a katonai alkalmazások modern távközlés technikai igényeit. A történelmi példák alapján belátható, hogy a ballonok és repülő eszközök közötti versenyből eddig túlnyomórészt a repülők jöttek ki győztesként, és egyes nemzetközi tanulmányok alapján [2], ez a jövőben sem várható másképp. Ezen tényeket figyelembe véve, a ballonok alkalmazása előtti döntés során nagyon alapos mérlegelést kell

[23] ISAF Force Tracking System – (NATO) ISAF afganisztáni erőkövető rendszere
[24] Force XXI Battle Command Brigade and Below Blue Force Tracking – USA XXI. századi Dandár és az alatti harcvezető és erőkövető rendszere
[25] Geosyncron Earth Orbital – Geoszinkron Föld körüli pálya

végezni, azonban megállapítható, hogy egyes, a tudományos közleményünkben is feltárt esetekben célszerű lehet a ballonok alkalmazása. Megítélésünk szerint alkalmazásuk akkor indokolt, ha az általuk kínált speciális képességek (pl.: hosszú idejű egy magasságban lebegés) súlyozottan vannak jelen döntési mátrixunkban.

A magyar viszonyokat vizsgálva egy kiegészítő, támogató feladatokat ellátó kötött léghajó flotta nem kerülhet a légierő jelenlegi költségvetésének a többszörösébe. Ezen tényezők miatt szinte egyetlen elfogadható opció az alacsony költségű kis magasságú kötött ballonok lehetséges alkalmazása maradt.

Dolgozatunkban a kitűzött kutatási eredményeket elértük, felkutattuk, rendszereztük a jelenleg elérhető kommunikációs átjátszó pontként üzemeltethető léghajókat, léggömböket. Rámutattunk a lehetséges alkalmazási lehetőségekre, meghatároztuk azok gyenge pontjait, valamint javaslatot tettünk egy reális, honi szinten is használható platform alkalmazására.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Károly Krisztián: MILITARY BALLOONING IN POINT OF HUNGARIAN DEFENSE FORCE'S COMMUNICATION SUPPORT, Repüléstudományi Közlemények XXVIII. évfolyam 2016. 1. szám pp. 27-39. HU ISSN 1789-770X

[2] David GRACE, Tao JIANG, Sandy ALLSOPP, Laurent REYNAUD, Mihael MOHORCIC: Aerial Platforms Study, Integrated Project ABSOLUTE, FP-7-ICT-2011-8-318632-ABSOLUTE/D2.3, 30/10/2013 (online) url: http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/2/318632/080/deliverables/001-FP7ICT20118318632ABSOLUTED23v10isa.pdf (2015.10.20.)

[3] 60 Days of Drones, Day 2: Global Hawk (online) url: http://phasezero.gawker.com/60-days-of-drones-day-2-global-hawk-1714377588 (2015.11.17.)

[4] What you need to know about commercial drones (online) url: http://www.engadget.com/2014/06/13/commercial-drone-explainer/ (2015.11.17.)

[5] 1178/2011/EU rendelet a polgári légi közlekedéshez kapcsolódó műszaki követelményeknek és igazgatási eljárásoknak a 216/2008/EK európai parlamenti és tanácsi rendelet értelmében történő rögzítéséről, 2011.11.3. I. melléklet

[6] Airships: a second age (online) url: http://www.telegraph.co.uk/news/science/7918762/Airships-a-second-age.html (2015.11.17.)

[7] Aerospace Industry: Satellite communication (online) url: http://arizonaexperience.org/innovate/satellite-communications (2015.11.17.)

[8] Helikete hivatalos oldala (online) url: http://www.allsopp.co.uk/index.php?mod=page&id_pag=5 (2015.11.7.)

[9] Ványa László: A léggömbök, léghajók és katonai alkalmazásuk, In. Bolyai Szemle, 6. évfolyam, 1. szám, pp. 70-85. ISSN 1416-1443, 1997.

[10] Ványa László, Bernáth Balázs: A repülő légibázis – adalékok a katonai léghajózás történetéhez, In: Bolyai Szemle, 7. évfolyam 1. szám, pp. 93-106. ISSN 1416-1443, 1998.

[11] 1001/2012 (I. 11.) kormányhatározat Magyarország Honvédelmi Minisztériuma (Fegyverzeti és Hadbiztosi Hivatal) és a Svéd Királyság Försvarsexportmyndigheten (Svéd Védelmi és Biztonsági Export Ügynökség) elnevezésű szervezete között a JAS-39 Gripen típusú repülőgépek bérletével kapcsolatos részletes feltételeket tartalmazó Bérleti Megállapodásban foglalt bérleti időszak módosítására vonatkozó megállapodás aláírásáról szóló felhatalmazásról, Magyar Közlöny 2012/003. szám

[12] Rise of the Blimps: The US Army's LEMV Defense Industry Daily, 2013. 10.24. (online) url: http://www.defenseindustrydaily.com/Rise-of-the-Blimps-The-US-Armys-LEMV-06438/ (2015.10.20.)

[13] Stratobus project takes off, 2016. 04. 26. (online) url: https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/stratobus-project-takes (2017.03.19.)

[14] X company Loon project (online) url: https://x.company/loon/ (2017.03.19.)

[15] Raven Aerostar hivatalos oldala/ HIGH ALTITUDE PLATFORMS (online) url: http://ravenaerostar.com/products/high-altitude-balloons/product-overview (2015. 11.7.)

[16] $14M+ for Blimps in Iraq, Defense Industry Daily, 2005. 04. 20. (online) url: http://www.defenseindustry-daily.com/14m-for-blimps-in-iraq-0387/ (2015.10.20.)
[17] Andreas PARSCH: *Tethered Aerostats* Appendix 4 (online) url: http://www.designation-systems.net/dusrm/app4/aerostats.html (2015.10.20.)
[18] Blimps for Marines in Iraq Defensetech, 2005. 04. 14. (online) url: http://defensetech.org/2005/04/14/blimps-for-marines-in-iraq/ (2015.10.20.)
[19] TCOM kötött léghajó platformok, (online) url: http://www.tcomlp.com/aerostat-platforms/ (2015.11.3.) alapján szerkesztette a szerző
[20] SIGNAL magazin (online), ISSN 0037-4938 url: http://www.afcea.org/content/?q=taxonomy/term/1038 (2015.11.3.)
[21] The USA's RAID program: Small systems, big survaillence time, 2014.04.15. (online) url: http://www.de-fenseindustrydaily.com/the-usas-raid-program-small-aerostats-big-surveillance-time-02779/ (2015.11.3.)
[22] TCOM tactical class aerostat platforms (online) url: http://www.tcomlp.com/aerostat-platforms/tactical-class-aerostat-systems/ (2015.11.7.)
[23] Az ABSOLUTE projekt hivatalos oldala (online) url: http://www.absolute-project.eu (2015.10.29.)
[24] A CAPANINA projekt hivatalos oldala (online) url: http://www.capanina.org (2015.10.29.)
[25] A helikite platform hivatalos oldala (online) url: http://allspp.co.uk (2015.10.29.)
[26] Seth ROBSON: Part blimp, part kite: Military testing Helikite for use over Afghan skies, Stars & Stripes, 2012.05.20. (online) url: http://www.stripes.com/news/middle-east/afghanistan/part-blimp-part-kite-military-testing-helikite-for-use-over-afghan-skies-1.177779# (2015.11.6.)
[27] A helikite hivatalos forgalmazójának árkatalógusa, 2015. november 7. (online) url: http://www.all-sopp.co.uk/index.php?mod=page&id_pag=35 (2015.11.7.)
[28] Gulyás Attila: Kognitív üzemmódok katonai alkalmazása, In: Seregszemle, XIV. évf. 1. szám, pp. 59-76, 2016. HU ISSN 2060-3924
[29] A skysite platform hivatalos oldala (online) url: http://www.spacedata.net/ (2015.11.4.)
[30] Kolbert András: Ballont eresztettünk a pesti zivatarba, index.hu, 2014.04.30. (online) url: http://index.hu/tu-domany/2014/04/30/ballont_eresztettunk_a_pesti_zivatarba/ (2015.11.4.)
[31] A Robot-Air Kft. honlapja (online) url: http://www.robotair.eu/hu/hatarrendeszeti-alkalmazasok (Letöltés ideje: 2017.03.19.)
[32] BHE: BMR Solution, Aerostat Observation System (online) url: http://www.bhe-mw.eu/sites/default/files/fi-les/documents/bhe_bmr_solution.pdf (2017.03.21.)
[33] Balog Fatime, Fekete Csanád, Németh András, Németh József Lajos: A hibrid hadviselés különös tekintettel a mobilkommunikációra, In: Hadmérnök, X. évf. 4. szám, 2015. december, ISSN 1788-1919, pp. 127-137.
[34] Gulyás Attila: Hazánk biztonságpolitikai környezete változásainak kronológiai elemzése a nemzetközi terrorizmusellenes harc tükrében I. rész, In: Seregszemle, XIII. évf. 2-3. szám, pp. 7-25, 2015. HU ISSN 2060-3924
[35] Gulyás Attila: Hazánk biztonságpolitikai környezete változásainak kronológiai elemzése a nemzetközi terrorizmusellenes harc tükrében II. rész, In: Seregszemle, XIII. évf. 4. szám, pp. 7-23, 2015. HU ISSN 2060-3924
[36] Gulyás Attila: Force Tracking System in SOF applications, In: AARMS 2009 Volume 8 Issue 4 ISSN 1588-8789 pp. 601-617.
[37] Gulyás Attila: Field identifications in SOF applications, In: AARMS 2012 Volume 10 Issue 3 ISSN 1588-8789 pp. 469-481.
[38] Németh András: *Adaptív antennarendszer szimulációja*, In: Kommunikáció 2003. Budapest, ZMNE, 2003. ISBN 963-86228-6-2 pp. 245-253.
[39] Németh András: *Adaptív antennarendszer hardverének realizációja*, In: Bolyai Szemle 2004/1. Budapest, ZMNE 2004. ISSN 1416-1443 pp. 75-83.
[40] Németh András- Folkmann Viktor: *Direction Finding Based on Adaptive Antennas*, In: Radioelektronika 2002, 12th International Czech-Slovak Scientific Conference, Pozsony, Műszaki Egyetem, 2002. ISBN 80-227-1700-2 pp. 1-4.
[41] Németh András- Folkmann Viktor: *Iránymérés adaptív antennarendszerrel*, In: Híradástechnika, 2004/3. Budapest, HTE, 2004. ISSN 0018-2028 pp. 49-54.
[42] Németh András: A katasztrófavédelmi kommunikáció alternatív megoldásai, In: Kommunikáció 2006. BP. ZMNE 2006. ISBN 978-963-7060-31-1, pp. 227-255.
[43] Németh András: Távlati műholdas megoldások a katasztrófavédelmi kommunikáció területén, In: Kommu-nikáció 2007, Bp. ZMNE 2007. ISBN 978-963-7060-31-1, pp. 47-55.
[44] Rácz Réka Magdolna: The function of the system of national defence and disaster management in the disaster management structure, In: AARMS Vol. 10, No. 1. 2011. ISSN 1588-8789 pp. 173-181.

LOW ALTITUDE BALLOONING IN THE POINT OF HUNGARIAN DEFENSE FORCE'S COMMUNICATION SUPPORT

The balloons live renaissance of their military applying nowadays. They were found as ISR platforms holders and communication relays on the Iraq's and Afghanistan's battlefields. There is an advanced demand to connect the far and blocked areas. In this paper we can provide an alternate solution opposite the expensive satellite communication. We study in our paper the tethered and autonomous high or low altitude platforms, how can we deploy as a military communication relay? We show the international examples and we write about the possibilities of the Hungarian applications.

Keywords: *balloon, low altitude platform, high altitude platform, communication relay, radio*

Károly Krisztián (MSc) doktorandusz Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola krisztian.karoly@mil.hu orcid.org/0000-0002-5835-7980	Károly Krisztián (MSc) PhD aspirant National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering krisztian.karoly@mil.hu orcid.org/0000-0002-5835-7980
Mikó Gyula (MSc) doktorandusz Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola gymiko@gmail.com orcid.org/0000-0002- 2653-7645	Mikó Gyula (MSc) PhD aspirant National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Doctoral School of Military Engineering gymiko@gmail.com orcid.org/0000-0002- 2653-7645

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-21-0397-Karoly_K-Miko_Gy.pdf

Foroozan Zare, Árpád Veress

AERODYNAMIC REDESIGN AND ANALYSIS OF A RESEARCH JET ENGINE – VIRTUAL PROTOTYPING OF GAS TURBINE COMPONENTS

Today's the gas turbines are the only relevant propulsion systems for high speed commercial and military applications in aeronautics and they are widely used in other segment of the industry too. A research project has been completed to redesign a 330 N thrust low size jet engine to be used for academic purposes. This article introduces the main steps required to design and analyse such a system in aerodynamic way. The jet engine has a single-stage centrifugal compressor having 2.5:1 pressure ratio at 43,000 RPM, a direct-flow annular combustion chamber and a single-stage axial turbine with 1000 K turbine-inlet temperature. Following the design, 3D CAD model of the engine has been created for fluid dynamics and heat transfer analysis. The results of the CFD simulations are compared with the available measured data for validation purposes and conclusions are drawn about the effectivity of the used analytical and numerical methods.

Keywords: *Low-sized jet engine, engine design, CAD modelling, CFD, validation*

Nomenclature

A	Flow area [m^2]
B	Boundary layer blockage [-]
b	Meridional depth of passage [m]
C_p	Pressure coefficient [-]
c	Absolute velocity [m/s]
D	Diameter [m]
f	Fuel to air mass flow rates ratio [-]
h	Chord [-]
L_0	Theoretical air mass required to burn 1 kg fuel at stoichiometry condition, [kg/kg]
m	Mass of flow rate [kg/s]
N	Rotational speed [rev/min]
p	Pressure [Pa]
R	outer radius [mm]
r	Radius [mm], Degree of reaction [-], Pressure recovery factor [-]
SFC	Specific fuel consumption [kg/(h/ N)]
T	Temperature [K], Thrust [N]
$TSFC$	Thrust Specific Fuel Consumption [kg/(kN h)]
t	Pitch [-]
U	Absolute velocity [m/s]
u	Blade speed [m/s]
V	Flight Velocity [m/s]
w	Relative velocity [m/s]
z	Number of blade [-]

Greek Symbols

α	Absolute direction [-], Inlet flow angle [deg]
β	Relative direction [-]
4	Diffuser exit
$0\text{-}9$	Engine cross sections
ε	Cross section decrement [-]
η	Efficiency [-]
ρ	Density [kg/m^3]
δ	Boundary layer thickness [m]
ϕ	Speed factor [-]
η	Efficiency [-]
π	Total pressure ratio [-]

Subscripts and Superscripts

a	Ambient
b	Burning
C	Compressor
cc	Combustion chamber
D	Diffuser
f	Fuel
h	Hub
i	Impeller
m	Meridional direction, Mean (radial) Mechanical
n	Nozzle
r	Rotor
s	Stator, Isentropic, Specific
st	Stoichiometric condition
t	Tip
T	Turbine
°	Degree
0	Stagnation or total condition
1	Impeller inlet or eye
2	Impeller outlet or tip
3	Diffuser leading edge; Shroud location for vaneless diffuser

Abbreviations

CFD	Computational fluid dynamics

INTRODUCTION

Numerous leading technologies are established in the aeronautical sector, wide spectrum of researches and developments are in progress in that areas ([1] and [2]) in which the propulsion systems of the aircrafts are also included [3]. Todays, the application range of the gas turbine engines has increased significantly. This is especially true for the jet engines, which are the only applicable propelling systems of the high power commercial and military airplanes these days.

Moreover, the gas turbines are employed also in the other parts as oil, gas and energy production. In spite of the fact that those engines in comparison with piston ones don't have high thermal efficiency ("28 to 40%") they have substantial advantages in powerfulness, power density (power of the engine/mass of the engine), compactness, streamlining, simplicity and low maintenance cost demands. These engines are less sensitive for the overloads and they produce less vibration due to the well balanceable and rather axisymmetric rotational components. The gas turbines have high availability (" ~97%") and reliability ("> 99%"), they have low emission (there is no lubricant in the combustion chamber and no soot during transient loads) they contain less moving parts and represent less sensitivity for the quality of the fuel compared to the piston engines. Additionally, there is no need for liquid-based cooling system, but the maximum allowable temperature ("~ 1500 C°") at the turbine inlet section must be limited due to the metallurgical reasons [4].

The small sized gas turbines are widely used for ground-based, vehicular applications, starter engine, APU (Auxiliary Power Unit) and research jet engine in academic applications due to low weight, easy to move and relative low cost. Furthermore, the utilization of this kind of engines has increased significantly as they are also applicable for remote-control airplanes or on unmanned aerial vehicles (UAVs) due to high thrust to weight ratio [5].

The small gas turbine includes power delivery under 5 MW. Typically, they are consisting of centrifugal compressor, combustion chamber and axial turbine. The centrifugal compressors have several advantages in compared with axial compressors especially for small gas turbines, at which the sizes are smaller and so the boundary layer thickness (δ) is relatively high. The centrifugal compressors are shorter, simpler and cheaper constructions and the blade numbers per stage is less than in case of axial compressors. The centrifugal compressors has higher pressure ratio per stage, they can resist better for surge and for impact of flying object. These types of compressors can fit to systems better with high pressure drop, because the outlet velocity is less. They have favourable isentropic efficiency below 5 kg/s mass flow rate, it is easier to balance, they are not much sensitive to the sudden variation of mass flow rate in time than the axial compressors. The operation and the maintenance of the centrifugal compressor are cheaper, they have low power consumption at starting phase, higher reliability and longer lifetime.

Nowadays the demand for different calculation methods is enhanced, significant numbers of researches are in progress with applying these approaches in the mechanical engineering ([2], [6] and [7]). This is due to fact that high amount of cost, time and capacity can be saved by using well established and accurate design and analyses methods based on analytical, empirical or numerical solutions. The frontloading product development reconfigures the conventional design processes and several sampling phases can be omitted by the virtual prototyping.

Moreover, there is another aspect, according to which the modelling and simulation is more important in case of complex systems as gas turbines for example. The development namely, in general, can be classified by the two limiting cases based on the number of the products. The lower bound is called project related developments, which means that the effort turns to realize only one product (as a new building, a special ship or other machine for example), meanwhile the upper limit, the product based developments refer to the development of high number, sometimes millions of the products. The project related developments are characterised to be more costly, there are no sampling phases and there are tests by previously because the first product will be the final one in general. In contrast with that, the product based developments involve low cost products in general and measurements are often the cases in the sampling phases. The schematic about the range between the project and product related developments are shown in Figure 1. It is clear by the mentioned number of the products that the jet engines are more close to the project based developments, so the emphasize in design and developments are rather based on the modelling and simulation, which makes the design and also theses system cost effective and guarantees the safety and reliability.

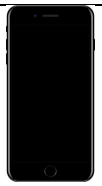
Project related developments				**Product related developments**
				
Chain Bridge, Budapest [20]	Delivered Airbus A380 till May 2017 [21]	Built GE90 high by pass turbofan aircraft engines till 2014 [22]	Delivered new generation MB Actros since 2015 [23, 24]	Sold Jet Black iPhone 7 since 2007 till 2016 [25]
1 pcs	**213 pcs**	**2000 pcs**	**100,000 pcs**	**1 billion pcs**

Figure 1. The solution and product related developments

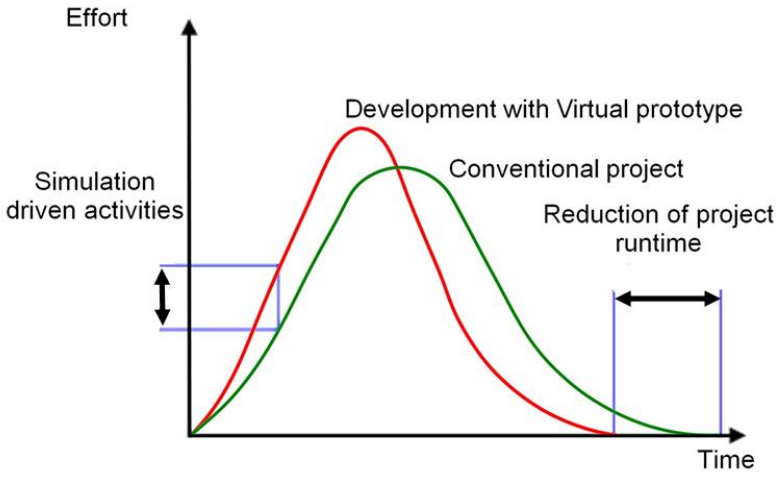


Figure 2. The impact of the virtual prototyping

In the most of the development processes, the available design variants are analysed by different calculation disciplines and design modifications are made if the characteristics are not matching

with the expected specifications or other constraints are violated. The presented loop is going on till the desired structure is available. The Figure 2 illustrates the impact of virtual prototyping on the time reduction and effectivity increment by using simulation driven product development. Of course, not the all design phases can be omitted by virtual prototyping. Measurements for validation purposes are indispensable to have at each design milestone.

The one of the main goals of the present research was to develop, apply, verify and validate aerodynamic development procedure of small jet engine corresponds to simulation driven product development.

DESIGN PROCESS OF THE GAS TURBINE

Developing a new engine is a difficult and complex task that can be separated into numerous steps, ranging from the definition of the engine specifications to the delivery and instruct of the very first engine. Although each engine manufacturer have own guideline for the design of gas turbine engine, a general representation of the development process can be found in [8] and it is shown in Figure 3. The design process is set up to five main phases following the specification state. The first one is the preliminary studies and the second one is the determination of the thermodynamic design point. They are followed by the aerodynamic design and analyses of the gas turbine components, mechanical design and finally the detailed design and preparation for production [8]. It is important to mention that the all steps have different crosschecking and confirmation loops in order to guarantee that design goals are achieved [8].

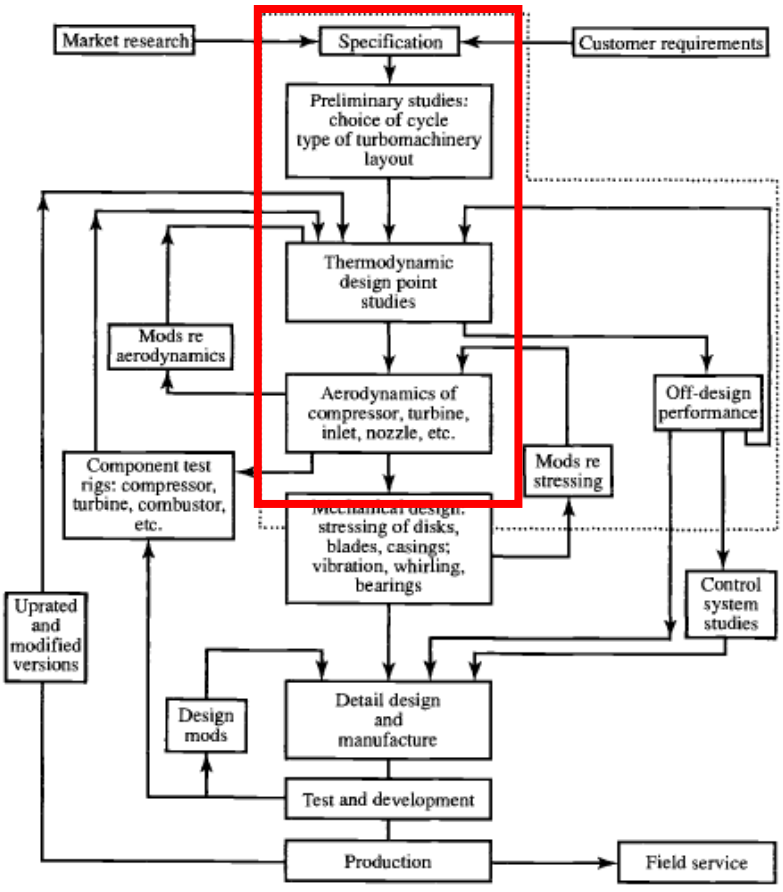


Figure 3. General design process for gas turbine engines [8]

Regarding the present research, the specification was given to redesign a small-sized research jet engine used for academic purposes.

The design process started with developing a mathematical model for the thermo-dynamical analyses by means of a concentrated parameter distribution type method in Matlab environment. This model was used to determine Thrust Specific Fuel Consumption – Specific Thrust map in the function of turbine inlet total temperature and total pressure ratio of the compressor.

Following the determination of the expected operational point, the main geometrical sizes of the engine and the necessary RPM were determined.

The next step of the process was the mean line and 3D design of the engine components as compressor, combustion chamber, turbine and nozzle, by which the all necessary dimensions for creating the 3D geometry of the jet engine were determined. This status is found in the box of "Aerodynamics of compressor, turbine, inlet, nozzle etc." in Figure 3 and it is the last contribution of the design steps found in the red box, which contains the all design steps performed in the present work. However, the key word in the actually presented work is the virtual prototyping, which means that simulations (analyses) were completed following the detailed design and before manufacturing to crosscheck the correctness of the process and initiates design modification in case of need within the frame of the front loading design activities or design loop in other words.

GENERAL CONCERNS AND DESIGN ASPECTS

For designing the turbojet engine, it is essential to predetermine the method of calculating the characteristics in any particular cases for the specific values of the design variables. The design variables in this context mean the turbine inlet total temperature and the compressor total pressure ratio meanwhile the characteristics are the trust specific fuel consumptions in the function of the specific thrusts at previously imposed pressure losses and isentropic efficiencies. In order to find the corresponding ranges of the design variables, the pressure losses and isentropic efficiencies are estimated based on previous literature research close to the expected operational condition, and for the simplicity, they are kept to be constant in each point to be calculated. The turbine inlet temperature has strong effect on the specific thrust. In general, keeping the engine as small-sized as possible for a given thrust is possible by having the highest maximum allowable value of TIT with concerning the metallurgic reasons as limitation. Furthermore, the increase in pressure ratio of the compressor will obviously cause decrease in the specific fuel consumption. Therefore increasing specific thrust by increasing the total temperature at turbine inlet section is more essential in case of small engine when a decrease in the drag and weight is required. At constant value of turbine inlet temperature, increasing pressure ratio first leads to rising specific thrust and finally decreases that. The maximum specific thrust can be determined by the maximum allowable turbine inlet temperature and optimal pressure ratio of the compressor belongs to the maximum thrust. It is obvious that for any certain/smaller value of pressure ratio and temperature of turbine inlet section, the specific thrust is decreased and the specific fuel consumption is increased.

Regarding the turbine inlet total temperature and compressor total pressure ratio, the following aspects can be considered. High turbine inlet temperature can cause to increase the complexity of the structure and cost due to the application of cooled turbine blades and expensive alloys. Additionally, it is important to note that increasing pressure ratio enhanced engine weight, complexity and cost due to the need for more stages and multi spool configurations in extreme. These conditions are opposite with the needs, where the goal is to create a low cost academic jet engine.

REDESIGN PROCEDURE OF THE TURBOJET ENGINE

The origin of the presently redesigned jet engine is TSz-21 starter gas turbine used for MiG-23 and Szu-22 Russian fighters. The TSz-21 engine has been modified to be a research jet engine from 2005–2008 but it is still under development with especial care for control [10].

The goal of the actual work is to introduce, apply and verify a design process for small-sized jet engine and analyse the results by using CFD method with validation by the available measured data.

The jet engine under interest is a compact lightweight and possibly low-cost system that is adequate to create around 330 N thrust at steady state ambient conditions for academic and research purposes.

The following subchapters introduce the applied design methods as thermo-dynamical cycle analyses with determination of the design point, mean line and 3D design of the compressor, combustion chamber, turbine and nozzle.

Thermodynamic analysis of the research turbojet engine

The mathematical model was developed and used to determine the operational points and performances of the small turbojet engine. The method is introduced in detail in [9]. The following design criterions and assumptions are made in the thermo-dynamical model. Ambient pressure and temperature of air are 99,000 [Pa] and 300 [K] respectively, the fuel is assumed to be liquid kerosene with a heating value of 42,700 kJ/kg and nozzle is unchoked. The considered parameters of total pressure recovery factors and efficiencies are found in Table 1.

	Total pressure recovery factors of combustion chamber (r_{cc}), and intake duct (r_d) and efficiencies of the cycles as mechanical (η_m), nozzle (η_n), burning (η_b), compressor ($\eta_{C,s}$) and turbine ($\eta_{T,s}$) isentropic respectively						
Parameters	r_{cc}	r_d	η_m	η_n	η_b	$\eta_{C,s}$	$\eta_{T,s}$
Input data	0.94	0.96	0.99	0.95	0.96	0.7	0.8

Table 1. Specified parameters of turbojet engine by the previous experiences

The next step is to determine the expected design point of the jet engine. Hence, first, the performance map of the engine has been created, where the thrust specific fuel consumption values are plotted in the function of the specific thrust, turbine inlet temperature and total pressure ratio of the compressor. By this way, the effect of compressor pressure ratio on air mass flow rate is excluded; the variation in compressor pressure ratio does not change the mass flow rate

across the engine at the same temperature (unchoked engine operation). The outputs of the cycle analyses are used to determine the points of the functions according to (1-2) respectively [18].

$$T_s = (1 + f_{cc})(V_9 - V_0) + \frac{(1+f_{cc})}{\rho_9 V_9}(p_9 - p_0) \tag{1}$$

$$SFC = \frac{f_{cc}}{T_s} \tag{2}$$

The performance map is shown in Figure 4. For designing the jet engine, the basic thermo-dynamic parameters to be determined by the designer are the compressor total pressure ratio (π_C) and turbine inlet temperature (T_{04}).

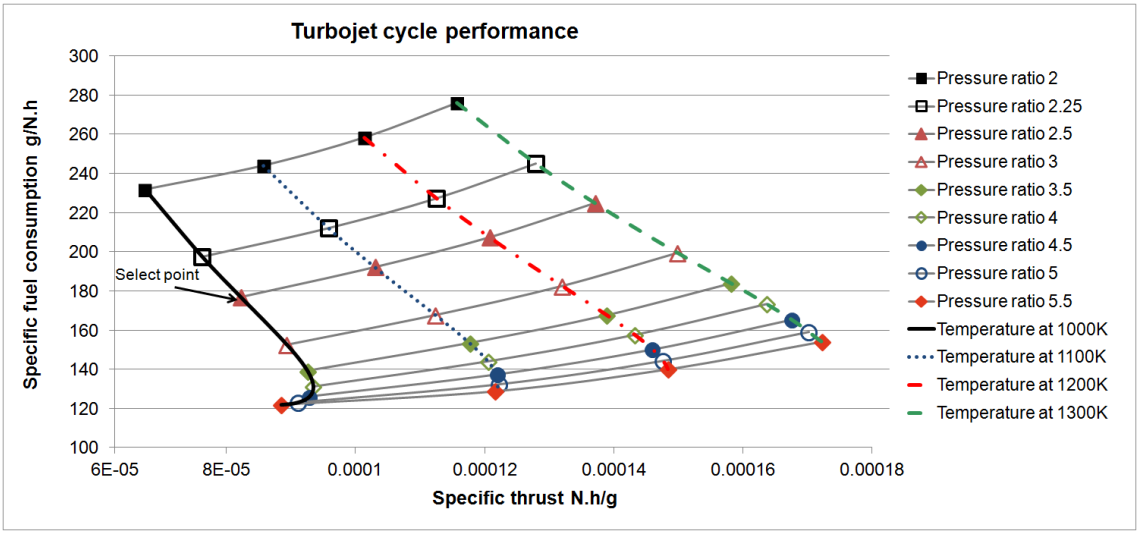


Figure 4. Cycle performance curves

A total pressure ratio 2.5 was selected in the present case to be a reasonable compromise within the investigated range. As to achieve high pressure ratio, it is required to consider higher dimensions, performances and/or advanced production technology, which cannot be afforded by university purpose in the recent conditions. 1000 K turbine inlet temperature was selected with considering that there is limited access for using high-tech cooling technology and advanced materials for the turbine blades. The specific thrust was 309.6 Ns/kg at this point.

So, by having the specific thrust and thrust of the research jet engine it can be able to determine the mass flow rate by the following way:

$$\dot{m}_{air} = \frac{T}{T_s} = \frac{330}{309.6} = 1.065\ \frac{kg}{s} \approx 1\frac{kg}{s} \tag{3}$$

The real thermo-dynamical cycle of the engine in T-s diagram is plotted in Figure 5. The red curves (with smaller thickness) represent the constant pressures. The processes between the engine states denoted by numbers are plotted by thicker lines. This visualization effect is the reason of constant pressure lines goes below the process line in case of pressure decrement just after section “3”.

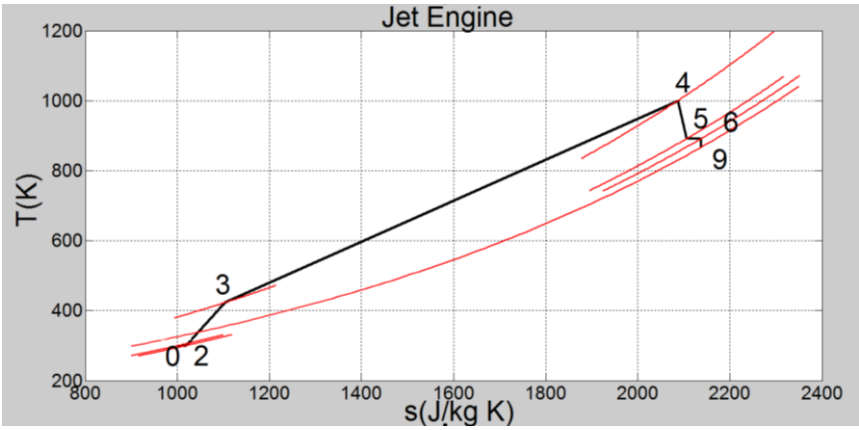


Figure 5. The T-s diagram of research jet engine with single spool

After completing the thermodynamic analysis based on the required design specifications, the next step is to determine the main geometrical sizes of the engine components and the RPM belongs to design point according to [18].

Compressor design and analysis

Centrifugal compressors are utilized most prevalently in gas turbine engines, gas transportation industry and turbochargers of internal combustion engines [11]. Several researches and developments have been completed with relating of centrifugal compressors as [12]-[15] for example so far.

For a small, compact and light-weight jet engine with 2.5 total pressure ratio, the selection of a single-stage centrifugal compressor is reasonable. Using the design data from the thermodynamically cycle analysis and the main geometrical sizes of the jet engine with the engine speed, the impeller and diffuser were designed by the procedure outlined in [16]. The equations used here are based on the common thermodynamic and aerodynamic principles in a mean stream line. The input data of the mean line design for the centrifugal compressor are given in Table 2. There are three variables amongst them as B_1, $\eta_{r,s}$ and C_{pD}, which represents the boundary layer blockage, isentropic efficiency of the rotor and pressure coefficient of the vanned diffuser respectively and these are determined by experiences [16]. The output of the process is the main dimensions of the compressor, the velocity triangles and the thermodynamical parameters.

Input parameters of the centrifugal compressor			
p_0	99,000 [Pa]	B_1	0.057 [-]
T_0	300 [K]	N	43,000 [rev/min]
$\dot{m}$	1 [kg/s]	$\eta_{r,s}$	0.78 [-]
α_1	0 [deg]	C_{pD}	0.65 [-]
r_{1h}	0.0022 [m]	z	20 [-]
r_{1t}	0.0052 [m]		

Table 2. Design specification and the results of the centrifugal compressor

The 3D model of the assembly was prepared according to the main dimension, which is shown in Figure 6 in the meridional view.

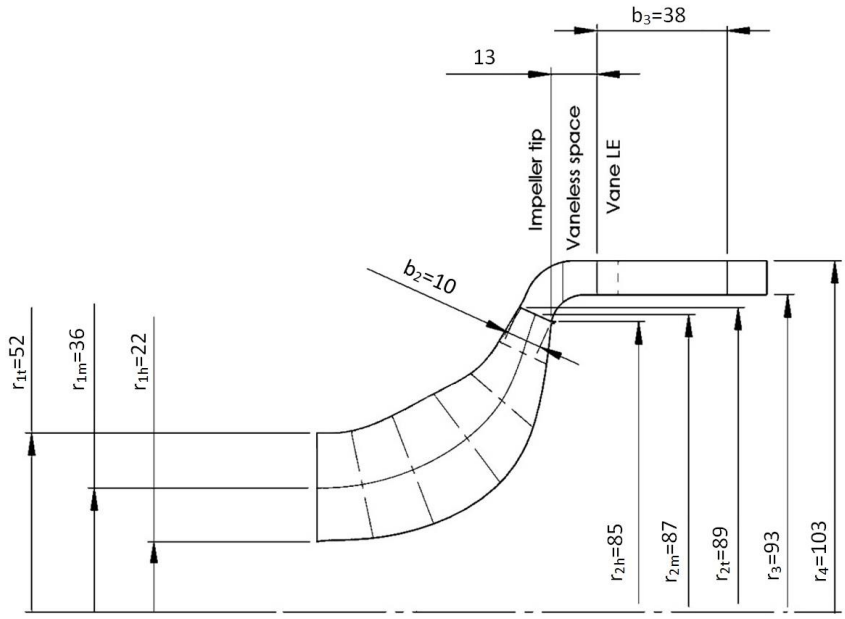


Figure 6. Meridional view of centrifugal compressor (the dimensions are in [mm])

Design aspect of the combustion chamber

The combustion chamber has the challenging task of burning certain amount of fuel that is supplied through the fuel burners with wide range of volume of air. The air leaving the compressor goes through the combustors, expanding and accelerating to give a smooth stream of uniformly heated gas at all conditions required by the turbine. The fuel is burned almost stochiometrically with only 25 to 35 percent of total air entering [17] and it is 28 % in the present case ($\dot{m}_{fcc} = 0.019\frac{kg}{s}, \mathrm{L}_0 = 14.72\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{kg}} \Rightarrow \dot{m}_{air,st,cc} = \dot{m}_{fcc}L_0 = 0.2797$), the combustors in order to keep the turbine inlet temperature down to permissible limits. As a result, combustion must be completed without causing high pressure loss and taking into consideration the huge heat release for the limited space existing. In providing adequate turbulence and mixing, a total pressure loss changing from about 2 to 9 percent of the air pressure at which it goes through the chamber [17].

For many years the combustion has had less capability to theoretical treatment in comparison with other parts of the gas turbine and any development software involved some trial and error. With high cycle temperature of modern gas turbine, mechanical design stays complex task and need for improvement of technical development is obvious. Concerning the industrial gas turbines they have a certain range of usable types of fuel amongst them natural gas is included frequently beside the liquid based hydrocarbons [17].

Combustion chambers can be distinguished based on their structure. Regarding flow direction, reverse-flow and one-directional flow combustion chambers exist.

The reverse-flow combustion chambers have the advantage of obtaining shorter gas turbine design, because the flow path is shortened by half in one direction as the combustor is located to sit on perimeter of the compressor and turbine. Thus this design does not require so improved shaft materials and bearing design compared to the one-directional flow combustion chambers. Due to this, the reverse-flow combustion chambers are basically applied on older gas turbines,

however, where a short and compact design is required, this combustion chamber is still applied nowadays. As a disadvantage, reverse-flow combustion chambers have high pressure losses compared to one-directional chambers. Furthermore, due to the noticeable cross section, reverse-flow combustion chamber produces high aerodynamic drag, thus they are very rarely used in aircraft propulsion systems.

Although gas turbines, which are applied with one-directional flow combustion chambers are longer, hence better shaft materials and improved bearing designs are required, due to the lower cross section and better total pressure recovery factor and burning efficiency; they are more widespread in aviation industry.

Regarding the one-directional flow combustion chambers, there are three main types of the structure can be distinguished. They are the multiple can, can-annular and the annular type combustion chambers. All of the three kinds of combustors have the recirculation, burning and dilution zone. First of all, fuel is partially burned in the recirculation zone. But there is some fuel, which is not completely burned, so the remainder of fuel is completely burned in the burning zone. The hot gas is then mixed in the dilution zone with the cooling air and provides a suitable inlet temperature for the turbine section. One part of the cooling air works on the principle of film cooling, it separates hot working fluid from the walls of the combustor; hence higher operating temperatures can be allowed. Furthermore, appropriate application of cooling air contributes to flame stabilization and more even mixture distribution while proceeding to the turbine inlet cross section [17].

The combustion chamber design is a complex and challenging task in small gas-turbine engines due to the size limitation by means of couplings the compressor and turbine, typically constructive limitations on shaft length and diameter. These requirements have focused also in the present case to highlight a particular type of combustor, the annular combustion chamber. It is essential to mention that this kind of chamber is ideal because of “clean” aero-dynamic layout results in a compact unit of higher burning efficiency than other combustor types. In development of turbojet engines, the use of annular combustion chamber is confined to low pressure ratio, so for small gas turbines would seem to be more appropriate to apply an annular combustion chamber [17].

This kind of combustors includes a single flame tube, completely annular form, which is consisted in an inner and outer casing. At the front of compressor and the back of the turbine nozzle the chamber is open. The holes, which are placed in the shroud section of casing, allow the secondary air to enter the combustion chamber and guide the flame away from the shrouds to preserve the wall of the combustion chamber at a permissible relatively low temperature. The fuel at this type of combustor is entered through sequences of nozzle at the upstream end of the flame tube. This kind of combustor has the benefit of being able to use smaller cross section, achieve smaller pressure loss and 25% smaller structural mass if compared with can-type [17]. The other advantages of this kind combustor that the limited space available is used more effectively, allowing better mixing of the fuel and air within a fairly simple structure. Also more uniform combustion than in can type combustion chamber, better flame propagation and for the same output, it is 75 % shorter in general than the can-annular type chambers of the same di-

ameter, hence less weight, less production and maintenance cost may be achieved [17]. In addition there is less wall area needed in comparison with other types, consequently less cooling air, better combustion efficiency and less pollution are resulted.

Based on the all characteristics and consideration described above, for a small-scale academic gas turbine, due to its advantageous properties, an annular-type combustion chamber was selected for design. The combustor was created in the CAD model. The basic geometry of the gas turbine combustor is shown in the Figure 7. The primary inlet air is guided by the air a swirling velocity component. The injection diameter of the fuel is 0.8 mm. The secondary air is injected in the combustion chamber across 6 mm bores. The dilution bore diameters are 12 mm.

Turbine design and analysis

The short description of the turbine unit design has been introduced in the present subchapter.

The already calculated data came from the thermodynamic cycle analysis, from the computation of the main geometrical sizes of the engine and from the number of revolution were used for turbine design. The applied design process is based on [18] and carried out by using a one-dimensional procedure at the mean radius of turbine with the main goal of relating connection between the power, thermodynamical variables and velocity triangles. The 3D blade geometries in CAD software were prepared after considering blade twisting and profile generation.

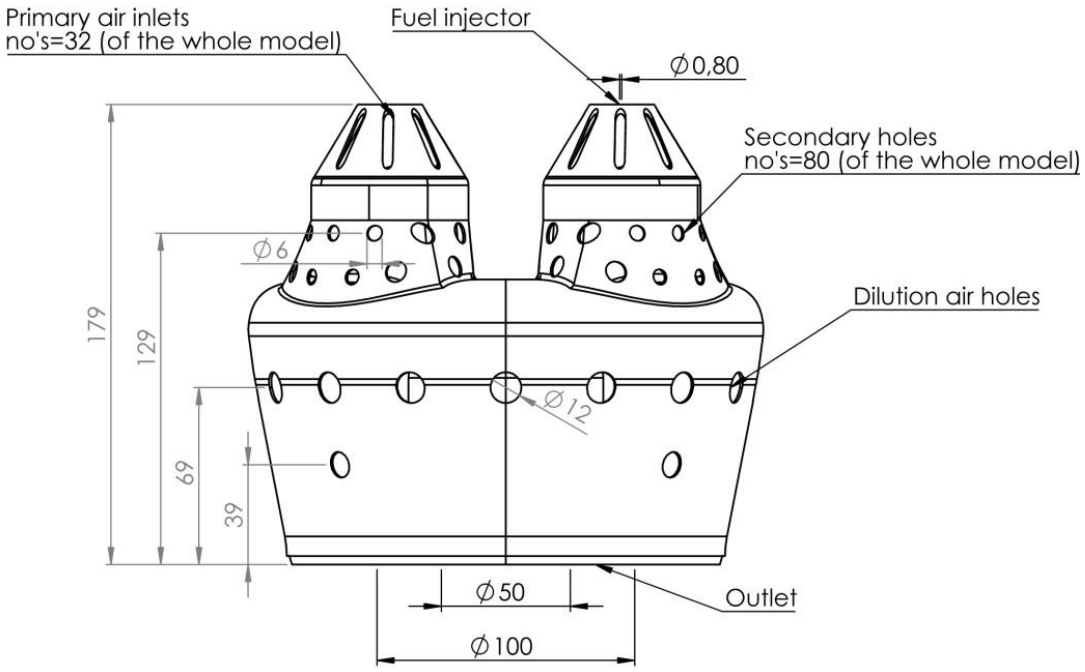


Figure 7. Basic geometry of the annular-type of combustion chamber (the dimensions are in mm)

The more detailed introduction of the design process is the following. The input parameters for the mean line design of the turbine were the inlet total pressure and temperature, mass flow rate, RPM, pressure ratio of the turbine, enthalpy drop and target efficiency. The number of revolution was the same as it was used in the centrifugal compressor design of course and the static structural stress analysis was completed by using simple analytical equation to check the integrity of the turbine blades. In addition, during the design of turbine some values were prescribed

as design parameters. These were the degree of reaction, speed factor and stage loading. The output or calculated parameters of the design process were the stage number, the number of the blades, velocity triangles and the thermodynamical parameters in the each section of the stage. Constant degree of reaction blade twisting was applied in the process to guarantee the expected advantages of radial equilibrium in 3D. Finally, the blade profiles were created by using the method of camber line preparation from profile catalogue and the geometrical model of the turbine stage in 3D was created in Solid Edge environment.

Input parameters of axial turbine			
r^o	0.2 [-]	p_0	244930 [Pa]
φ_s	0.98 [-]	T_0	1000 [K]
φ_r	0.94 [-]	π_T	1.96 [-]
ε	0.96 [-]	N	43000 [rev/min]
D_{1m}	0.1445 [m]	A_2	0.0158[m^2]
A_1	0.016 [m^2]	$\dot{m}$	1[kg/s]

Table 3. Design specification of turbine

The blade profile and velocity triangles at the mid-section plane are shown in Figure 8.

Nozzle design

A simple convergent-shaped exhaust nozzle was designed by featuring of an effective exit area of 75 cm^2, which makes the nozzle unchoked at the design point.

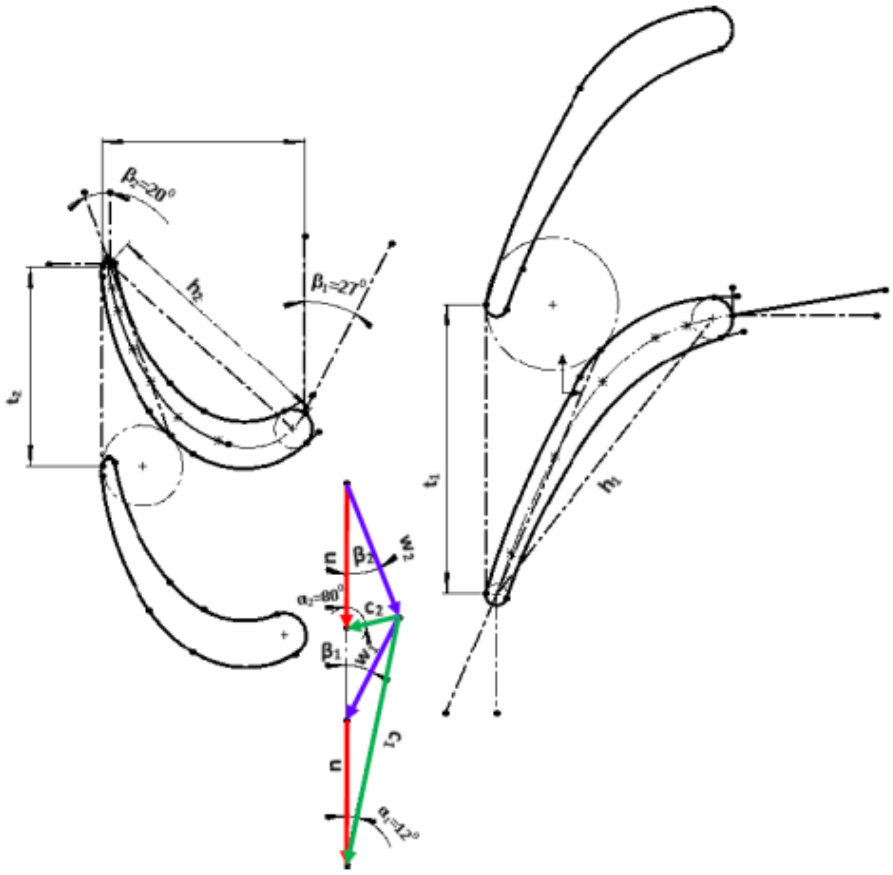


Figure 8. The velocity triangles with the turbine rotor and stator blade profiles at the mean section

CFD ANALYSIS OF THE RESEARCH JET ENGINE

The all components of the research jet engine were available in 3D CAD format till the end of the design process. The next step of the investigations was to crosscheck how the all components working together and how this operation fulfil the design goals. Hence, 3D CFD simulation was prepared and completed for the entire model after creating the flow field by using the solid components. The model preparation and the results of the numerical analysis are discussed in the present chapter. The 3D model was created in Solid Edge software based on the geometry output described in chapter 4 and measured data from the available structure. The 3D geometry of the assembly is found in Figure 9.

The flow field was prepared from the 3D structure by Boolean operation. The solid domains were subtracted from a reasonable big oversized volume to get the flow field in the intake channel, in the compressor, in the combustion chamber, in the turbine and in the nozzle. Only the one quarter flow domains were considered by using rotational periodicity boundary conditions between corresponding surfaces to save computational cost, time and increase the accuracy by means of allowing higher cell number. The used flow domain is shown in Figure 10. The Figure 11. represents the plane, at which the simulation results will be shown in the last part of the present chapter.

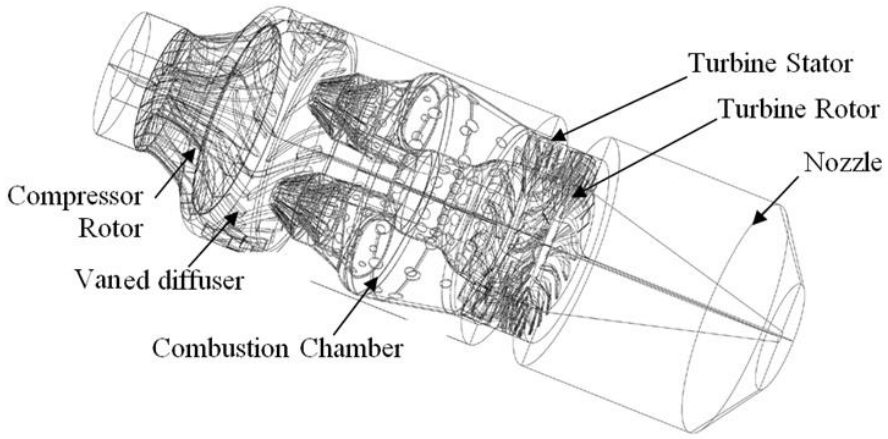


Figure 9. Assembly and the main component of the research jet engine

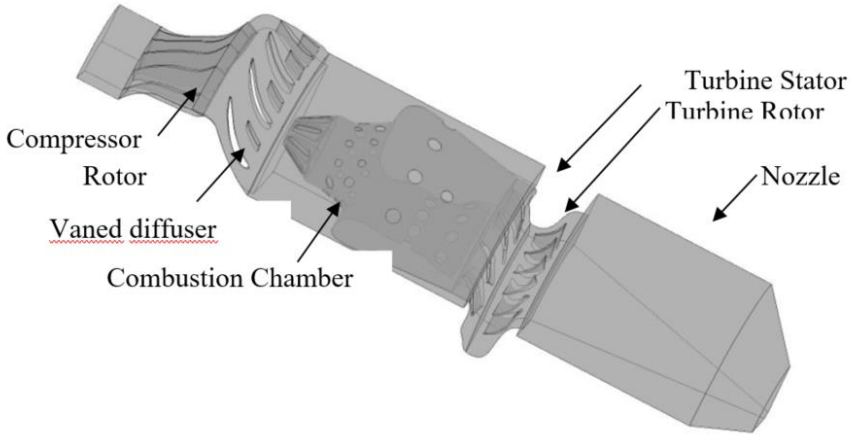


Figure 10. One quarter flow field of the research jet engine with the main components

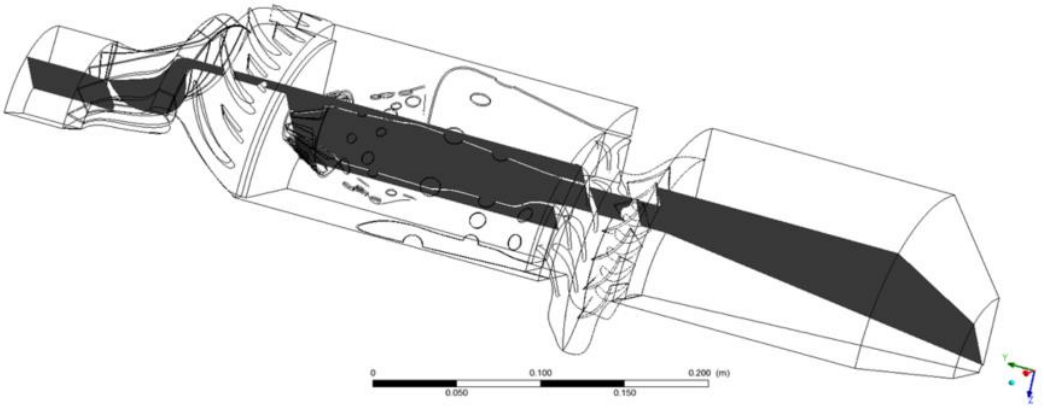


Figure 11. Flow field of a quarter research jet engine and the plane for the representation of the results

The numerical mesh was designed to apply local mesh refinement at the high gradient flow conditions and to guarantee the completeness of y+ to be 30-300. It was a general expectation that results should be mesh independent by 5 % maximum allowing differences in the thrust. The final mesh was built up from 4799728 elements and it contained 2067312 nodes. The 32 GB RAM memory was reached by the simulation. The final mesh configuration is shown in Figure 12.

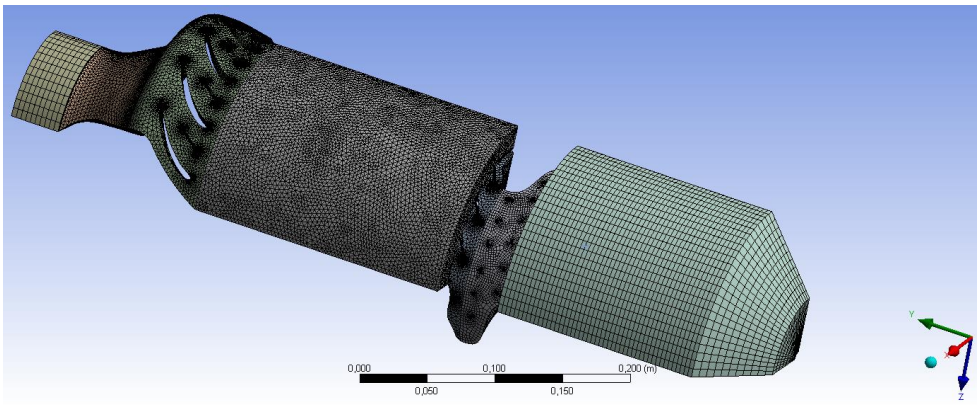


Figure 12. The final mesh for the one quarter flow filed of the research jet engine

The material properties of the incoming air as ideal gas were $\gamma = 1.4$ and $R = 287.058$ *J/(kgK)*. The reference pressure of the domains was 99,000 Pa. The ambient air enters in the jet engine and the hot gases expand in the environments. Hence 99,000 Pa total pressure and 300 K total temperature with normal flow direction into the inlet surface of the intake flow channel were defined as inlet boundary condition. 1 bar static pressure was defined as outlet boundary condition. 43,000 RPM rotational speed turned the rotating flow domain of the compressor and turbine. Table 4. shows the all used boundary conditions.

Figure 13. provides an overview about the type and the location of the used boundary conditions. The heat transfer coefficient 8 W/(m^2 K) corresponded to the stationer ambient air with 300 K temperature on the outer walls were applied for considering the free convection.

Inlet air			Inlet fuel		Outlet
p_0 [Pa]	T_0 [K]	N [rev/min]	V [m/s]	T_0 [K]	Opening pressure [Pa]
99,000	300	43,000	12	300	99,000

Table 4. The applied boundary conditions

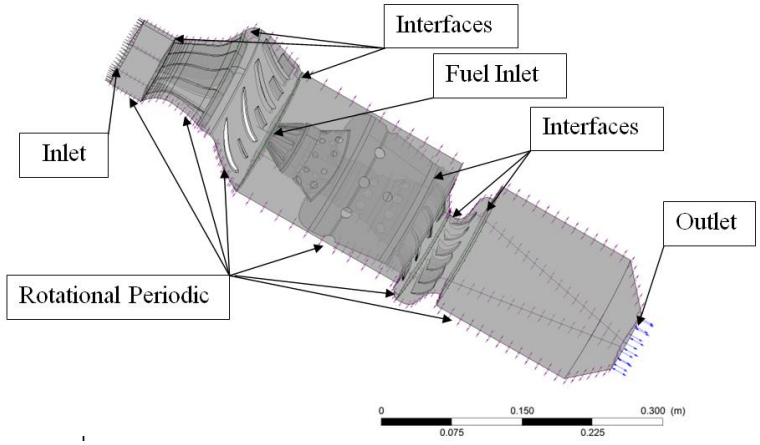


Figure 13. The used boundary conditions and interfaces in the CFD simulation

The considered governing equations were the conservation of mass, momentum and energy together with other supplementary equations for the turbulence and combustion. The standard k-epsilon turbulence model and P-1 radiation model were used in this analysis [19].

Regarding the combustion modelling, non-premixed combustion modelling with the PDF-mixture fraction model was used. In the non-premixed combustion, the fuel and oxidizer enter separately in the reaction zone. The PDF Flamelet combustion model can handle chemical reactions, which go through in a short time in a non-premixed turbulent fluid flow. The generated Flame let library for Jet A is large since it includes all the possible species that can exist in the Jet-A combustion. Simulations with this library take much computational time and computer resources. Even the required time to load this library at the beginning of each simulation is more than forty minutes. In order to save time the spices of the library are reduced to H, O2, OH, O, H2, H2O, CO, CO2, N C10H22, TMB C9H12 and N2. The Table 5. represents the list of applied models to be used in this simulation for combustion modelling.

Advection scheme	High resolution
Primary breakup	Blob Method
Combustion	PDF flamelet
Turbulence model	K-Epsilon
Thermal radiation model	P1
Heat transfer	Ranz Marshall
Drag Force	Schiller Naumann
Turbulence model discretization scheme	First order
Liquid phase	Lagrangian Particle Tracking

Table 5. The applied methods for combustion modelling

The simulation was converged. The imbalances reached the 1% limit after 1000 iteration steps.

The simulation results are shown in the next part of the chapter. The qualitative results are plotted in the plane denoted by Figure 11. and they are presented in Figure 14-16. These distributions are plausible; they are fit to the design expectations and measured values discussed in the next chapter.

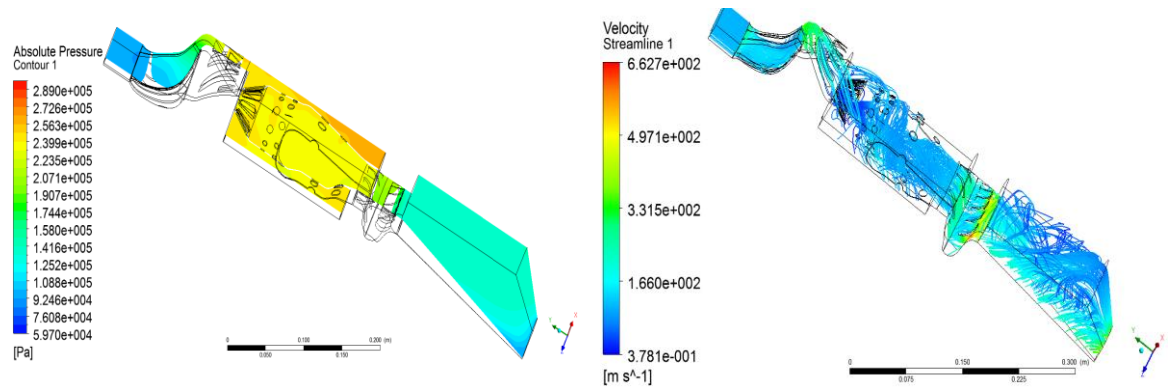


Figure 14. Streamlines (coloured by the velocity magnitude – left figure) and absolute static pressure distributions (right figure) in the meridional plane of the research jet engine

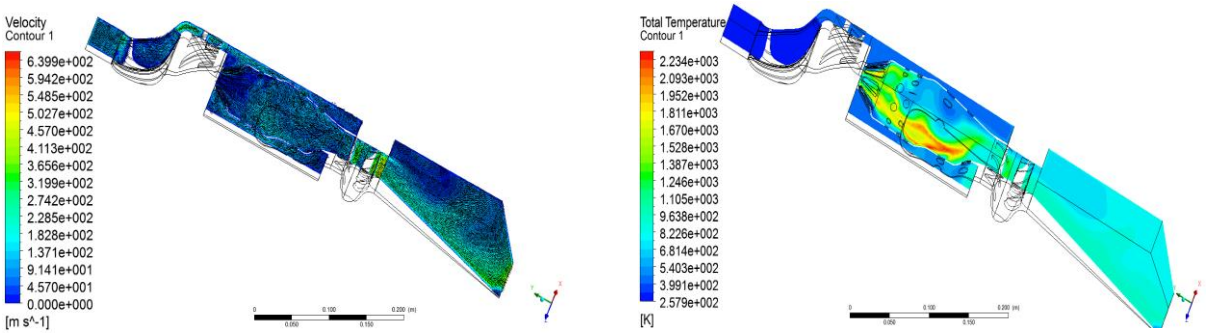


Figure 15: Velocity vectors (left figure) and total temperature distribution (right figure) in the meridional plan of the research jet engine

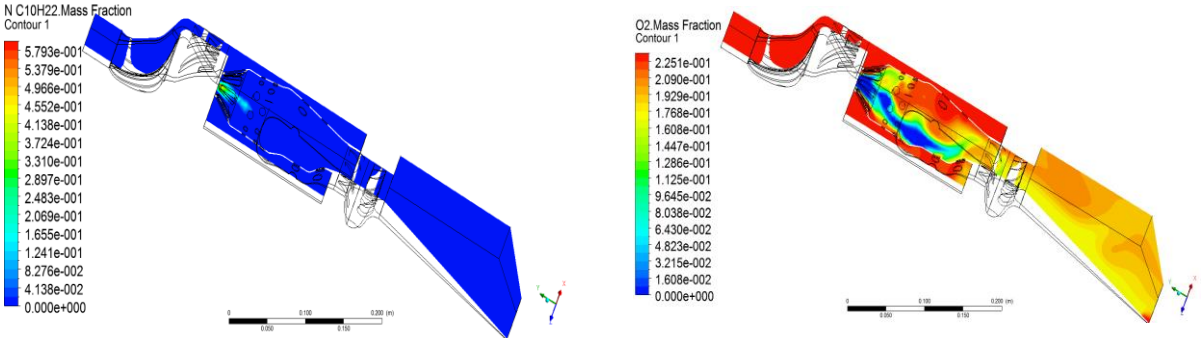


Figure 16. Mass fraction of the fuel (left figure) and O_2 (right figure) in the meridional plane of the research jet engine

DISCUSSION, CONCLUSION AND VALIDATION OF THE RESULTS

There are two goals of the present chapter. The one of them is to compare the design targets and the parameters, which were calculated by the engine design with the results of the CFD analysis. The second one is to compare the CFD data with the results of the available measured values [19]. The thermodynamical parameters - if they were available -as total temperature, total pressure, static temperature and static pressure are presented along the engine length for

results of the thermodynamical cycle analysis, mean line design, CFD simulation and measurement in Figures 17-20.

The total temperature of each stage provided by cycle analysis, mean line design, CFD and measurements at the interface regions of the assembly are shown by empty blue circles, black stars, empty red squares and empty green triangle symbols respectively (see Figure 17). As expected, the total temperature at the inlet section of the nozzle and the compressor inlet is the same and equal to ambient total temperature. Then, it becomes slightly higher, quite above 400 K at the compressor exit. The total temperature increases dramatically to about 1000 K in the combustion chamber and finally it declines at the end of the turbine and the nozzle section. The maximum relative difference between the mean line design and CFD data is 2% meanwhile the average relative deviation between the investigated points is 0.64%. The maximum relative difference between the cycle analysis and CFD data is 2 % and the average relative deviation between the points is 0.89%. Concerning the CFD and measured total temperatures, the maximum relative difference between them is 3% and the average relative deviation between their values is 1.19%.

Figure 18. shows the calculated and measured static temperatures in the function of the engine length similarly than it was mentioned in the previous paragraph except for the thermodynamic data, because only the total quantities were considered in the cycle analysis. The calculated mean line design and CFD results match well with each other similarly than before, only slight difference can be observed between their and measured data. The maximum relative difference between the outputs of the mean line design and CFD simulation is 2.2% and the average relative deviation between the investigated values is 0.68%. The highest relative difference between the available measured and CFD data is 3.9% and the average relative deviation between the investigated static temperatures is 1.67%.

The total pressure at the compressor inlet is 99 kPa. It is boosted by the compressor to 250 kPa before the combustion chamber (see Figure 19.). Afterwards, it expands to the atmospheric pressure in three steps. First, it decreases slightly going through the combustion chamber. Then the flow enters into the turbine and the pressure drops to 110 kPa. Afterwards, the pressure decreases until the end of the nozzle as it is shown in Figure 19. It can be seen that the CFD model gives greater total pressure in the last two sections of the engine (at the turbine and nozzle end). The maximum relative difference between the thermodynamic cycle and CFD data are 4% and the average relative deviation between the points in the entire range is 2.1%. Similarly, the maximum relative difference between the results of the mean line design and CFD total pressure is 5% meanwhile the average relative deviation between the points is 1.3%. Concerning the CFD and measured total pressures, the maximum relative differences between them is 5% and the average relative deviation between their values is 2.2%.

Plotting the measured static pressure along the length of the engine, as it is shown in Figure 20, it provides information also about the usability and accuracy of the design process and model. The thermodynamic cycle analysis has no static parameters, because it uses total ones only. The maximum relative difference between the results of the mean line design and CFD data are 7%

and the average relative deviation between their investigated points is 3.8%. The highest relative difference between the available measured and CFD data is 5% and the average relative deviation between the investigated static pressures is 3.2%.

330 N thrust was the goal function of the design and 345 N thrust was resulted by the CFD analysis. The relative difference between them is 4.54%, it is below the 5% limit, so the used design process is acceptable in engineering point of view. The measured thrust was not used in the present assessment because of uncertainty communicated by the authors [10 and 19].

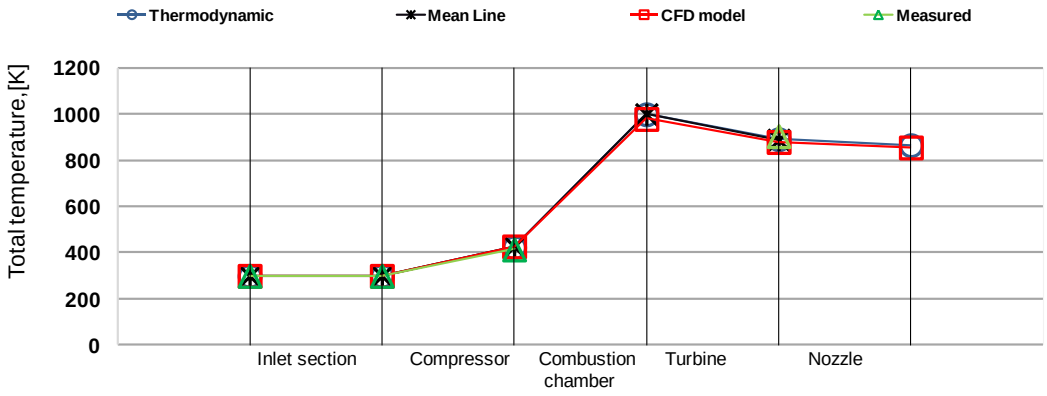


Figure 17. Total temperatures - if they were available - in the function of engine segments at thermodynamic analysis, mean line design, CFD analysis and measurement [19]

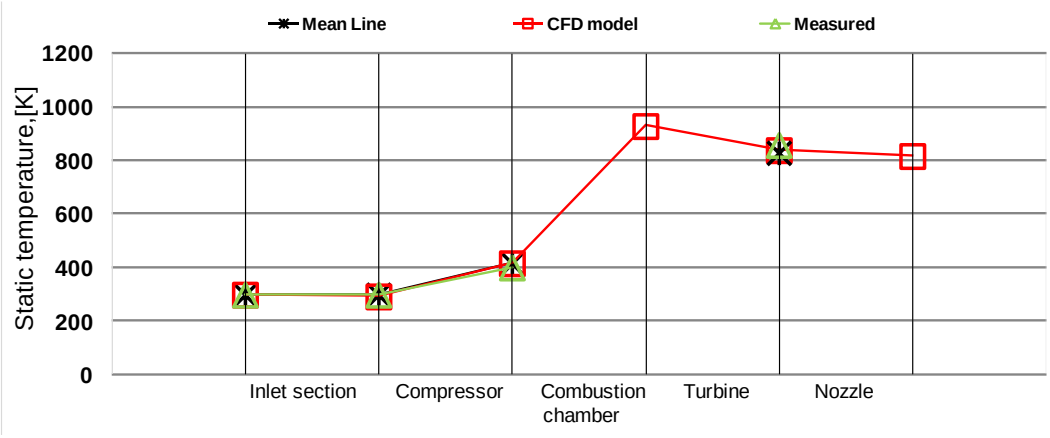


Figure 18. Static temperatures - if they were available - in the function of the engine segments at mean line design, CFD analysis and measurement [19]

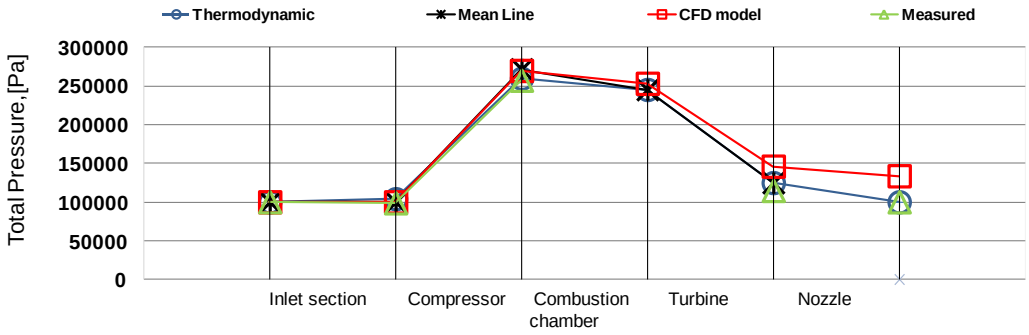


Figure 19. Total pressure values - if they were available - in the function of engine segments at thermodynamic analysis, mean line design, CFD analysis and measurement [19]

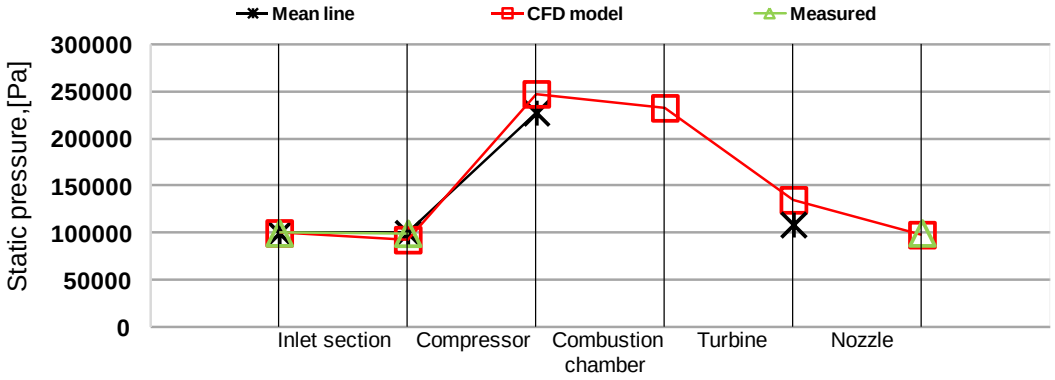


Figure 20. Static pressures - if they were available - in the function of engine segments at mean line design, CFD analysis and measurement [19]

CONCLUSION

The aerodynamic redesign of the small research jet engine has been introduced in the present paper. The considered engine was a starter gas turbine originally, which was used for MiG-23 and Szu-22 Russian fighters. It was reconstructed to be a propulsion system by Dr. Beneda and dr. Pásztor [10]. The present redesign process started with imposing the operational point of the engine to provide 330 N thrust at stationary conditions. The thermodynamically cycle of the engine process was determined with viscous flow assumption and condition dependent material properties for determining specific thrust and thrust specific fuel consumption. After making decision about operational point and having the thermo-dynamical cycle states, the main geometrical sizes of the research jet engine were determined and rotational speed was imposed. Mean line design of the compressor and turbine were completed with considering the available thermodynamic results, main geometrical sizes and RPM. Following the application of the constant degree of reaction along the radius for twisting, the turbine blade profile was constructed. The 3D CAD models were prepared by using the available and determined geometrical data, which were the outputs of the design. The one quarter part of the created 3D model is used to generate the 3D model for CFD simulation in order to crosscheck that how the design goals were realised.

There are two ways of checking the result of the design. One of them is to compare the engine design parameters (given by thermodynamic cycle analysis and mean line design) with CFD analysis and second one is to evaluate the results of the CFD analysis with available measured data. The outcomes of these investigations were the following. The relative average difference between the CFD and the thermodynamic cycle analysis is 0.89% for the total temperature and 2.1% for total pressure. The relative average difference between the CFD and the mean line design is 0.64% for total temperature and 0.68% for static temperature. Similarly, the relative average difference between the CFD and the mean line design is 1.3% for the total pressure and 3.8% for static pressure. Available measured date is used for validation of the result of the research jet engine. The relative average difference between the available measured data and the CFD analysis in case of total temperature is 1.19% and 1.67% for static temperature. The

relative average difference between the available measured data and the CFD analysis in case of total pressure is 2.2% and 3.2% for the static pressure.

The value of the thrust for the research jet engine is 345 N at CFD analysis. The relative difference between design value and the resulted thrust is 4.54%, which is acceptable in engineering point of view.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Hungarian national EFOP-3.6.1-16-2016-00014 project titled by "Investigation and development of the disruptive technologies for e-mobility and their integration into the engineering education".

REFERENCES

[1] Voskuilj, M., Rohács, D., Rohács, J., and Schoustra, R-J.: Preliminary Evaluation of the Environmental Impact Related to Take-off and Landings Supported with Ground-Based (MAGLEV) Power, Journal of Aerospace Operations, Vol. 2, No, 3-4, pp. 161-180, 2013.

[2] Bera, J., Pokorádi, L.: Monte-Carlo Simulation of Helicopter Noise, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 12, No. 2, pp. 21-3, 2015

[3] Beneda, K.: Development of a Modular FADEC for Small Scale Turbojet Engine, SAMI 2016 - IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics - Proceedings, art. no. 7422981, pp. 51-56, 2016.

[4] Beneda, K., Simongáti, Gy., and Veress, Á.: "Járművek hő- és áramlástechnikai berendezései I," Typotex Kiadó , Budapest, Chaps.3, pp.73-82, 2014.

[5] Chu, H.H., Chiang, Hsiao-Wei.: Aerospace Technology Development – Small Gas-Turbine Development, ROC: Aerospace Development Planning, National Science Council, Taiwan, pp. 4-22, 1996.

[6] Beneda, K.: Dynamic Nonlinear Mathematical Model of Active Compressor Surge Control Devices, Proceedings of the 11th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies (VSDIA), Budapest, pp. 583-591, ISBN: 978-963-313-011-7, 2008.

[7] Hargitai, Cs.: Effect of Parameters of Inland Vessel Semi Empirical Motion Equations on Transient Motion Phenomena, in Proceedings of the TVL: Second Scientific Workshop on Transport, Vehicle and Logistics organized by the PhD Schools of the Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, 2012.

[8] Mattingly, J. D., Boyer, K. M.: Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets, Reston, Virgini, Second Edition (AIAA Education), ISBN: 978-1624103711, 2006.

[9] Zare, F., Veress, Á.: Development and Verification of an Improved Thermodynamical Model for Single Spool Jet Engines, in Repüléstudományi Közlemények 2014, Szolnok, pp. 539-551, 2014.

[10] Beneda, K., Pásztor, E.: A TKT-1 Kisméretű, Oktatási és Kutatási Célú Gázturbinás Sugárhajtómű Első Tíz Éve, in Repüléstudományi Közlemények 2015/3, Szolnok, pp. 117-132, 2015.

[11] Kalabic, U., Kolmanovsky, I., Buckland, J., and Gilbert, E.: Reference and Extended Command Governors for Control of Turbocharged Gasoline Engines Based on Linear Models, Control Applications (CCA), 2011 IEEE International Conference, IEEE, pp. 319-325,2011.

[12] Botros, K. K.: Single Versus Dual Recycle System Dynamics of High Pressure Ratio, Low Inertia Centrifugal Compressor Stations, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 133, No. 12, doi: 10.1115/1.4004114, 2011.

[13] Gravdahl, J. T., Egeland, O.: Compressor Surge and Rotating Stall, Modelling and Control, London, ISBN: 978-1-4471-0827-6, 1999.

[14] Morini, M., Pinelli, M., and Venturini, M.: Application of a One-Dimensional Modular Dynamic Model for Compressor Surge Avoidance, ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, vol. 4, Conference Sponsors: International Gas Turbine Institute, Montreal, Canada, ISBN: 0-7918-4793-4, doi: 10.1115/GT2007-27041, pp. 1425-1434, 2007.

[15] Link C. Jaw., William T. Cousins., Dong N. WU., and David J. Bryg: Design and Test of a Semi-Passive Flow Control Device for Inlet Distortion Suppression., Journal of Turbomachinery, Vol. 123, No. 1, doi: 10.1115/1.1333091, pp. 9-13, 2001.

[16] Japikse, D.: Centrifugal Compressor Design and Performance, Printed in the by Thomson-Shore ed., United states of America: Concepts ETI, ISBN: 978-0933283039, 1996.

[17] Wiley: The Jet Engine, Fifth edition ed., New York: Published in Rolls-Royce, ISBN: 978-1-119-06599-9, August 2015.

[18] Sánta, I.: "Tervezési Segédlet - Gázturbinás Repülőgép Hajtóművek, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék" (Guide Line for Aircraft Engines Design at BME University), Budapest, 2008.

[19] Pallag, N.: A TKT-1 Gázturbinás Sugárhajtómű Áramlástani Vizsgálata, Budapest University of Technology and Economics, Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles (Master thesis at BME University), Budapest, 2013.

[20] (online), url: http://www.bridgesofbudapest.com/bridge/chain_bridge (24.06.2017.)

[21] (online), url: https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380 (24.06.2017.)

[22] (online), url: https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_GE90 (24.06.2017.)

[23] (online), url: http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Mercedes-Benz-Actros.xhtml?oid=9904742 (24.06.2017)

[24] (online), url: http://behindthewheel.com.au/next-gen-mercedes-benz-actros-launched-australia/2017-mercedes-benz-actros/ (24.06.2017)
[25] (online), url: https://en.wikipedia.org/wiki/IPhones/ (24.06.2017)

KUTATÁSI CÉLÚ SUGÁRHAJTÓMŰ AERODINAMIKAI ÚJRATERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA - GÁZTURBINA RÉSZEGYSÉGEK VIRTUÁLIS PROTOTÍPUS GYÁRTÁSA

Napjainkban a gáz turbinás hajtóművek jelentik az egyetlen megoldást a nagysebességű kereskedelmi és a katonai repülésben a tolóerő létrehozására, miközben alkalmazásuk széles körben elterjedt az ipar más területein is. A jelen kutatási projekt keretében egy kb. 330 N tolóerő előállítására alkalmas gázturbinás hajtómű akadémiai célú sugárhajtóművé történő aerodinamikai újratervezési lépéseit, az elkészített modell analízisét és az eredmények validálását mutatjuk be. A sugárhajtómű egy egyfokozatú 2.5:1 torlóponti nyomásviszonyú és 43000 fordulat/perces fordulatszámú centrifugálkompresszorral, egyirányú gyűrűs égéstérrel és kb. 1000 K belépő hőmérséklettel rendelkező egyfokozatú turbinából áll. Az aerodinamikai tervezést követően a 3D-s alkatrész modellek és áramlási terek előállítására került sor. Végül a numerikus áramlástani és termikus szimulációk elkészítését követően azok eredményit hasonlítottuk össze a tervezés során meghatározott feltételekkel, a rendelkezésre álló mérési eredményekkel validáció céljából, illetve vontunk le következtetéseket a tervezés és az analízis alkalmazhatóságával, pontosságával és hatékonyságával kapcsolatban.

Kulcsszavak: *kis-gázturbina, sugárhajtómű, hajtóműtervezés, CAD modell-készítés, CFD, validáció*

Zare Foroozan PhD hallgató Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék fzare@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-5486-5881	Zare Foroozan PhD Student Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transporting Engineering and Vehicle Engineering Department of Aeronautical, Naval Architecture and Railway Vehicles fzare@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-5486-5881
Dr. Veress Árpád egyetemi docens Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék averess@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-1983-2494	Dr. Veress Árpád Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transporting Engineering and Vehicle Engineering Department of Aeronautical, Naval Architecture and Railway Vehicles averess@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-1983-2494

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-22-0390_Foroozan_Zare_Arpad_Veress.pdf

Tóth József

A REPÜLŐ MŰSZAKI TISZTKÉPZÉS KORSZERŰSÍTÉSÉNEK FOLYAMATMODELLJE[1]

Az elmúlt évtizedekben a felsőoktatásban és a Magyar Honvédségben bekövetkezett változások jelentős hatást gyakoroltak, és még napjainkban is gyakorolnak a repülőmérnök képzésre. A képzések kimenetén követelményként jelentek meg a kompetenciák, melyek a képzések változtatásának kritériumaként szerepeltek. A tervezési és előrejelzési és aktuális megrendelői tendenciákat elemző kutatás olyan információkat biztosít, amelyek hozzájárulhatnak az oktatási és képzési portfólió, valamint a szakokon végzett diplomások felkészültsége és a megrendelői, felhasználói elvárások összehangolásához. Jelen cikk a repülő műszaki tisztek a repülőeszközök üzemeltetési folyamatihoz kapcsolható kompetenciáinak alapján a képzési portfólió fejlesztésének és átalakításának egy lehetséges folyamatmodelljét mutatja be.

Kulcsszavak: *repülő műszaki, tiszt, képzés, kompetencia, modell,*

BEVEZETÉS

Az elmúlt időszakban a politikai és gazdasági rendszerváltást követően a Magyar Honvédség Légierejénél a repülőtechnika tekintetében jelentős, morfogenetikusnak[2] tekinthető változások zajlottak. A már meglévő légi járművek mellé új harcászati repülőtechnika jelent meg, míg más eszközök kivonásra kerültek az üzemeltetés rendszeréből. Magyarország 1999. március 16-ától tagja a NATO-nak, amely tulajdonképpen a légierő technikai átalakítását is indukálta. Első lépésként kivonásra kerültek a MiG–21, a MiG–23 és a Szu–22 típusok. A technikai szempontból harmadik generációt képviselő MiG-29-es továbbra is rendszerben maradt, egészen 1999-ig. A Nemzetbiztonsági Kabinet 2001-ben hozott döntése alapján a magyar, illetve NATO igényeket is kielégítő Saab JAS 39 Gripen EBS HU került rendszerbe állításra.

Az új repülőtechnika és a repüléstudomány folyamatos fejlődése, új technológiák, mint pl.:

- stealth technológia;
- a repülésszabályozó rendszerek korszerűsödése;
- a pilótanélküli eszközök térnyerése,
- a repülések biztonságának (biztonsági mutatók javítása) folyamatos növelése;
- új üzemeltetési stratégiák megjelenése;
- stb.;

új kihívások elé állította és folyamatosan állítja a repülő műszaki szakembereket. A változás a repülő műszaki tisztek felkészítését, a velük szemben támasztott szakmai, elméleti és gyakorlati követelményeket, a szervezeteken belüli munkamegosztást is átalakította [19][28].

[1] A mű a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 azonosítószámú, „A jó kormányzást megalapozó közszolgálatfejlesztés” elnevezésű kiemelt projekt Concha Győző Doktori Program keretében, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem felkérésére készült.”

2 Morfogenetikus változásnak nevezzük egy szervezet alapjait, alapvető folyamatait érintő változásokat

A Magyar Honvédség haditechnikai eszközparkjának modernizálása, az új üzemeltetési technológia az eddigiektől eltérő, újfajta rendszerismeretet és rendszerszemléletet követelt, amely a repülő eszköz az üzemeltetésben tevékenykedő szakemberek szempontjából egyrészt a meglévő tudásuk, tapasztalataik átértékelését, másrészt új szemléleti, és tudáselemek megszerzését jelentette [22][24][28][29][30][31].

A felsőoktatásban bekövetkezett változások jelentős hatást gyakoroltak a védelmi szektor felsőoktatási intézményeire, ezen belül is a repülő műszaki tisztképzésre. A képzések kimenetén követelményként jelentek meg a kompetenciák, melyek a képzés tantárgyi struktúrájának, belső idő (kredit) arányainak, más tartalmi és módszertani elemeinek átalakítását tették szükségessé. Ennek megfelelően a tudományos igényű kutatás központi feladatává vált annak az egyensúlynak, illetve összhangnak a vizsgálata, amely a repülő műszaki tisztképzés kimenetén, és az alkalmazó, felhasználó szervezetek bemenetén a szakemberek tudásával, és az azt megtestesítő kompetenciáival kapcsolatos elvárások formájában jelentkezik. Mindez indokolja a képzési rendszer tudományos kutatási eredményekre alapozott modernizációját.

A LÉGI JÁRMŰVEK ÜZEMELTETÉSI RENDSZERE, ÜZEMELTETÉSI STRATÉGIÁI, FOLYAMATAI

A Magyar Honvédségben jelenleg rendszerben levő légijárműveket három szervezeti egység tartja üzemben, nevezetesen az MH Pápa Bázisrepülőtér, az MH 86. Szolnok Helikopterbázis, és az MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis. A MH Légijármű Javítóüzem különleges helyet foglal el a Magyar Honvédség légierejében, hiszen feladatrendszere közvetlenül csak részben kapcsolódik a repülőeszközök üzemeltetéséhez. Ebben a vonatkozásban feladata az An-26 típusú repülőgépek időszakos vizsgálatára, és javítására vonatkozik, emellett tevékenységéhez tartozik a repülőeszközökkel kapcsolatos K+F tevékenység, valamint alkatrészgyártás, és más szolgáltatások nyújtása.

A Magyar Honvédség légijárműveit egészen a kétezres évek elején végrehajtott svéd gyártmányú JAS-39 EBS HU Gripenek rendszerbe állításáig, a Szovjet-orosz gyártmányú repülőgépek üzembentartási előírásai alapján üzemeltették. A keleti repülőgépek üzembentartása egyúttal meghatározta az üzembentartó szervezet felépítését, feladatát és minden olyan körülményt, ami légijárművek üzemeltetésével volt kapcsolatos. Az évek során a korszerűsödő technikával együtt az üzembentartás is fejlődött, ez kiváltképp igaz a MiG-29-es típusú repülőgépek esetében. Ezzel szemben a még ma is rendszerben lévő szállító repülőgépek, helikopterek (An-26, Mi-8, Mi-17) üzembentartása lényegét tekintve nem változott a kezdeti üzembentartáshoz képest [9].

A műszaki üzemeltetés alapvetően két fő területet foglal magában: a repülőtechnika üzembentartását és légi üzemeltetését [12].

Az üzembentartás alapja a csoportos kiszolgálási rendszer, mely többlépcsős ellenőrzésen keresztül biztosítja a repülőtechnika műszaki állapotának magas szinten tartását, a meghibásodások időbeni feltárását. A repülőtechnika üzembentartásának és a műszaki munkák végrehajtásának szervezésekor törekedni kell a műszaki állomány hibafeltáró, hibajavító és visszaellenőrző tevékenység szerinti megosztására.

A műszaki üzemeltetés a következőket foglalja magába:

- a repülőtechnika légi üzemeltetését;
- a repülőtechnika előkészítését a repüléshez (előzetes előkészítés);
- a repülések kiszolgálását (repülés előtti előkészítés, ismételt felszállásra történő előkészítés, startvizsga és repülés utáni előkészítés);
- a repülőtechnika karbantartását (komplex ellenőrzés, karbantartó napok);
- a repülőtechnika időszakos vizsgáinak és csapatjavításának végrehajtását;
- a repülőtechnika tárolását.

A repülőtechnika üzembentartását a repülőegység repülő-műszaki állománya végzi. A repülőtechnika üzembentartásának magas műszaki színvonala akkor érhető el, ha a személyi állomány alaposan ismeri a repülőtechnika felépítésének és szerkezetének elméleti alapjait, alapos gyakorlati jártassággal rendelkezik az üzembentartásban, és pontosan betartja az üzembentartásra és csapatjavításra meghatározott szabályokat, utasításokat [12]. A Magyar Honvédségnél rendszerben lévő légi járművek vonatkozásában alapvetően két egymástól lényegesen eltérő üzemeltetési stratégia működik, egymással párhuzamosan.

Kötött üzemidő szerinti üzemeltetési rendszer

A kötött üzemidő szerinti üzemeltetési stratégia szerint történik a második generációs repülő eszközök műszaki üzemeltetése, úgymint a Mi-8, Mi-17 helikopterek, és az An-26 szállító repülőgépek műszaki kiszolgálása.

Kötött üzemidő szerinti, vagy „hard time” üzembentartási módszert akkor alkalmazzák, amikor az adott berendezés vagy szerkezeti elem, esetlegesen akár az egész repülőgép műszaki állapotára jellemző adatok, információk nem állnak rendelkezésre. Nincs a fedélzeti diagnosztikai rendszer által rögzített információ a meghibásodásokról vagy azok okairól és intenzitásukról. Ezt az üzembentartási módszert azért nevezik kötött üzemidő szerintinek, mert előre meghatározott és szigorúan betartandó üzemelési teljesítménymutatók (repült óra, üzemóra, leszállásszám, naptári idő stb.) teljesítése után meghatározott, előírt periódusokban (időközönként) végeznek karbantartási javítási munkákat.

Az ebben a rendszerben üzemeltetett légi járműveken végzett javítási, karbantartási munkákat szakágak szerint csoportosítva végzik, és ennek megfelelően gépészeti, elektromos műszer és oxigén, rádió, lokátor, valamint fegyverzeti rendszerek ismeretével rendelkező műszaki szakembereket igényel. A műszaki tisztek alapvető tudása is ehhez kell, hogy igazodjon, míg más szakágak mélyebb, akár szakmai szintű ismerete szükségtelen.

A javítási, karbantartási eljárások megbízható végzése alapjaiban mély rendszerismeretet, és rendszerben való gondolkodást igényel. A repülő eszközök diagnosztikai fejlettsége nem teszi szükségessé a számítógépek, és a kapcsolódó alkalmazások mély, alkalmazás szintű ismeretét.

A szakmai tapasztalatoknak a hibafeltárás során van nagy jelentősége. A tapasztalat itt a meghibásodás okának gyors megtalálásában jut döntő szerephez, amely mély, átfogó rendszerismeretet és akár alkatrész szintű tudáson alapul. Különösen fontossá válik ez a tudás a javító osztály szakembereinél, hiszen az időszakos munkák mellett itt történik azoknak a hibáknak a feltárása, és javítása, amelyeket az üzemben tartó századoknál nem végezhetnek el.

A vezetési, vezetői (leadership) ismeretekre a szervezeti hierarchiának megfelelő parancsnoki (csoport- műhelyparancsnok, századparancsnok és helyettese, hangárparancsnok és helyettese stb.) van szükség. A repülések műszaki kiszolgálásánál a szolgálati személyek a kiszolgálási folyamatok irányításáért felelősek, így vezetői funkciót ebben a szerepkörben nem töltenek be.

A műszaki munkák dokumentálása ebben az esetben dominánsan papír alapon történik, ennek pontos, szakszerű vezetése alapvető és kiemelkedő fontossággal bír.

Állapot szerinti üzemeltetési rendszer

Az állapot szerinti üzemeltetés segítségével lehet a leginkább megközelíteni azt, hogy a berendezések és szerkezeti egységek ténylegesen megállapítható műszaki állapota legyen az üzembentartási stratégia alapja. Az ilyen elven kialakított üzembentartási rendszert nevezik állapot szerinti (on condition) üzemeltetésnek.

Az üzemeltetni kívánt légijármű különböző berendezéseit, alkatrészeit, szerkezeti elemeit megfelelő vizsgálatok és előírások után különböző üzembentartási módszerek szerint csoportosítják, és azokat más-más stratégiák alapján tartják üzemben. A rendszerek az alábbiak szerint oszthatóak fel:

- üzembentartás a meghibásodás bekövetkezéséig, (pl. izzók)
- kötött üzemidő (hard time) szerinti üzembentartás,
- szakaszosan vagy időközönként ellenőrzött műszaki jellemzők szerinti üzembentartás,
- folyamatosan ellenőrzött műszaki jellemzők szerinti üzembentartás,
- megbízhatósági szint szerinti üzembentartás.

A Gripen, mint negyedik generációs repülő eszköz építési elvéből, a diagnosztizáltság mértékéből következően rendszereinek nagyfokú elektronizáltsága okán az előbbitől lényegesen eltérő rendszer-csoportosítással rendelkezik. Így az üzemeltetésben dolgozó valamennyi műszaki tiszteknek magas szintű gépészeti, elektronikai és elektrotechnikai ismeretekkel is rendelkezniük kell.

A JAS-39-re érvényes, és fentebb bemutatott üzembentartási rendszerben egyértelműen megvalósul az a számítógéppel támogatott, és valós idejű állapotinformációkra épülő üzembentartás, ami alapja a mai modern, negyedik generációs repülőgép üzembentartási stratégiának. Mind a földi kiszolgáló személyzet, mind pedig a hajózó állomány számára rendkívül nagy segítséget nyújt a fedélzeti önellenőrző rendszer. A folyamatosan működő monitorig és adatrögzítő rendszer pedig nem csak a repülések kiszolgálásához, de az időszakos javítások gyors és hatékony elvégzéséhez is segítséget ad.

Az előző stratégiától lényegesen eltérő vonás a rendszerismeret szintjében van. A fent ismertetett elektronizált rendszerek nem igénylik az alkatrész szintű rendszerismeretet, különösen igaz ez a műszaki üzembentartó századnál tevékenykedő tisztek esetében. A meghibásodások okainak feltárása lényegileg szükségtelen, lényegében javítási feladatok nem adódnak. A mélyebb rendszerismeret elsőként a javító osztály, kiemelten azonban a rendszermérnökök szintjén jelenik meg.

Szintén lényeges eltérés a hagyományos technikához képest az, hogy az üzemeltetési folyamatban létrejövő információk elektronikusan keletkeznek, és jelennek meg, így azok feldolgozása, és értelmezése egy másfajta, az eddigitől eltérő szemléletet, és gondolkodásmódot igényel.

A Gripen üzemeltetési rendszerében azonban a számítástechikával kapcsolatos hardver, és szoftver ismeretek jelentősége is kiemelt.

A hibajavítás vonatkozásában megállapítható, hogy bizonyos javítási feladatokat (például forrasztás, kompozit elemek javítása) csak az ezekre vonatkozó jogosultsággal rendelkező szakemberek végezhetnek, mely jogosítványokat külföldön elvégzett tanfolyamok keretében szerezhetnek meg a szakemberek.

Ezzel összefüggésben az idegen nyelvű kommunikáció, és annak minden formája felértékelődik nemcsak a javítások, hanem a repülőgép technológiai dokumentációjának használata kapcsán is.

Az összehasonlításból kitűnik, hogy a vezetni tudás hasonló szervezeti szinteken jelentkezik itt, mint a kemény idős üzemeltetési rendszerben. A rendszermérnököknek azonban különlegesen fontos helyzetben vannak, ugyanis a repülőgép műszaki kiszolgálása során jelentkező döntési helyzetek ezen a szinten összpontosulnak.

A Gripen repülőgépek esetében azért vannak mind a földi kiszolgáló, mind a dokumentációs részleg szakemberei „kényelmes” helyzetben, mivel ha az elektronikus támogató rendszerek szoftverei esetleg egy eddig nem tapasztalt vagy ismeretlen hibával állnának szemben, akkor a rendszermérnökök, akik gyakorlatilag azonnali kapcsolatba tudnak lépni a gyártó cég mérnökeivel, gyors és hatékony megoldást tudnak adni a felmerülő problémára.

A KOMPETENCIÁK

A képzési szerkezet, az infrastruktúrák, a humánerőforrás fenntartása és folyamatos fejlesztése érdekében fontos ismerni, hogy milyen kompetenciákkal rendelkező szakemberekre (katonatisztekre, katonai repülőműszaki szakemberekre és vezetőkre) van szükség a repülőtechnika üzemeltetéséhez és üzembenntartásához [19].

A kompetenciákról általában, megközelítések, történeti fejlődés

A kompetenciákkal kapcsolatos részletes ismertetés előtt célszerű és fontos megtenni egy alapvető szemléleti kérdést, nevezetesen azt, hogy a kompetenciakutatások milyen nézőpontból, vonatkoztatási rendszerből kiindulva végzik vizsgálataikat. A releváns szakirodalom alapvetően két megközelítést tárgyal [1][13].

„Income” megközelítés; ebben az értelemben a kompetencia [27] megközelítéséből indul ki, vagyis ide tartozik az egyénnek minden olyan viselkedéses jellemzője, amely oksági összefüggésbe hozható a kiváló és/vagy átlagos munkahelyi teljesítménnyel. Fókuszában azok az inputok (személyes tényezők) állnak, amelyek segítenek a hatékony munkateljesítmény elérésében. Ezek gyakran viselkedéses kompetenciákként („behavioural competencies”) vannak leírva. Az egyén hatékonyságát akkor tudjuk értékelni és fejleszteni, ha nem a munkakör egyes aspektusait, hanem a legjobban teljesítők személyiségjegyeit vesszük alapul [23].

„Outcome” megközelítés abból a definícióból indul ki, amely olyan aktivitások végrehajtásának képességére vonatkozik egy foglalkozáson, munkaköri feladaton belül, amelyek megfelelnek az adott munkakör előírt követelményeinek. Ebben a megközelítésben, a középpontban a kimutatott kompetenciaigények, mint outcome-ok (munkaköri követelmények végrehajtására

való képesség) állnak. Ezek gyakran munkakör-alapú kompetenciákként/kompetencia-igényként írhatók le, akár a sztenderd munkakörökre vonatkoztatva. Az outcome szemlélet képviselői úgy vélik, hogy a hatékony teljesítményt nem az egyén viselkedései, hanem a munkaköréhez tartozó feladatok hatékony ellátása bizonyítja, és a szervezet számára ezeknek a teljesítéseknek van valójában értéke. Nyilván itt a hatékonyság a tevékenység, munkafeladat elvégzéséhez kapcsolódó teljesítmény szinthez kötődik.

A két szemlélet különbségét a legegyszerűbben talán úgy lehetne megfogalmazni, hogy a viselkedéses kompetenciák a munkát végző emberről szólnak, a munkakör-alapú kompetenciák pedig a munkáról és az annak végrehajtásához szükséges személyiség jellemzőkről, vagyis azon feladatokról, amelyek végrehajtásában a dolgozónak kompetensnek kell lennie.

A kompetenciákkal kapcsolatos elméletek, melyek manapság már a tudomány ragjára emelkedtek kompetenciakutatás elnevezéssel, gyökereit a múlt század elején lezajlott „Human Relations" mozgalom, és annak eredményei teremtette meg. A mozgalom kialakulásának alapját képező hawthorn-i kísérletek (máig vitatott) eredményei indították el a modern menedzsment tudományok fejlődését. A kísérletek rávilágítottak az ember, mint termelési tényező fontosságára, kiemelve azt a századelő „gépalkatrész" szemléletéből. A kísérlet sorozat talán legfontosabb megállapítása az volt, hogy az ember személyes tulajdonságai (fizikai, fiziológiai, pszichés) jelentős hatással vannak az egyén munkateljesítményére. Ennek egyik következménye volt, hogy a hagyományos személyzeti irányultságot felváltotta az emberi erőforrás menedzsment koncepció, melynek leíró fogalmába tartozik a kompetencia is. A kompetenciák terminus egyrészt a modern menedzsment tudományokkal, s ezen belül is elsőként talán az emberi erőforrás-gazdálkodás elméletekkel került előtérbe.

Az elmúlt években újabb megközelítések jelentek meg a kompetenciákkal kapcsolatban, amik a hangsúlyt a dolgozó munkával kapcsolatos átélt tapasztalataira helyezik a hangsúlyt. Sandberg tanulmánya [15] azt sugallja, hogy az, ahogyan a dolgozó értelmezi, felfogja, megérti a munkáját, az jelenti a kompetenciát, és előbbre való a készségeknél és tudásnál, amivel rendelkezik. A szerző úgy véli, hogy az, ahogyan értelmezzük a munkát, szervezi megkülönböztető kompetenciákba tudásunkat, készségeinket. Habár ez a megközelítés viszonylag még új keletű, szemléletmódjában az „income" megközelítésekhez áll közel. A repülő műszaki tiszti kompetenciákkal kapcsolatban is ezt a megközelítés fogadható leginkább el.

A mai értelemben vett kompetenciák térnyerése Európában a II. világháború utáni időszakra tehető. Magyarországra csak a rendszerváltással ért el annak köszönhetően, hogy a megjelenő multi- és transznacionális vállalatok magukkal hozták a vállalati kultúra szerves részét képező menedzsment felfogást és szemléletet. Az Európai Unióhoz történő csatlakozás után a kompetenciákkal kapcsolatos elvek térhódítása a közgazdasági értelemben vett magán szektorból átterjedt a közszférába, majd az oktatás, képzés majd minden szintjére.

A kezdetekben a munkapszichológiával foglalkozó szakemberek érdeklődésének középpontjában, többek közt az állt, hogy a munkaerő kiválasztásánál megtalálják a kiváló teljesítményt legmegbízhatóbb módon előre vetítő faktorokat. McClelland a problémát úgy kezdte vizsgálni, hogy melyek azok a tényezők, amelyek elkülönítik a kiválóan teljesítőket az átlagosan teljesítőktől. Elmondható, hogy a kompetencia mozgalom tulajdonképpen ezzel indult, és annak az alapproblémának a megoldására tett kísérlet, hogy milyen hagyományostól eltérő vizsgák és

tesztek a beválás prognosztizálására. A munkaköri kompetenciák és nem az intelligencia tesztek, iskolai eredmények jósolják meg a sikeres teljesítményt. A kompetencia szót a szűkebb tartalmat takaró képességek helyett alkotta meg, amelyeket még kiegészített viselkedésbeli jellemzőkkel és technikai készségekkel.

McClelland kutatását Boyatzis és Spencer és Spencer munkássága is alátámasztották. Ők négyen a kompetenciamozgalom úttörőinek tekinthetők, akik tudományos elméleteikkel megalapozták és méltó helyre emelték a manapság oly divatos kompetenciakutatást.

Boyatzis műve [3] az első empirikus, kutatásokkal alátámasztott könyv a kompetencia modell kifejlesztéséről. A teljesítményt befolyásoló három tényező, a munkaköri elvárások, a szervezet környezete és az egyéni kompetencia között lévő kapcsolatra világított rá. Elsősorban a vezetői készségeket, tulajdonságokat és viselkedési kereteket azonosította. Boyatzis arra kívánt többek közt rámutatni, hogy mi az, ami egy vezetőt kiemelkedővé tesz. Szerinte szükségszerű figyelembe venni a szervezeti jellemzőket, így cégenként saját kompetencia keretet kell kidolgozni, melyek a szervezeti célok megvalósításához, vagyis a szervezeti stratégiához közvetve, vagy közvetlenül kapcsolódnak.

Spencer – Spencer [16] olyan konkrét módszereket, eljárásokat adtak gyakorlatias megközelítéssel, amely a legátfogóbb módon tartalmazza a kompetenciamodell kialakításának elméleti hátterét és kutatási alapjait. Munkájuk elsősorban azzal kapcsolatosan ad útmutatást, hogy mely magas értékkel bíró munkakörökre alakítsák ki a modellt. Kutatásaik nyomán Ulrich [25] tovább bővítette a szervezeti alapképességek (core competencies) fogalmát a szervezeti képességek (organisational capabilities) fogalmának bevezetésével, ami azt jelenti, mit és hogyan képes a szervezet megteremteni. Míg Spencerék szerint három kompetencia klaszter építi fel a modell 80–98%-át, (vélhetően a közismert Pareto-elvre építve) nevezetesen a teljesítményorientáció, befolyás, személyes hatékonyság. Kaplan és Norton [28] Mintzberg nyomán azonban az információs, interperszonális és döntési készségekre, mint kompetencia klaszterekre helyezi a hangsúlyt.

A kompetencia fogalma

A kompetencia, mint fogalom tartalmazza, hogy az egyén hogyan (milyen magatartással, személyiséggel, milyen képességekkel, motivációval, és milyen tudás birtokában) valósítja meg, érheti el a kitűzött szervezeti célokat [11][14]. A munka sikerét garantáló viselkedés és tevékenység alkotja a lényeget, de mögötte jellegzetes, az emberre jellemző tulajdonságok állnak. A kompetenciák gyakorlati használatához azokkal a viselkedésformákkal kell definiálni, amelyekből állnak, majd fejleszteni, illetve mérhetővé tenni és mérni azokat." [3][8][18] A fentebb leírtakból is jól érzékelhető, hogy meglehetősen összetett, komplex fogalomról van szó.

Különösen jól látszik ez, figyelembe vesszük, hogy kompetenciák önmagukban, viszonylataiktól elkülönülten nem értelmezhetők, mivel dinamikusan szerveződő, változó rendszerek komponensei, öröklött és tanult rendszerekhez tartoznak, változnak, cselekvéshez, tevékenységhez kötöttek. A folyamatosan változó és átalakuló tevékenységrendszerből kivehetünk meghatározott komponenseket, és így a kompetenciarendszert is modellezhetővé válik. A formalizált kompetenciamodellek azonban csak az emberi cselekvések, tevékenységek rendszerében válnak értelmezhetővé, mégpedig a környezet és az egyén kölcsönhatásának eredményeként

A téma átfogó és bőséges szakirodalmi háttérrel rendelkezik, kompetencia-fogalommal kapcsolatos információkat találhatunk úgy a hagyományos nyomtatott periodikákban vagy más szakirodalmi forrásmunkában, mint az elektronikus művekben. Talán nem meglepő, hiszen minden kutató a saját céljaihoz és kutatott problémaköréhez leginkább illeszkedő kompetencia fogalmat használ, esetenként újat alkot. így saját témájának [14]. Tapasztalatom szerint a kompetenciákkal kapcsolatban napjainkra azonban egységes személet alakult ki, viszont a definíciót illetően még nem beszélhetünk konszenzusról sem a hazai, sem a külföldi szakirodalom vonatkozásában.

A pontos definiálásnál zavar forrása lehet két angol fogalom párhuzamos használata is. A competence egy konkrét munka sikeres elvégzéséhez szükséges tudás, képesség alkalmazása (hard, technikai), azaz munkakészség, vagyis arról ad információt, hogy mit kell mérni egy munka során. A másik fogalom a competency, amely viselkedéses jellemzőkkel leírható tulajdonság, és amely meghatározza a teljesítményt és arról szól, hogy a (szervezeti, egyéni) célokat hogyan, milyen magatartás segítségével érhetjük el. Ennek megfelelően a munkaköri kompetencia az egyén alapvető, mérhető tulajdonsága, amely meghatározza, hogy hatékony vagy kiemelkedő teljesítményt nyújt az adott munkakörben [11].

Az alapvető tulajdonság azt jelenti, hogy a kompetencia a személyiség mély és tartós része, amely az egyén magatartását számos szituációban befolyásolja. A definícióban a „meghatározza" arra utal, hogy a kompetencia megléte eredményezi a hatékony/kiemelkedő teljesítményt vagy magatartást. A hatékony/kiemelkedő teljesítmény megállapításához szükséges, hogy egy kritérium szint kapcsolódjon a teljesítményhez, ami felett hatékonynak és egy magasabb, ami felett már kiemelkedőnek tekinthetjük a teljesítményt az adott munkakörben. A hatékony teljesítmény a minimálisan elfogadható, a munkakörben való megfelelés kritériumának megfelelő szintű munka, míg a kiemelkedő teljesítmény úgy határozható meg, hogy minden 10 emberből a legjobban teljesítő 1 ember által nyújtott teljesítmény szintje. Ennek alapján, ha valaki rendelkezik a munkakör betöltéséhez szükséges kompetenciákkal, valószínűsíthetően hatékony/kiemelkedő teljesítményt nyújt.

Figyelembe véve a kompetencia fogalommal kapcsolatos bőséges irodalmat, és elemzést, illetve a fogalom sokszínűségét munka-definícióként a Spencer&Spencer által közzétett meghatározást alkalmaztam a repülő műszaki tisztek kompetenciáinak kutatása során. Eszerint tehát a kompetencia „Egy személy alapvető, meghatározó jellemzői, melyek okozati kapcsolatban állnak a kritériumszintnek megfelelő hatékony és/vagy kiváló teljesítménnyel." [16]. A fogalmat némileg finomítva úgy értelmezem, mint egy foglalkozás, szakma adott feladatának elvégzéséhez szükséges ismeretek, magatartásformák (attitűdök) és képességeket összessége.

Kompetencia modellek

Az utóbbi években tapasztalható térhódítása a kompetencia alapú megközelítéseknek maga után vonta az egyre szaporodó kompetencia modellek megjelenését is alapján a kompetenciamodell leírja a hatékony teljesítményhez szükséges tudás, képességek és jellemvonások sajátos kombinációját, ami így felhasználható eszközként működik a kiválasztásban, képzésben, fejlesztésben, teljesítmény-értékelésben és tervezésben. Kompetencia modell célja alapvetően az, hogy ez alapján bejósolható legyen egy későbbi kiváló teljesítmény.

Kleinék [11] szerint a kompetencia modellekre, azon belül a kompetenciákra a következőknek kell érvényesülni:

- ***viselkedéshez kötött:*** a dolgozók viselkedésének megfigyelése alapján egy viselkedés csoport megjelölésére használják a kompetenciákat. Fontosabb ebből a szempontból a HOGYAN?, mint a MIT?;
- ***megfigyelhető:*** ami azt jelenti, hogy a megfigyelhető viselkedés-formák használhatók csak. Rejtett tulajdonságok (becsület, hit, érettség) nem;
- ***felhasználóbarát:*** a kompetenciák által használt nyelvezet legyen világos, használjon általánosan elfogadott megfogalmazásokat, tükrözze az adott vállalat kultúráját, lehetőséget adva a céggel való azonosulásra és a tulajdonosi érzés növelésére.

Több helyütt is felvetődött a kérdés a kompetencia modellek szükségességét illetően [16][19][26]. A források számos érvet vonultatnak fel mellette, és legalább olyan súllyal és mennyiségben ellene. Az érveket méregelve azt jelenthetem ki, hogy a klasszikus források által nyújtott, úgymond ”kész” modellek beszűkítik és akadályozhatják a kompetenciák felhasználását a repülő műszaki szakma leírásában. Ugyanakkor a modellek szolgáltatta elvek a kompetenciák rendszerezésének szabhatnak megfelelő keretet. Ennek alapján a repülő műszaki tisztek szakmai kompetenciáit, melyek az empirikus kutatás eredményeként adódtak, a „Tudás, Képességek, Attitűd” hármas egységében rendszereztem.

A kompetenciák típusai

Az Európai Unió kategóriáit alapul véve a legtöbb alapirodalom megkülönböztet alap-és kulcskompetenciákat, valamint generikus és speciális (funkcionális) kompetenciákat.

Az alapkompetenciák, báziskompetenciák alatt azokat a személyiség-jellemzőket értjük, amelyek gyakran alkalmazunk az élet legkülönbözőbb területein. Ezek szolgálnak alapul a kulcskompetenciák, a generikus és a funkcionális kompetenciák kialakításának (pl. az írás, az olvasás, a számolás, a szövegértés). Olyan kompetencia, amelyben kiváló, utánozhatatlan valaki, ezáltal tartós értéket képvisel.

A kulcskompetenciák egy szervezet és/vagy egyén stratégiai céljait támogató kompetenciák, amelyek kiegészítik az előbbi kategória elemeit. Ezek a kompetenciák nemcsak egy adott tevékenység kapcsán alkalmazhatók, hanem széles körben alkalmazhatóak egyéb területekre.

A generikus kompetenciák olyan független kompetenciák, amelyek nem köthetők semmilyen speciális tárgyhoz. A munka világában valamely szervezet valamennyi munkakörére, vagy egy-egy munkaköri csoportjára vonatkozó viselkedés-együttes. A legfontosabbnak tartott generikus kompetenciák pl. egy munkafolyamat racionális megszervezése (takarékosság az idővel, az energiával és az anyaggal), problémamegoldás, az alternatív megoldási lehetőségek összehasonlítása, a lényeglátás, a döntésképesség, az együttműködés, a kommunikációs készség, valamint az innováció és a kreativitás.

A speciális vagy funkcionális kompetenciák egy bizonyos munkakör sikeres ellátásához szükséges viselkedés-repertoárt jelentik, a kimagasló teljesítményt szolgáló szakmai tudást foglalják magukba, melyeket csak egy meghatározott képzési folyamatban lehet megtanulni (pl. repülőgép javítás) [15][16].

A kompetenciák másik csoportját a személyiségjellemzők köre képezi. A munkakörhöz tartoznak olyan személyiségvonások és képességek, amelyeket a kompetencia jegyzéknek (térképnek) tartalmaznia kell. A kompetencia térképek igaz, vállalatonként eltérőek, de kialakításukra általános jellemzőket használnak [17].

Több irodalmi forrás szerint a kompetenciákat több csoportra szokták osztani. Az egyik dimenzió a generikus vs. speciális kompetencia, míg a másik a küszöb-és a teljesítménykompetencia. A vezetők által produkált viselkedés-repertoár (vállalattól függetlenül) a generikus kompetencia. A tanácsadó cégek alaposan kidolgozott, szervezetenként összehasonlítható és általában véve megbízható modelljei erre épülnek. Speciális kompetenciáknak az egyes munkakörök sikeres ellátásakor szükséges viselkedés–repertoárt nevezik. A küszöb kompetenciákra feltétlenül szükség van a munka ellátásához. A teljesítmény (megkülönböztető, differenciáló) kompetenciák pedig azok, amelyek a kiválóakat megkülönböztetik az alacsonyan vagy átlagosan teljesítőktől [7].

Az eddigiekből is jól látszik, hogy a kompetencia egzaktan nem meghatározható, ezért olyan pszichológiai módszereket is használnak mérésére, mint például a kérdőív, interjú, írásanalizálás. A kompetencia, mint általános, objektív kategória valóban nem létezik, hiszen mindig kötődik a megoldandó konkrét feladathoz és a feladatot elvégző egyén tudásához. A pszichológiában a kompetencia akcióra vonatkozik, mely egyszerre irányul a környezet megváltoztatására és az ahhoz való alkalmazkodásra. Az emberi erőforrással gazdálkodók számára egy olyan alap, melynek segítségével a munkatársak teljesítménye előre jelezhető és mérhető. A kompetencia szigorú értelemben csak a munkahelyi viselkedés alapján ítélhető meg, vagyis akkor, amikor meghatározott környezetben megnyilvánulni képes. Ez azonban gyakran túl késő és túl költséges, ezért a szervezetek olyan hatékony eszközöket keresnek, amellyel a kompetencia egyfajta potenciálként megbízhatóan mérhető. A kompetencia-kutatások sokszínűsége azt vetíti előre, hogy a kompetenciák mindenfajta meghatározása és értelmezése csak átmeneti lehet, és maga a jelenség természetéből fakadóan változik, és megragadása is helyhez és időhöz kötött [4][5][6].

A kompetenciákat értelmezhetjük úgy is, mint a jövő szakembereinek azon integratív képessége, hogy igénye van az életútján való állandó fejlődésre, egyre összetettebb feladatokkal kapcsolatban, az elért eredmények szintjének növelésével (világkép, személyi orientáció, fejlődés az alkotásban).

Mindezekből az is jól érzékelhető, hogy a kompetencia, amely ugyan az egyes emberhez kötött kategória, kulcsfontosságú szerepet tölt be a katonai légi járművek üzemeltetését végző szervezetek humán menedzsment rendszerében, a szakemberek alap- és továbbképzését végző intézményekben, és a szervezeti tudást és tanulást menedzselő folyamatokban.

A kompetenciákkal kapcsolatban osztom Varga azon véleményét, mely szerint „a kompetenciafogalom még nem kapta meg az általános elismertséget és a széles körben elfogadottságot Magyarországon. Hasonló a helyzet az informális képzés és a szakmai tapasztalat elismerésével is. Az iskolarendszerű és a munkaerő-piaci szakképzés összehangolása a munkaerőpiac valós igényeivel az oktatási rendszeren belül azért lenne fontos, mert együttesen határozzák meg azokat a feltételeket, amelyek közepette a kvalifikáció alternatív formáit elismerik-e vagy sem” [26].

A KÉPZÉSEK KORSZERŰSÍTÉSÉNEK FOLYAMATMODELLJE

Az ezredfordulón kiteljesedő, és Magyarországot is elérő globalizációs folyamatok és jelenségek a felsőoktatási intézményeket is új, a globális környezet felől jövő kihívások elé állították. Amíg az intézmények irányítása dominánsan az állam felöl jelentkezett, addig a folyamatosan változó körülmények a piaci orientáció kiszélesedését jelentették. A felsőoktatásban is új, a kultúrát érintő elemek jelentek meg. Ezek közül a legfontosabbak [2].

- Felelősség, amely az intézmények gazdálkodásával kapcsolatosan jelentkezik. Az erőforrásokkal való gazdálkodás transzparensebbé vált.
- Akkreditáció, amely egy adott külső feltételrendszernek való állandó, és folyamatos megfelelést jelenti úgy a képzési programok, mint a szervezeti egységekre vonatkoztatva, és a minőségbiztosítási rendszer meglétét feltételezi.
- Internalizáció, amely a tudáspiac nemzetközi kiszélesedését jelenti.
- Új vezetési paradigma, ami az üzleti életben már szemléletté váló stratégiai menedzsment rendszereinek adaptációját jelenti.

Az említett jelenségek a védelmi szektor felsőoktatási intézményeit is alapvetően érintették, bár a piaci orientáció értelmezése, a kormányzat paternalista viselkedése részben elodázta a szemléletváltozást, részben nem a megfelelő irányú változtatásokat generálta. Azonban a felhasználó, a „vevő” oldalán is jelentős változások mentek végbe. A Magyar Honvédségben az elmúlt évtizedekben tervezett, és végrehajtott reformok kapcsán csupán a haditechnikai eszközök modernizációját, és ezen belül is az új típusú repülőtechnika megjelenését említem.

A felsőoktatási intézmények vonatkozásában ez a szervezeti átalakításokon túlmenően új képzések, szakok létesítését, illetve a már létező képzési portfolió átalakítását követelte. Így történt ez a repülő műszaki szakemberek képzése kapcsán is. Ami korábban önálló szakként szerepelt a portfólióban, az mára egy szak, (nevezetesen a Had- és Biztonságtechnikai alapképzési szak) szakirányaként szerepel.

A korszerű alapképzések (BsC, BA) programjai az adott szakma kompetenciáiból indulnak ki. Az egyes szakok létesítése kapcsán alapvető kiindulás a képzés kimenetén célként megjelölt kompetenciák rögzítése, és a képzés tartalmának, és tantárgyi struktúrájának, ezen kompetenciáknak való megfeleltetése.

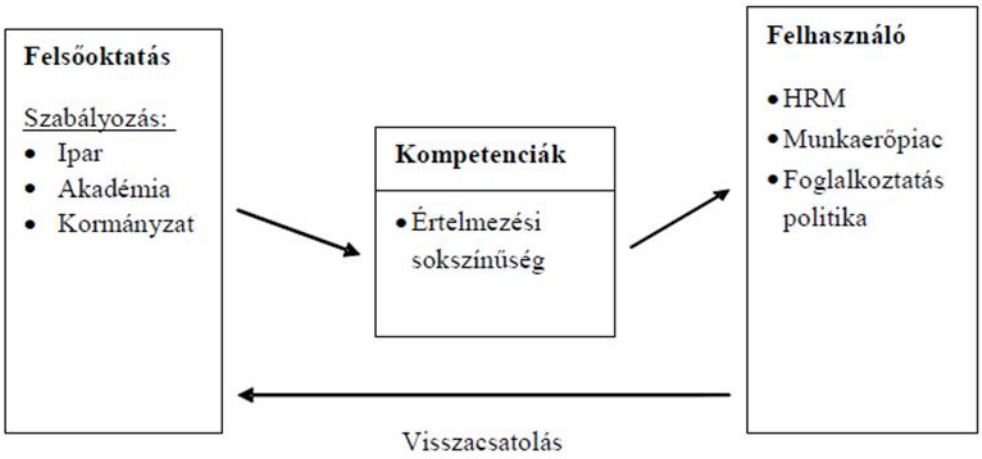
A kimeneti elvű szabályozás

A kimeneti elvű szabályozás folyamatát szemlélteti az 1. ábra. Az ábra elemzésével megállapítható, hogy a felsőoktatási intézmények képzéseinek kimenetén megjelenő szakemberek felhasználójaként a makroszinten a foglalkoztatás politika által szabályozott munkaerő piaci kereslet jelenik meg igénytámasztóként. Vagyis a képző intézményeknek olyan tudással bíró szakembereket kell outputként megjeleníteniük, mely az igénytámasztók inputjainak leginkább megfelel.

A felsőoktatási intézmények környezetét a magánszektor, az akadémiai elvárások és a kormányzat jelenti. A repülő műszaki szakemberek képzésében meghatározó vezérlő elemként jelentkezik a biztonság és védelempolitikát végrehajtó kormányzat, így az egyetemi kormányzás erősen egypólusú. Ebből következik, hogy a kimeneten nagy eséllyel növekedhet a távolság a felhasználók által deklarált elvárások és a képzés eredménye között.

Az egyensúlyt a kompetencia alapú képzési rendszer és képzési programok teremtik meg, amennyiben a felhasználói oldalról egyértelmű, a képzők által is értelmezhető és felhasználható formában és módon rögzítik azokat.

A visszacsatolás biztosítja egyrészről a rendszer dinamikáját, és az egyensúly hosszú távú fenntarthatóságát.



1. ábra A kimeneti elvű szabályozás [2]

A kimeneti elvű szabályozásról jelenleg három – egyaránt fontos – állítás fogalmazható meg:

- a kompetenciákat fogalmazza meg;
- a célokat, a követelményeket úgy rögzíti, hogy abban egyaránt megjeleníti az akadémiai és a munkaerő-piaci elvárásokat;
- az utat rögzíti, az eszközöket nem [2].

A kimeneti elv alkalmazása azt jelenti, hogy a hangsúly az oktatásról a tanulásra, a tartalomról a kimenetre helyeződig. Kompetenciák fejlesztése és nem „csak” oktatás, tudás közlése. A szakmai és pedagógiai szempontok érvényesítése mellett/helyett a piachoz (is) kell igazodni. Nem poroszos képzési rendszert igényel, nagyobb önállóságot ad a képző intézménynek és a képzésben résztvevő hallgatóknak is (ld. kredit-rendszer). Az egyszeri képzés helyett/mellett az élet egészét végigkísérő tanulást hangsúlyozza (és annak egy elemét alkotja).

Néhány általános elvárás vehető figyelembe a kompetencia-követelmények leírásával szemben:

- legyen olyan, amelyik az akadémiai és munkaerő-piaci szempontokat egyaránt figyelembe veszi;
- érthető, adekvát és egységesen értelmezhető a leendő hallgatók, a felsőoktatás tantervkészítői, oktatói, illetve a leendő munkáltatók számára egyaránt;
- szintek szerint differenciált, építkező;
- a képzési terület lényegét megfogalmazó és egyúttal szakspecifikus is;
- egzakt, konkrét, ne csupa általánosság;
- egy egységes és átlátható rendszerbe illeszkedő;
- más képzési ciklusokkal és szintekkel összehasonlítható;
- a mobilitást elősegítő [20].

Fontos kritérium, hogy a kompetenciákból legyenek levezetve a tartalom- (folyamat-) jellegű szabályozási elemek (tananyagok aránya, tartalma, kreditek megosztása stb.), mert csak így

érhető el, hogy a tanulási folyamat során valóban kialakuljanak a szükségesnek tartott kompetenciák. Az oktatás terén végbemenő nemzetközi tendenciák azt mutatják, hogy a hagyományos oktatóközpontú megközelítés a diákközpontú megközelítés felé mozdul el: azaz a súlypont nem csak az oktatáson, mint ismeretközlésen és annak számonkérésén van, hanem azon is, hogy a hallgatóktól milyen tudáselemeket várunk el az adott program elvégzésekor. Ez a megközelítés egyben azt is jelenti, hogy a képzésben a tananyagtartalmak kevésbé igazodik diszciplínákhoz, sokkal inkább a kimeneti célokhoz igazodó ismerethalmazok együttesét jelenti.

A tanulási eredmények állítások formájában fogalmazódnak meg, ezen állítások pedig arról szólnak, hogy a hallgatóknak mit kell tudniuk, mit kell átlátniuk és/vagy mit kell tudni a gyakorlatban bemutatniuk egy sikeres tanulási folyamat teljesítése után [23].

A tanulási eredmény az ismeretek, a megértés, az alkalmazás, az elemzés, a szintézis és az értékelés terén elérendő eredményeket írja le. Ezt a területet kognitív tartománynak nevezik. A másik két fő területet affektív tartománynak (attitűdök, érzelmek, értékek) és pszichomotoros tartománynak (testi, fizikai képességek) nevezik. A tanulási eredmények megfogalmazásakor leggyakrabban a Bloom- féle taxonómiát alkalmazzák alapvetően a kognitív tartományban [10]. Bloom szerint a tudás hat, egymásra épülő, egymással hierarchikus viszonyban álló szinten rendezhető el. Ezek:

6. értékelés;
5. szintézis;
4. elemzés;
3. alkalmazás;
2. megértés;
1. tudás.

A felsorolásban a fordított számozás azt jelzi, hogy a tudás fokonként egyre bonyolultabb szintű, kezdve az egyszerű tények előhívásától (1. szint) az értékelés jelentette folyamatokig (6. szint).

Az egyes szakok létesítése, valamint a képzési program kialakítása kapcsán alapvető kiindulás a képzés kimenetén célként megjelölt kompetenciák rögzítése, és a képzés tartalmának, és tantárgyi struktúrájának ezen kompetenciáknak való megfeleltetése. E felfogás szerint a kompetenciák olyan jellemzők dinamikus egységét jelentik, amelyekkel leírhatók egy képzési program eredményei, illetve az, hogy a tanulók hogyan képesek teljesíteni a képzési folyamat végén. Fontos kritérium, hogy a kompetenciákból legyenek levezetve a tartalom- (folyamat-) jellegű szabályozási elemek (modulok aránya, tartalma, kreditek megosztása stb.), mert csak így érhető el, hogy a tanulási folyamat során valóban kialakuljanak a szükségesnek tartott kompetenciák.

Mindezek figyelembevételével a képzési programok kialakítása a következő folyamattal írható le:

1. a kimeneten megjelenő kompetenciák meghatározása és leírása;
2. a képzési kimeneti követelmények (KKK) meghatározása;
3. tantárgyi, struktúra kialakítása;
4. a tantárgyakhoz illesztett tananyagok, ismerethalmazok kijelölése;
5. monitoring, kontrolling rendszer kialakítása, és programhoz illesztése.

Kiemelt fontosságú, hogy a folyamat egyes elemei szigorú hierarchiát kell, hogy kövessenek. A monitoring, valamint a kontrolling rendszerelem biztosítja a folyamat szabályozottságát, illetve a változások implementálására való gyors reagálás képességét.

Végezetül megállapíthatjuk, hogy egy alapképzési szak képzési programjának a fentebb vázolt modell alapján történő kialakítása biztosíthatja a képzés hosszú távú, korszerű és hatékony működését. Mindemellett az így kialakított programok önmagukban még nem biztosítják a képzés sikerét, szükséges a megfelelő, a képzést támogató korszerű módszerek, és az információ technológia nyújtotta előnyöket kihasználó eszközök alkalmazása is.

ÖSSZEGZÉS

A Magyar Honvédségnél rendszerben lévő légi járművek vonatkozásában alapvetően két egymástól lényegesen eltérő üzemeltetési stratégia működik, egymással párhuzamosan.

A kötött üzemidő szerinti üzemeltetési stratégia alapján történik a második generációs repülő eszközök műszaki üzemeltetése, úgymint a Mi-8, Mi-17 helikopterek, és az An-26 szállító repülőgépek műszaki kiszolgálása.

A Gripen, mint negyedik generációs repülő eszköz építési elvéből és rendszereinek nagyfokú elektronizáltsága okán az előbbitől lényegesen eltérő rendszer-csoportosítással rendelkezik. Így az üzemeltetésben dolgozó műszaki tiszteknek magas szintű gépészeti, elektronikai és elektrotechnikai ismeretekkel is rendelkezniük kell.

A kompetenciákat, melyek egy korábban elvégzett empirikus kutatás során adódtak a „Tudás, Képességek, Attitűd” hármas egységében csoportosítottam és rendszereztem [21]. Ez képezi a kiindulási alapot, amely a repülő műszaki tisztképzés korszerűsítésének folyamata megindulhat. A képzési programok, és a képzés tartalmi elemeinek kialakításánál fontos szemléleti szempont a kimeneti elvű szabályozás, szabályozottság figyelembe vétele, és a követelményeknek a tanulási eredmények formájában történő megfogalmazása.

A folyamatmodell egymásra épülő, egymást követő elemei, és megfelelő kontrolling rendszer működtetése biztosíthatja, hogy a képzés kimenetén a felhasználók számára elvárásainak megfelelő szakemberek álljanak rendelkezésre.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Bokodi Márta: Kiválasztási és interjútechnikák, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 2014, http://vtki.uni-nke.hu/uploads/media_items/kivalasztasi-es-interjutechnikak.original.pdf
[2] Barakonyi Károly: Egyetemi kormányzás. Merre tart Európa? Közgazdasági Szemle LI. évf., 2004. 06. 04.
[3] Boyatzis, R. E. (1982): The Competent Manager: A model for effective per-formance. New York: Wiley. 328 p.
[4] Czobor Zsuzsa: Kompetencia felmérés: Egy innovatív fejlesztési eszköz az oktatásban. BGF Külkereskedelmi kar, Szakmai füzetek, 2003, 13. szám, pp.:59.-66. http://elib.kkf.hu/okt_publ/c_002.pdf
[5] Csapó Benő: A tudás és a kompetenciák, http://ofi.hu/tudastar/tanulas fejlesztese/tudas-kompetenciak (2016. 04. 20)
[6] Gergely Gyula: Kulcskompetenciák pedig nincsenek. Új Pedagógia Szemle, 2004 november http://epa.oszk.hu/00000/00035/00086/2004-11-ta-Gergely-Kulcskompetenciak.html
[7] Goleman, D. (1998): What makes a leader? Harvard Business Review, No-vember-December, 1998. p. 93-102.

[8] Karcsics Éva: Menedzseri kompetencia-elvárások a munkaerőpiacon, PhD értekezés, Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem, Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar Gazdálkodás- és Szervezéstudományi Doktori Iskola, Budapest, 2011., http://kornygazd.bme.hu/doktori/phds/DSZ-11/Karcsics/KarcsicsEva_ertekezes.pdf (2016. 04. 19)
[9] Kavas László, ÓVÁRI Gyula: A katonai repülőgépek korszerű üzemeltetési eljárásainak elvi alapjai és gyakorlati hozadéka, Repüléstudományi Közlemények, XXV. évfolyam, Szolnok, 2013/1. pp. 198-209
[10] Kennnedy, D., Tanulási eredmények megfogalmazása és azok használata, University College
[11] Klein B. – Klein S: A szervezet lelke. SHL könyvek Edge 2000 Kiadó. Budapest 2012. 9. 24.
[12] Magyar Honvédség repülőműszaki szabályzat (Re/415), Szn A Magyar Honvédség kiadványa, 2013.
[13] Mc. Clelland: Testing for competence rather than intelligence American Psychologist, 1973, 28:1-14.)
[14] Pató Gáborné Szűcs Beáta: Kompetenciák, feladatok logisztikai rendszerekben. Doktori (PhD) értekezés. Pannon Egyetem, Szervezési és Vezetési Tanszék, Gazdálkodás-és Szervezéstudományok Doktori Iskola, Veszprém 2006, http://konyvtar.uni-pannon.hu/doktori/2006/Pato_Gaborne_Szucs_Beata_dissertation.pdf (2016. 04. 19)
[15] Sandberg J.:Understanding Human Competence At Work:An Interpretative Approach, Academy of Management Journal, 2000, Vol. 43. No. 1: 9-25.
[16] Spencer, L.M.-Spencer, S. M. Jr. (1993): Competence at Work: Models for Superior Performance. Boston: Wiley. 384
[17] Szabó József: A kompetenciák értelmezése a haderőben, Hadtudományi Szemle 2012, 5. évfolyam 3.-4. sz. 363-369. o; http://uni-nke.hu/downloads/kutatas/folyoiratok/hadtudomanyi_szemle/szamok/2012/2012_2/2012_2_alt_szabo_jozsef_363_369.pdf
[18] Szabó Szilvia: Kompetenciák a gyakorlatban hallgatói és munkáltatói szemmel, „SZAKKÉPZÉS-VIZSGÁLATOK 2008-2010.” Zsigmond Király Főiskola, Budapest, 2010 http://www.zskf.hu/uploaded_bookshelf/540361d5255d65a0.pdf (2016.03.05.)
[19] Szegedi Péter, Tóth József Repülőgép üzembentartó szervezetek humán erőforrásának kompetencia vizsgálata kvalitatív módszerrel In: Békési Bertold, Szegedi Péter (szerk.) Repülőműszaki üzembentartó szervezetek működésével, fejlesztésével kapcsolatban Tanulmánykötet a BSc, MSc hallgatók számára. 82 p. Szeged: Magánkiadás, 2016. pp. 64-82. (ISBN:978-963-12-5621-5)
[20] Szerkesztette: Hogya Orsolya: A versenyképességet támogató kompetenciák fejlesztése, 2. modul A személyes hatékonyságot, eredményességet javítókompetenciák fejlesztése, Az egész életen át tartó tanulás fejlesztése az intézmények közötti nemzetközi együttműködéssel TÁMOP-2.2.4.-08/1-2009-0012, 2010, http://inter-studium.hu/kepzes_pdf/gazdasag/jegyzet_szemelyes_hatekonysag.pdf (2016.04.18.)
[21] Temesi József: Kompetenciák, ismeretkörök és tanulmányi kimenetek összefüggései és tervezése. Társadalom és Gazdaság, Akadémiai kiadó, 2006.
[22] Turcsányi Károly, Szegedi Péter , Tóth József: A katonai repülőműszaki tiszti kompetenciák felmérése integrált kutatási módszerrel Repüléstudományi Közlemények (XXVIII. évf. 2.szám) pp. 153-164. (2016)
[23] Tóth József: A tanulási eredmények meghatározása a mérnökképzés folyamatában In: Bodzás Sándor (szerk.) Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2015. 591 p. Konferencia helye, ideje: Debrecen, Magyarország, 2015.06.11 Debrecen: Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, 2015. pp. 188-193. (ISBN:978-963-7064-32-6)
[24] Turcsányi Károly, Szegedi Péter, Tóth József: Определение компетенций офицеров авиационных инженеров Repüléstudományi Közlemények XXVIII:(3) pp. 7-14. (2016)
[25] Ulrich David – Human Resource Champions: The Next Agenda for Adding Value and Delivery Results, Harvard Business School Press, 1997.
[26] Varga E: A személyes kompetenciák átértékelődése az emberi erőforrás menedzsment és a gazdasági felsőoktatás szemszögéből, Doktori (PhD) értekezés Szent István Egyetem, Gödöllő, 2014.
[27] Vass Vilmos: A kompetencia fogalmának értelmezése, válogatás dr. Vass Vilmos publikációiból http://www.petsul.hu/dokumentumok/valogatas.pdf
[28] KAPLAN R.–Norton D.: A Balanced Scorecard, mint stratégiai menedzsmentrendszer, Harward Business Review, 1996. jan.-febr. szám
[29] Óvári Gyula: A Stealth repülőgépek szerkezeti kialakításának néhány kérdése, Haditechnika 3:(1) pp. 43-56. (1991)
[30] Óvári Gyula: Autorotálni, katapultálni vagy lezuhanni? Haditechnika 28:(4) pp. 2-9. (1992)
[31] Óvári Gyula, Kovács József, Szegedi Péter: Preliminary Design of Controller for the Lateral Motion o fan Unmanned Aerial Vehicle In: Žilvinas Bazaras, Donatas Markšaitis, Evaldas Švaronas, Ovidijus Putnynas (szerk.) Proceedings of the 10th International Conference: Transport Means 2006. Konferencia helye, ideje: Kaunas, Litvánia, 2006.10.19-2006.10.20. Kaunas: Technologija, 2006. pp. 328-331.

PROCESS MODEL ON MODERNISATION OF AIRCRAFT MAINTENANCE ENGINEERS' EDUCATO [3]

Change in the past decade in higher education and the Hungarian Defence Forces he exerted influence, and they also practice the aircraft engineer to an education yet in our time. Competences appeared as requirement on output of the educations, what besides you appear as a criterion of change of the educations. Research and assessment concentrating on present requirements on the side of the employer and proper analysis for the sake of forecasting and planning may add value to the education and training portfolio development. This article is a try to disseminate some ideas and thoughts concerning the development and improvement of the present educational portfolio by a more proper understanding of the wants and needs of the military workplace through the example of the research and analysis of aircraft maintenance officers and their professional competencies.

Keywords: *, aviation engineering, education, competency, model, officer*

Tóth József (MSc, MBA)
Gyakorlati oktató, Doktorjelölt
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék
toth.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8647-3404

Tóth József (MSc, MBA)
Practical instructor, PhD candidate
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aircraft and Engine
toth.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8647-3404

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-23-0404_Toth_Jozsef.pdf

3 The work was created in commission of the National University of Public Service under the priority project KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 titled „Public Service Development Establishing Good Governance" in Győző Concha Doctoral Program"

Simon Zsolt

LÉGIJÁRMŰ SZEMÉLYZETEK SZÁRAZFÖLDI TÚLÉLŐ KIKÉPZÉSE

Ha katonai berkekben pilóták túléléséről beszélünk, a legtöbbünknek azonnal két „túlélős" klasszikus, John Moore-tól az Ellenséges terület,[1] vagy Ridley Scott-tól a Sólyom végveszélyben[2] című filmek jutnak eszünkbe. Mindkét mozi megtörtént eseményeket elevenít fel, és jól példázza a hadműveleti területen feladatot végrehajtó pilóták speciális felkészítésének szükségszerűségét. Ez biztosíthatja számukra a sikeres túlélést akár extrém időjárási, vagy földrajzi körülmények között, továbbá az ellenség elől való rejtőzködést, menekülést, vagy akár a szökést és a sikeres visszatérést a saját csapatokhoz. Az ilyen jellegű felkészítés nem idegen a Magyar Honvédség helikopterszemélyzetei számára sem. Az MH 86. Szolnok Helikopter Bázis hét éve szervez vízi és szárazföldi túl-élő gyakorlatokat légijármű személyzetek részére, melyek fontossága a bázis helikopteres hajózó- és műszaki állománya részére az afganisztáni szerepvállalások[3] kapcsán felértékelődött; e gyakorlatok évek óta a missziós felkészítés alapját képezik. Írásomban – a fent tett túlélőgyakorlatok egyik oktatójaként – igyekszem bemutatni a légijármű vezetők szárazföldi túlélő-felkészítésének követelményeit, a hazai képzés felépítését és az eddig elért eredményeket.

Kulcsszavak: *helikopter, helikopterszemélyzet, légijármű-vezető, túlélés, túlélő gyakorlat, SERE, kiképzés*

A TÚLÉLŐKIKÉPZÉSEK KÖVETELMÉNYSZINTJEI

A túlélőkiképzések jelentősége napjaink modern hadműveleteiben, a különböző békefenntartó műveletekben kiemelkedő fontosságú. Könnyen előfordulhat, hogy egyes katonák vagy kisebb csoportok, például egy kényszer-leszállást végrehajtott légi jármű személyzete és utasai elszakadnak saját csapataiktól, és hosszú utat kell megtenniük, hogy visszatérjenek az alakulatukhoz, vagy akár napokat kell a bázisuktól távol, ellenséges területen elszigetelve eltölteniük, hogy végül kimentsék őket. Fontos, hogy az elszigetelt személyek el tudjanak rejtőzni, vagy menekülni az őket kereső, üldözőellenséges erők elől, és elkerüljék a fogságba esést. A megfelelő szintű túlélőkiképzésen rész vett személyek, katonák, civilek túlélőképessége megnő, képesek együttműködni a PR[4]-feladatban részt vevő mentőegységekkel, így visszatérésük vagy kimentésük esélye is magasabb.

A túlélő-kiképzési követelmények meg-határozására a NATO-n belül egy kiképzési szintrendszert alkalmaznak, az úgynevezett SERE[5]-szinteket

A SERE túlélőkiképzéseknek három szintje létezik:

- „A" szint (Level Alpha). Alap, úgynevezett bevezető túlélő tanfolyam. A legtöbb országban egyszerűen egy DVD-t kap a tanfolyamon résztvevő személy. A lemez tartal-

[1] Behind Enemy Lines
[2] Black Hawk Down
[3] MH Légi Kiképzés-támogató Csoport (AMT – Mi-35 Air Mentor Team) és MH Légi Tanácsadó Csoport (AAT –Mi-17 Air Advisory Team)
[4] Személyi mentés – Personnel Recovery
[5] Túlélés, elkerülés, ellenállás, szökés – Survival, Evasion, Resistance, and Escape (SERE)

mazza a túlélés alapvető elveit, továbbá leírásokat, videókat menedéképítésről, tűzgyújtásról, valamint élelemszerzési lehetőségekről. Ez a szint csak elméleti tudásanyagot ad át a tanfolyam részt-vevőinek.

- „B" szint (Level Bravo). Ez a szint tartalmazza a túléléshez szükséges alapvető tudásanyagot, amit az „A" szint is magában foglal, viszont minden elméletben leadott témakört gyakorlati foglalkozás követ. Az alap túlélő tananyag kibővül fizikai felkészítéssel, elméleti és gyakorlati navigációs, és elsősegély nyújtási foglalkozásokkal. A képzés hossza körülbelül egy vagy két hét.



1. ábra A túlélések során az egyik legfontosabb készség a sérülések ellátása [saját kép]

Alapvetően azok számára alakították ki ezt a túlélőkiképzést, akik a saját csapatoktól távol, hadműveleti területen teljesítenek szolgálatot, és fogságba esésüknek közepes kockázata van.

Ennek érdekében a „B" szintű képzés az alapvető túlélési eljárásokon túl a menekülésre, rejtőzködésre fókuszál, valamint foglalkozik a fogságba esés elkerülésével is.

- „C" szint (Level Charlie). A „C" szint magánban foglalja az előző szintek ismeretanyagát, de legfőképpen a menekülésre, a fogságba esésre és a fogolytáborokban a kihallgatási technikáknak való ellenállásra koncentrál. Ezen a szinten a képzés résztvevőinek minimum 72 órán keresztül kell elkerülniük az őket üldöző csapatokat, miközben a meghatározott kiemelési pont felé haladnak. A menekülés azonban minden esetben – a megfelelően előkészített forgatókönyv alapján – elfogással végződik. Ezt követően minimálisan 12 órát kell fogságban tölteni, ahol többszöri kihallgatásnak vetik alá a résztvevőket. [1]

A SERE túlélőkiképzések végrehajtását, feltételrendszerét, a kiképzések időtartamát, tematikáját, a különböző szintek részletes követelményeit alapvetően a következő NATO- dokumentumok tartalmazzák:

- AJP-3.7 ALLIED JOINT DOCTRINE FOR RECOVERY OF PERSONNEL IN A HOSTILE ENVIRONMENT
- ACO DIRECTIVE 080-101 PERSONNEL RECOVERY IN NATO OPERATIONS
- ACO MANUAL 080-071 PERSONNEL RECOVERY IN NATO OPERATIONS
- ATP-3.3.7.7 Study Draft Personnel Recovery Tactics, Techniques and Procedures

- STANAG 7196 Study Draft THE NATO SURVIVAL, EVASION, RESISTANCE AND EXTRACTION (SERE) TRAINING STANDARD

A fenti dokumentumokban meghatározott irányelvek és képzési témakörök ajánlásai alapján alakítják ki az MH 86. Szolnok Helikopter Bázison a légijármű személyzetek részére szervezett szárazföldi túlélőkiképzés tematikáját is.

„DEEP SURVIVAL" SZÁRAZFÖLDI TÚLÉLŐGYAKORLAT

A Magyar Honvédség légijármű személyzeteinek túlélőkiképzése az évente végrehajtott „Deep Survival" elnevezésű gyakorlat keretében valósul meg. A túlélőgyakorlatot 2006 óta rendezi meg az MH 86. Szolnok Helikopter Bázis – az MH 2. vitéz Bertalan Árpád Különleges Rendeltetésű Dandár együttműködésével – a táborfalvai kiképzőbázison. [4]



2. ábra Felkészítés a kiemelési ponton várható eseményekre [saját kép]

Az első szárazföldi túlélőkiképzésre 2006-ban került sor Táborfalván. A kiképzésbe az évek során folyamatosan beépültek az afganisztáni missziók tapasztalatai, valamint a NATO-ajánlásokat követve a tematika többször átalakult, frissítésre került, és elérte jelenlegi, SERE B szintnek megfelelő tartalmát (mivel a gyakorlat foglalkozik fogságba eséssel és kihallgatási szituációkkal is, így valójában a „B" és „C" szint között helyezkedik el, tehát a SERE B+ szint lenne a helyes elnevezés). Ennek eredményeként a gyakorlat az afganisztáni AMT- és AAT- felkészítéseknek is alapvető részévé vált.

A GYAKORLAT FELÉPÍTÉSE

A túlélőképzés egy folyamatos, 12 napos felkészítés, mely két fő blokkra bontható. Az első hét az általános túlélési képességek fejlesztésére irányul, a második pedig a hadműveleti területen történő rejtőzködésre, a saját csapatokhoz történő visszatérésre helyezi a hangsúlyt.

A gyakorlat kezdetekor a résztvevők részére egy általános túlélő-felszerelés kerül kiosztásra, mely a következőket tartalmazza: 1 db „VIPER" túlélőmellény, 1 db védőszemüveg, 1 pár védőkesztyű, 1 db izofólia, 1 db magnéziumos tűzgyújtó, 2 db öngyújtó, 1 db jelzőtükör, 1 db „pipalámpa", 1 db síp, 1 db túlélőkés, 1 db drót-fűrész, 2 m spárga, 1db kulacs, 1 készlet álcafesték, 1 db tájoló, 1 db protraktor[6], 1 db térkép, 3 db Chemlight, 1 db egészségügyi csomag, 3 db gyorszáras zacskó és szemeteszsák, 1 db gumi gépkarabély és 1 db pisztoly. [4]



3. ábra A résztvevők részére kiosztott általános túlélő-felszerelés [saját kép]

AZ ELSŐ ALAPOZÓ HÉT

A SERE B gyakorlat első hetében a résztvevők megtanulják túlélő-felszerelésük használatát, megismerik a túlélés alapelveit, és elsajátítják az alapvető túlélési praktikákat, egymásra épülő elméleti és gyakorlati foglalkozások során. A tanteremben leadott elméleti tananyagot a résztvevők átbeszélik, majd képeket és videókat tekintenek meg a rájuk váró feladatról. Ezt követően a terepen, gyakorlatban sajátítják el a szükséges ismereteket.



4. ábra Élelemről és vízről is döntően maguknak kellett gondoskodniuk [saját kép]

[6] Navigációs vonalzó

Megtanulják például, hogyan gyújthatnak tüzet különbözőkörülmények között, hogyan szerezhetnek táplálékot, vagy milyen módszerekkel gyűjthetnek vizet és tehetik azt ihatóvá. Fontos része a felkészítésnek a menedéképítés gyakorlása. A résztvevőknek képesnek kell lenniük rövid idő alatt megfelelő hevenyészett menedéket építeni természetes anyagok, vagy akár az ejtőernyő felhasználásával.

A túlélés során az egyik legfontosabb készség a sérülések ellátásának képessége. A tematika alapján a résztvevők egy teljes napot foglalkoznak elsősegélynyújtással, képzett, hadműveleti területen tapasztalatot szerzett különleges műveleti „MEDIC" állomány irányítása mellett.

A sérülések ellátásán túl a másik kiemelten fontos gyakorlati foglalkozás a terepen történő navigáció. Természetes, hogy a repülőhajózó állomány a levegőből jól navigál, azonban a terepen történő tájékozódás ettől eltérő eljárásokat igényel. Ezért kell nagy hangsúlyt fektetni ennek gyakorlására. A résztvevők elsajátítják, hogyan tájékozódjanak akár iránytű és GPS nélkül, hogyan mérjenek távolságot, hogyan határozzák meg a pozíciójukat, vagy hogyan találjanak meg meghatározott pontokat.

Az első, általános képzési blokkot egy 24 órás kihelyezés zárja, ahol a résztvevőknek egy helikopteres kirakást követően közel 24 óra alatt kell a meghatározott kiemelési helyre eljutniuk, lehetőleg rejtve. A gyakorlat során a valós körülmények imitálása érdekében táplálékot egyáltalán nem, vizet is csak korlátozottan kapnak a résztvevők. A kiemelési helyre történő beérkezést követően, hogy a csoportok számot adjanak tudásukról, tüzet gyújtanak, és menedéket építenek a tanult módszerekkel [4].



5. ábra Hevenyészett menedék természetes anyagokból [saját kép]

A MÁSODIK FÁZIS

A túlélőgyakorlat második hetének tematikája készíti fel a résztvevőket az ellenséges területen történő túlélésre, rejtőzködésre és menekülésre. Ennek a blokknak a célja, hogy az állomány tagjai, mint potenciális elszigetelt személyek felkészültek legyenek a PR- műveletekben részt vevőerőkkel történő együttműködésre.

A második hét tematikája tartalmazza a PR-eljárások koncepciójának és típusainak ismertetését. A résztvevők megismerik és gyakorolják az ISOPREP,[7] EPA[8] kitöltését és alkalmazását.

[7] Isolated Personnel Report – Elszigetelt személy jelentőlap
[8] Evasion Plan of Action – Menekülési terv

Megtanulják leszűrni a túléléshez és sikeres kimentéshez szükséges információkat a hadműveleti dokumentációkból (SOP[9] SPINS[10] OPLAN[11] ANNEX V[12] COMPLAN[13]) [2][3].



6. ábra Kiemelt jelentősége van a fizikai felkészítésnek [saját kép]

Ebben a fázisban ismerik meg a résztvevők a túlélési szituációban alkalmazható kommunikációs eszközöket, például az afganisztáni missziókban harci kutató-mentő rádióként alkalmazott PRC-112G típusú rádiót. Elsajátítják, hogy miként lépjenek kapcsolatba az őket kutató egységekkel, hogyan meneküljenek rejtve, hogyan maradjanak észrevétlenek, hogyan rejtsék el nyomaikat. Gyakorlati foglalkozások során sajátítják el a harci kutató-mentő azonosítási eljárásokat is.

Annak érdekében, hogy a kiképzendő állomány minél közelebb kerüljön egy valóságos túlélési szituációra jellemző stresszes állapothoz és kimerültséghez, a 12 nap során folyamatos fizikai terhelésnek vetik alá őket. Ez azt jelenti, hogy a „túlélők" az elméleti és gyakorlati foglalkozások között, naponta két alkalommal minimum egy-egy órás aerob és anaerob fizikai tréningen vesznek részt.

A SERE B túlélő-felkészítés záró gyakorlattal fejeződik be. A 12 napos folyamatos nappali és néha éjszakai elméleti és gyakorlati foglalkozások, valamint a megterhelő fizikai igénybevétel miatt a katonáknak a szellemi és fizikai kimerültséggel megküzdve – mint egy ellenséges területen kényszerleszállást végrehajtott állománynak – másnap reggelre élelem nélkül és korlátozott mennyiségű vízzel, észrevétlenül kell eljutniuk a közel 35 kilométer távolságban lévő kiemelési zónába. A záró mozzanatot az MH 2. vitéz Bertalan Árpád Különleges Rendeltetésű Dandár mintegy 70 katonája biztosítja, akiknek a feladata a menekülőállomány felderítése, üldözése és elfogása.

Mivel a SERE B szintű túlélőképzésen alkalmazható rövid idejű fogság, így a felderített menekülőcsoportokat elfogják. Elfogás után az oktatói állománnyal megbeszélik, elemzik, hogy mi vezetett a felderítéshez, majd néhány kilométeres hátrahelyezést követően folytatják a menekülést a kiemelési ponthoz.

[9] Standard Operating Procedure – Hatályos műveleti eljárás
[10] Special Instructions – Speciális utasítások
[11] Operational Plan – Hadműveleti terv
[12] Az OPLAN PR fejezete
[13] Communications Plan – Kommunikációs terv

A kiemelési ponton a menekülő csoportok felkészülnek az előre megadott forgatókönyv szerinti azonosítási eljárásra és a helikopteres kiemelésre. Gyakorlás céljából a résztvevők a kutató mentőszemélyzettel a PRC-112G rádión keresztül kommunikálnak. A kiemelés végrehajtásával a gyakorlat befejeződik. A túlélőgyakorlatot sikeresen végrehajtó résztvevők oklevelet kapnak a SERE B szintű túlélőkiképzés elvégzésének igazolására [1][2][4]

FRISSÍTŐ/HALADÓ KÉPZÉS

Annak érdekében, hogy azok a helikoptervezetők, akik több mint két éve estek át a 12 napos szárazföldi túlélőgyakorlaton, ne felejtsék el az ott tanultakat, 2011-ben – a hagyományos szárazföldi túlélőképzéssel párhuzamosan – egy frissítő kurzus indult. A tematika összeállítása során azonban arra a következtetésre jutott az oktatói csoport, hogy célszerű a képzést a SERE C szinthez közelíteni. Így megnövelték az elszakadás, a menekülés időtartamát, és a résztvevők egyénileg hajtják végre a visszatérést a kiemelési pontra.

Ennek eredményeként született meg a 9 napos frissítő, túlélőkurzus (haladó elemekkel), a „Deep Survival" gyakorlat ágaként.

A gyakorlati ág tematikája feleleveníti a korábban tanult túlélési eljárásokat, felfrissíti a korábbi túlélő képzésen oktatott túlélési praktikákat. Ismétli a hadműveleti területen alkalmazható PR-eljárásokat, és újra gyakorlatban foglalkozik az EPA és ISOPREP kitöltésével, felhasználásával. A fizikai terhelés továbbra is meghatározó része a képzésnek.

A lényegi különbséget az újonnan beépített foglalkozások jelentik:

- Gyakorlati egészségügyi foglalkozás. A gyakorlati foglalkozás során több harchelyzetet, szituációt imitál az oktató, és e közben kell a sérülteket ellátni. Az egészségügyi foglalkozás egy teljes napot vesz igénybe.
- Harcászati foglalkozás, gépkarabély lövészet. A résztvevők éleslövészet keretében, párban gyakorolják az ellenségtől való elszakadást, biztosítást, előre haladást.
- 48 órás kihelyezés. A résztvevőket egyesével helyezik ki, és 48 óra alatt kell eljutniuk a kiemelési pontra, korlátozott élelem- és vízmennyiség biztosítása mellett. A 48 órából a második 24 órában az „ellenséges" erők folyamatos üldözést hajtanak végre.

A frissítőkurzus befejezése ismét helikopteres kiemeléssel zárul, ahol egy meghatározott forgatókönyv alapján veszik fel a kapcsolatot a „túlélők" a mentőegységgel, és hajtják végre az azonosítási eljárást. A frissítőkurzus elvégzését ismét egy hivatalos oklevél igazolja [4].

TOVÁBBI LEHETŐSÉGEK

2006 óta több mint 250 fő (repülőhajózó és repülő-műszaki állomány) vett részt a túlélőképzéseinken. A hadműveleti területen szolgálatot teljesítő kollégák PR-tapasztalatait folyamatosan beépítjük a képzések tematikáiba, így azok naprakészen tarthatók.

A képzések sikerét igazolja, hogy a hadműveleti területen feladatokat végrehajtó helikopterszemélyzetek PR-felkészültsége a visszajelzések alapján megfelel az elvárásoknak, valamint külföldről már több nemzet érdeklődött a magyarországi túlélőképzés iránt.

Az oktatói állomány célja a közeljövőben az, hogy a csapat SERE C szintű képzést tudjon önállóan végrehajtani Magyarországon. Az ehhez szükséges feltételrendszer összeállítása nem kis feladat, de ennek megvalósulása esetén a repülőhajózó állomány túlélő- és PR-felkészítése nemzetközi szinten is a legmagasabb szintet érheti el.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] [1] ACO DIRECTIVE 080-101 PERSONNEL RECOVERY IN NATO OPERATIONS, SUPREME HEADQUARTERS ALLIED POWERS EUROPE (2015.04.13.)

[2] [2] ACO MANUAL 080-071 PERSONNEL RECOVERY IN NATO OPERATIONS, SUPREME HEADQUARTERS ALLIED POWERS EUROPE (2016.02.09.)

[3] [3] AJP-3.7 - ALLIED JOINT DOCTRINE FOR RECOVERY OF PERSONNEL IN A HOSTILE ENVIRONMENT, Edition A Version 1, NATO STANDARDIZATION OFFICE (NSO) (2016.02.23.)

[4] [4] 338-4/2013 – MH 86. Szolnok Helikopter Bázis – Levezetési terv a Magyar Honvédségnél rendszeresített légijárművek fedélzetén szolgálatot teljesítő- valamint a légijármű üzembentartó állomány túlélési ismereteinek elsajátítása és fokozása érdekében végrehajtásra kerülő gyakorlatra, illetve a JAS-39 Gripen vízi mentőeszköz ismereti és vízi túlélő tanfolyamra – 2014. 01. 10.

AIRCREW LAND SURVIVAL TRAINING

If we talk about military survival, most of us immediately think of two "surviving" classics, from John Moore the Behind Enemy Lines, or from Ridley Scott the Black Hawk Down. Both cinemas are based on true stories and are a good example of the need for special training for pilots in the field of operations. This can provide them successful survival skills in extreme weather or geographic conditions, as well as hiding, fleeing or escaping from the enemy, and returning to their own troops. Such training is not strange to the helicopter pilots of the Hungarian Defense Forces. The MH 86. Szolnok Helicopter Base has been organizing water and land survival exercises for seven years for aircraft personnel. The importance of the training has been revalued in the missions in Afghanistan; these exercises have been the basis of missionary training for years. In my writing - as an instructor of the survival exercises - I'm trying to present the requirements of the land survival trainings for aircrew members, the structure of domestic training and the results achieved so far.

Keywords: *helicopter, helicopter crew, aircrew, survival training, SERE training, survival exercise*

Simon Zsolt alezredes	LtCol. Zsolt Simon
Repülő felkészítési főnök	Chief of flight training department
MH. 86 Szolnok Helikopter Bázis	HDF 86th Helicopter Base
zsoolti@yahoo.com	zsoolti@yahoo.com
orcid.org/0000-0002-3101-7257	orcid.org/0000-0002-3101-7257

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-24-0393_Simon_Zsolt.pdf

Szaniszló Zsolt

AZ EJTŐERNYŐ NEM MŰKÖDÖTT … A SZOJUZ-1 KATASZTRÓFÁJA

Ötven évvel ezelőtt a harmadik generációs szovjet személyszállító űrhajó első repülése emberrel a fedélzetén katasztrófával végződött. A vizsgálat megállapította, hogy a köztiszteletben álló kozmonauta halálát közvetlenül a nem megfelelően tervezett és előkészített, így nem rendeltetésszerűen működő ejtőernyőrendszer okozta

Kulcsszavak: *Szojuz-1 űrhajó, kozmonauta, ejtőernyőrendszer, kihúzó ejtőernyő, ejtőernyőkupola-leoldózár*

BEVEZETÉS

Az 1967. április 23-án indított Szojuz[1] típusú űrhajó berepülési feladatának végrehajtására Vlagyimir M. Komarov mérnök ezredest, a Szovjetunió Hősét, a Szovjetunió űrhajós pilótáját[2] (1. ábra), tartalékául Jurij A. Gagarin űrhajós ezredest, a Szovjetunió Hősét, a Szovjetunió űrhajós pilótáját[3] (2. ábra) jelölte ki[4] az Állami Bizottság.



1. ábra Vlagyimir M. Komarov mérnök ezredes, a Szovjetunió Hőse, a Szovjetunió űrhajós pilótája



2. ábra Jurij A. Gagarin űrhajós ezredes, a Szovjetunió Hőse, a Szovjetunió űrhajós pilótája

A küldetés katasztrófával végződött. Mivel az emberes űrrepülés első ismert hősi halottjának sorsa szorosan összekapcsolódott a nem rendeltetésszerűen működő ejtőernyőrendszerrel, így a ta-

[1] Szövetség (or. „Союз") (szerző megjegyzése).

[2] Az 1927. március 16-án Moszkvában született berepülő pilóta a Ny. Je. Zsukovszkijról elnevezett Katonai Repülőmérnöki Akadémián szerzett mérnöki oklevelet, majd a Voszhod-1 háromfős személyzetének parancsnokaként, 1964 októberében [1] űrrepülésben vett részt. (szerző megjegyzése).

[3] Az 1934. március 9-én Gzsatszkban [3] született vadászpilóta, a világ első űrhajósaként újabb űrrepülésére történő felkészülési programja során, 1968. március 27-én repülőkatasztrófa során veszítette életét. Ezzel kapcsolatosan lásd: Szaniszló Zsolt: Mi történhetett 1968. március 27-én Moszkva mellett? Miért nem katapultált a MiG-15UTI személyzete? A világ első űrhajósa most lenne 80 éves … (http://www. repulestudomany.hu /folyoirat/2014_2/2014-2-27-0156_Szaniszlo_Zsolt.pdf). (szerző megjegyzése)

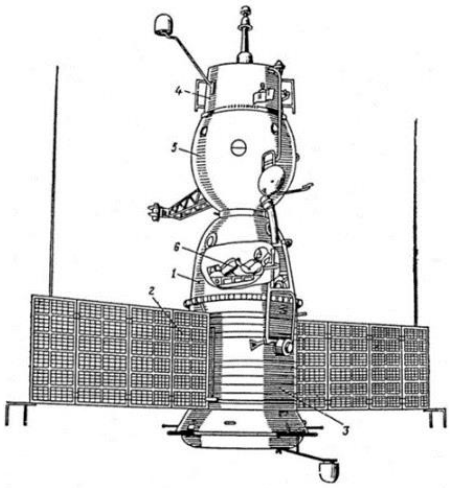
[4] Az űrhajósok kijelölésére még 1966. augusztus 5-én [5] került sor. (szerző megjegyzése).

nulmányom céljául tűztem ki, hogy az alkalmazott ejtőernyő műszaki paramétereinek ismertetésén kívül bemutatom annak rejtetten meglévő technikai hiányosságait ugyanúgy, mint a komplex (űr)repülési rendszer azon elemeit is, amelyek „az emberi tényező" közreműködésével közvetve ugyan, de megdöbbentő(!) szerepet játszottak a megoldhatatlan helyzet kialakulásában.

A Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztályának repülésfelügyeleti (ejtőernyős) főtisztjeként, katonai ejtőernyős oktatóként, ejtőernyő-beugróként e tanulmányomat Komarov ezredes emlékének tiszteletére, valamint az ejtőernyőzés biztonsági kérdései, illetve az űrhajózás iránt érdeklődők figyelmébe ajánlom.

A SZOJUZ-1 REPÜLÉSE. A STARTTÓL A KATASZTRÓFÁIG

Az új célkitűzések megvalósítására tervezett űrhajó[5] (3. ábra) berepülésének körülményei[6] olyan szintű rizikófaktort jeleztek, amely már önmagában véve is kritikus volt.



3. ábra A Szojuz űrhajó szerkezeti vázlata

1 – parancsnoki/leszállóegység, 2 – napelemszárnyak, 3- műszeres-hajtóműegység,
4 – összekapcsoló szerkezet, 5 – orbitális egység, 6 – kézi irányítókar **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**

Ezen felül az eredeti elképzelés egy –, a Szojuz-1-et két nappal később követő [9] – másik Szojuz űrhajóval végrehajtandó űrrandevút és összekapcsolódást, illetve két kozmonauta a világűrön át történő, szkafanderes átszállását is magába foglalta, szimulálva a tervezett szovjet emberes holdprogram egyik fontos momentumát [10].

A Szojuz-1 startja jól sikerült, de az orbitális pályára állást követően, a telemetriai adatok elemzése során kiderült, hogy az űrhajó bal oldali [11] napelem-szárnya nem nyílt ki, amely korlátozta a feladatok végrehajtásához rendelkezésre álló energia mennyiségét. Ezért az Űrre-

[5] A jövőbeni, hosszú távú emberes űrprogramok célkitűzéseinek megfelelő, akár egyhónapos űrrepülést is lehetővé tevő háromszemélyes, önálló – napelemes és akkumulátoros – energiaellátó, valamint életfenntartó rendszerekkel felszerelt űreszköz tervei már 1963 elejére [6] elkészültek. (szerző megjegyzése).

[6] A berepülési program előírásainak egyikét az űrrepülési feladat szkafander nélküli(!) végrehajtása jelentette. Négy évvel később, 1971. június 30-án a Szojuz-11 [8] legénységének tagjai, akik – Komarovhoz, majd az őt követő többi Szojuz-kozmonautához hasonlóan, – ugyancsak űrruha nélkül hajtották végre küldetésüket, a visszatérés során vesztették életüket, amikor megszűnt a leszállóegység hermetikussága. (szerző megjegyzése)

pülés-irányító Központ szakemberei módosították az űrrepülés programját és elhalasztották az ekkor már háromfősre[7] áttervezett Szojuz-2 startját.

Komarov végrehajtotta a lerövidített berepülési programot, majd a földi szakemberek utasítását követve, már a hajnali órákban, kézi vezérléssel[8] kezdte meg a visszatérési folyamat végrehajtását. Erre a döntésre a szűkös energiakészlet kényszerítette a földi szakembereket. Ennek során a Szojuz-1 fékező hajtóművét a 18. Föld körüli fordulata során kapcsolta be, majd megtörtént az űrhajó megfelelő részeinek szétválása [12], amelynek tényét a kozmonauta jelentése és a telemetriai adatok is igazoltak. Az viszont kérdéses, hogy az űrhajós a rádiókapcsolat helyreállása után[9] képes volt-e jelenteni az Űrrepülés-irányító Központnak az ejtőernyőrendszer meghibásodását, amely így nem fékezhette a halálos zuhanást. A leszállóegység közel 40 m/s-os (=144 km/h) sebességgel [13] 03:24 UT-kor csapódott be Orenburg külterületén, Orszk várostól 65 km-re keletre [14] a tajgába (4. ábra), esélyt sem hagyva a túlélésre.



4. ábra A Szojuz-1 leszállóegységének lángoló roncsai a becsapódás helyszínén [15]

Noha minden, a szovjet űrtechnikai eszköz kifejlesztésében és üzemeltetésében részt vevő szakember tudta, hogy az új generációs űrhajó még nem áll készen az emberes űrrepülésre[10], de a katasztrófa valódi okát –, vagyis a kozmikus körülmények között 100%-osan még nem bizonyított műszaki megoldások alárendelését a mindenek felett álló politikai akaratnak [16], – természetesen nem lehetett nyilvánossá tenni. Így végeredményben a katasztrófát közvetlenül kiváltó okok sorában első helyen a nem előírásszerűen működő ejtőernyőrendszer maradt, amely valamilyen szinten igaz is volt.

[7] Szojuz-2 személyzete: Valerij F. Bikovszkij űrhajós ezredes, Jevgenyij V. Hrunov repülő alezredes és Alekszej Sz. Jeliszejev lett volna. (szerző megjegyzése)

[8] Ez kezdetben a Szojuz űrhajók sikeres visszatérésének, majd a Szojuz-T és TM, továbbá még a napjainkban repülő TMA modifikációk újabb kritikus pontját jelenti (szerző megjegyzése.

[9] A földi légkör sűrűbb rétegein történő áthaladás során az ionizáció jelensége meggátolja a rádiólevelezést a leszállóegységben ülő személyzet és földi szakemberek között (szerző megjegyzése).

[10] Ezzel kapcsolatosan lásd e munka *„Az ejtőernyőrendszer kipróbálásának folyamata”* alfejezetben leírtakat, amely speciálisan csak az ejtőernyőrendszerre vonatkozik! Egyébként mielőtt a Szojuz-1 elindult végzetes útjára, a szakemberek még kb. 200 (!) problémát találtak a teljes szerkezeten (szerző megjegyzése).

Az ejtőernyőrendszert 6 fő vezető irányítása alatt egy 22 főből álló szakértői csoport vizsgálta, közel két héten keresztül [17]. Tényszerű megállapításaik megértéséhez nélkülözhetetlen a Szojuz leszállóegység számára megalkotott új ejtőernyőrendszerrel kapcsolatos legfontosabb ismeretek összegzése. E munkámban ezt a komplex repülési tevékenység három fő csoportjának –, a repülési feladat technikai oldalú biztosításának, a repülés kiszolgálásának, valamint a repülés végrehajtásának – egyikébe besorolva vizsgálom, választ keresve a Szojuz-1 katasztrófájával kapcsolatosan kizárólagosan meglévő(!) emberi felelősség kérdésére.

A SZOJUZ EJTŐERNYŐRENDSZERE

Az űrrepülési feladat technikai biztosításának kérdése – Az ejtőernyőrendszer kifejlesztése

Bár a korábbi szovjet űrhajó-generációk is ejtőernyővel a szárazföldre tértek vissza a világűrből, az új űrhajó új leszállórendszer[11] kifejlesztését igényelte, melynek fő céljaként határozták meg, hogy: „*hajtsa végre az űrhajó visszatérő egységének a személyzettel együtt történő*[12]*, biztonságos ejtőernyős leszállítását a Szovjetunió szárazföldi területén"* [18]. A tervezéssel kapcsolatos feladatokkal a Fjodor D. Tkacsev[13] főkonstruktőr (5. ábra) vezetése alatt álló kollektívát[14] bízták meg [20].



5. ábra A Szovjetunió neves ejtőernyő-konstruktőrei, balról jobbra haladva:
Fjodor D. Tkacsev, Igor L. Gluskov és Nyikolaj A. Lobanov **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**

[11] Bár a Szojuz-1 katasztrófáját a nem megfelelően tervezett és működő ejtőernyőrendszerre okozta, ez csak az egyik, de a legfontosabb eleme a személyszállító űrhajó komplex leszállórendszerének. Ezért itt csak olyan mértékben tárgyalom a rendszer többi alkotóelemét, amennyire az a témám szempontjából szükséges. (szerző megj.)

[12] Fontos tény, hogy a Vosztok-kozmonauták 7000 m-es magasságban katapultáltak, így a leszállóegységtől függetlenül értek földet. Ezzel kapcsolatosan lásd: Szaniszló Zsolt: 1961. április 12. Gagarin földetérése személyi ejtőernyővel … Valamint a folyamat technikai és személyi háttere (http://www. repulestudomany.hu /folyoirat/2016_3/2016-3-08-0349_Szaniszlo_Zsolt.pdf) – a Szerző megjegyzése.

[13] A szovjet ejtőernyőtervezés jeles képviselőjeként, már az 1930-as években vizsgálta a kupolák konstrukciós légáteresztőképessége növelésének előnyeit, megvalósíthatóságának korlátait. (a szerző megjegyzése).

[14] Ejtőernyős Deszant Szolgálat Tudományos Berepülő Kísérleti Intézet (or. „Научно-Испытательный Экспериментальный Институт Парашютно-Десантного Службы – НИЭИ ПДС") (szerző megjegyzése).

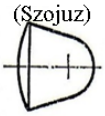
Az ejtőernyőrendszer tervezésének folyamata

Az új leszállórendszer megalkotásának előfeltételét elsősorban az ejtőernyő- és deszant-technika fejlődésében bekövetkezett változások biztosították[15], párhuzamosan a nagyobb biztonságra való törekvés igényével a kozmikus ejtőernyőrendszerek területén. Az ejtőernyők tervezése – más légijárművek hasonlóan – az alkalmazhatósági követelmények, mint kiinduló kritériumok meghatározásával kezdődik. Ezt elsősorban annak a testnek a jellemzői (tömeg, aerodinamikai kialakítás) határozzák meg, amelyet ejtőernyő segítségével szándékoznak lejuttatni a kívánt földetérési zónába. Ezek jelentősen befolyásolták a Szojuz leszállóegység visszatérésének tervezett folyamatát[16] is, beleértve az ejtőernyős ereszkedés szakaszát, valamint a földfelszínre érkezés pillanatát.

A tervezés kritériumai

A leszálló egység kialakítása

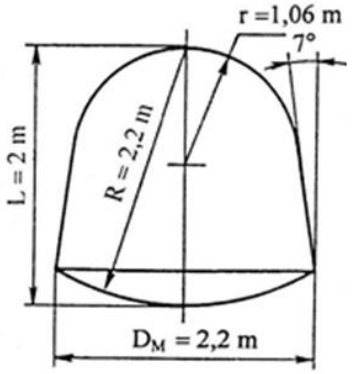
Az új űreszköz leszállóegységének kialakításában fontos követelményt jelentett, hogy sárkányszerkezete minimális siklószámmal is rendelkezzen, vagyis a légkörbe transzszonikus sebességtartományban, ballisztikus pályán haladva, ne „mint egy darab kő” essen be, hanem minimális siklási tulajdonsággal is rendelkezzen[17]. A konstruktőrök ennek megfelelően szakítottak a Vosztok[18]- és Voszhod[19]-kabinokat jellemező, szilárdsági szempontból kedvezőbb gömb alakú szerkezeti formával (1. táblázat).

Jellemzők	A leszállóegység típusa	
	Ballisztikus	Kis siklási képességekkel rendelkező
Kialakítás, befoglaló méretek	Gömb alakú (Vosztok, Voszhod) 	Szférikus kialakítású (Szojuz) 
Siklószám értékek - hiperszonikus sebességen - szubszonikus sebességen	 0 0	 0,2÷0,5 0
Az orbitális pályáról való visszatérés módja	Ballisztikus	Irányítottan csúszó, sikló
A leszállás végrehajtásának módja	Függőleges	
A leszállás pontossága (m)	$\pm 300*10^3$	$\pm 30*10^3$

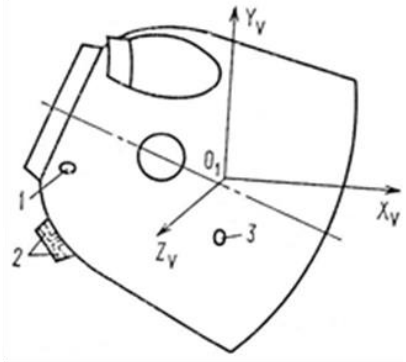
1. táblázat A szovjet űrhajók leszállóegységeinek aerodinamikai kialakítása [1]

[15] Ezek alatt e munkában elsősorban a "puha" leszállást biztosító, reaktív elven működő rakétahajtóművet értem, amely már a Voszhod-kozmonauták leszállóegységgel történő landolását is biztosította. (szerző megjegyzése).
[16] Ennek sajátosságát a megtörtént események visszafordíthatatlansága adja: gyakorlatilag lehetetlen megszakítani a már megkezdett leszállás folyamatát, miközben a leszállóegység az atmoszféra egyre sűrűbb légrétegein áthaladva a Föld felé közeledik. (szerző megjegyzése).
[17] Ezzel a visszatérés során a túlterhelés értékét próbálták a tervezők $n_y<8$ alatt tartani, de így a hatásidő is növekedett. Ahhoz, hogy az űrhajósok szervezete ekkora túlterhelést huzamosabb időn (5–10 perc) keresztül is el tudjon viselni, szinte fekvő pozícióban kell elhelyezkednie a parancsnoki fülkében (lásd: 8. és 13. ábra!) az orbitális pályára bocsátás és a visszatérés szakaszában is, mivel ebben a helyzetben a legnagyobb az emberi szervezet túlterheléstűrő-képessége [21]. (szerző megjegyzése).
[18] Vosztok (or. „Восток”) Kelet (szerző megjegyzése).
[19] Voszhod (or. „Восход”) Napfelkelte (szerző megjegyzése).

A maximálisan 3 t össztömegű, 2,2 m átmérőjű leszállóegység 3,8–3,9 m^3-es térfogatú belső terében kellett helyet szorítani az űrhajó vezérlőpultjának (lásd: 9. és 10. ábra!), a különböző rendszerek, berendezések működését ellenőrző műszereknek, az életfenntartó és hírközlő eszközöknek valamint természetesen a leszállóegység berendezéseinek, közöttük az ejtőernyők tároló konténereknek [23] is. A gépkocsifényszóró-alakú szerkezet külső felületére (6. ábra) speciális hajtóműegységet (7. ábra) is felszereltek.

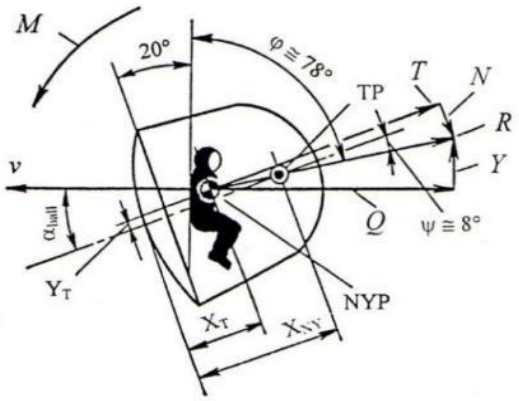


6. ábra A Szojuz űrhajó leszállóegységének befoglaló méretei **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**



7. ábra A leszállóegység külsején elhelyezett helyzetstabilizáló hajtóműegységek **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**
1 – irányszöget beállító-, 2 – bólintási szöget beállító- 3 – dőlési szöget beállító hajtóműegység

Ezek feladata a Föld légkörébe történő belépéshez, majd az – ún. „stabil testhelyzetben zuhanó" ejtőernyőshöz hasonló – „irányított" szabadeséshez, így az ejtőernyőrendszer elakadásmentes nyílási folyamatához szükséges optimális állásszög (8. ábra) beállítása volt.



8. ábra A Szojuz leszállóegységre és a kozmonautákra az ún. „stabil zuhanási helyzet"-ben ható aerodinamikai erők és nyomatékok vázlata **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**
v – repülési sebesség, R – összegzett (eredő) aerodinamikai erő, Y – felhajtó-erő, Q – homlokellenállás ereje, N és T – normál- és tangenciális irányú erő (az eredő erő egyik felbontási módjának megfelelően), M – aerodinamikai nyomaték, α_{ball}– kiegyensúlyozási állásszög, φ – az eredő erő és a kozmonauta háta közé bezárt szög, ψ – az eredő erő és a leszálló egység tengelye által bezárt szög, Y_T – a tömegközéppont oldalsó vetülete, X_T és X_{NY} – a tömeg- és nyomásközéppont hosszirányú koordinátái, TP – tömegközéppont, NYP – nyomásközéppont

Az ejtőernyőrendszer többlépcsős kialakítása

A kozmikus szerkezet sebessége az orbitális pályára lépéshez el kell érje az ún. 1. kozmikus sebességet 7,91 km/s-t [71], így visszatérésnél ezt kell lecsökkenteni. A fékezőimpulzus hatá-

sára a sebesség kezdetben csak jelentéktelen mértékben csökken a repülési magassággal együtt. Amint a leszállóegység belép a földi atmoszférába, fokozatosan süllyed és ezzel arányosan nő a levegő ellenállása, amely 10–11 km-es magasságban a sebességét kb. 230 m/s-ra csökkenti. Az ejtőernyőt itt még nem szabad működtetni, mert a kupola anyaga nem bírná ki a belobbanáskor fellépő, jelentős nagyságú dinamikus terhelést és darabokra szakadna [27], amely egyértelmű következményekkel járna.

Mivel a kozmonauták épségben történő visszatérése a cél, ezért nem szabad elfelejtkezni az ejtőernyőkupola nyílási terhelésének élő szervezetre gyakorolt élettani hatásáról sem. A repülő-hajózó állomány személyi mentőernyőit vizsgálva, az ejtőernyő belobbanásának pillanatában az emberi testre n_y = 5–8 nagyságú függőleges túlterhelés hat [28]. A kozmonautákat különböző sérüléseket is érhetik, az üléshez rögzítő hevederek rossz beállítása esetén a testükre ható terhelések egyenlőtlen eloszlása következtében.

Mindezek elkerülésére az új űrhajó leszállóegységének visszatérését – a Vosztok és a Voszhod-kabinoknál alkalmazottakhoz hasonló, de attól eltérő szerkezetű, – többlépcsős ejtőernyőrendszer segítségével tervezték megvalósítani.

Az ejtőernyőrendszer automatikus működtetése

A személyzet és a leszállóegység által alkotott „ember-gép rendszer”-ben a kézzel történő ejtőernyőnyitást nagyon nehéz lenne megvalósítani a leszállásnál. Ennek oka egyrészt a személyzetre ható túlterhelés nagysága, – amelynek értéke a számítottnak megfelelő paraméterekkel végrehajtott leszállásnál n_y = 4–5, míg ballisztikus leszállásnál: n_y =7–8, – másrészt az a gyakorlati tapasztalat, hogy nagyszámú parancs kiadása operatív sorrendben, kis időintervallumon belül inkább automatának való feladat, mint embernek. És végül nem szabad figyelmen kívül hagyni annak a lehetőségét sem, hogy az űrhajó személyzete esetleg elveszíti az eszméletét vagy a munkavégző képességét, ezért a számítottnak megfelelő leszállási üzemmódot automatikus rendszernek kell vezérelnie [29].

Ennek az elképzelésnek megfelelően nem is tervezték biztosítani a kozmonauták számára sem a fő-, sem a tartalék ejtőernyőrendszer kézi vezérlésű működtetését[20], amely még a földetérés után a felszakadó-heveder leszállóegységtől történő leválasztására is vonatkozott(!), az ún. „kutyázás”[21] megelőzése céljából. A konstruktőrök szerint a személyzet egyedüli feladata nem lehet más, mint az ejtőernyőrendszer működésekor észlelt megfigyelések jelentése az Űrrepülés-irányító Központ szakemberei felé.

A teljesen automatikus működési folyamat feltételezi a fő-, valamint annak meghibásodása esetén a tartalék ejtőernyőrendszer – ugyancsak emberi beavatkozás nélküli – tökéletes működését: így a fülkében csak egy, az utóbbival kapcsolatos jelzőműszer elhelyezését tartották

[20] Itt alapvető különbséget figyelhetünk meg a kortárs amerikai –, szintén harmadik generációs – Apollo űrhajó parancsnoki egységének visszatérését biztosító ejtőernyőrendszer tervezési filozófiájával összehasonlítva. Ez volt az egyetlen(!) ember vezette űreszköz, amelynél a tervezők biztosították a személyzet részére az ejtőernyő-konstrukciót működésbe hozó kézi vezérlés lehetőségét, még akkor is, ha ez a teljes legénység összehangolt munkáját igényelte. A Szojuz-Apollo közös űrrepülésben részt vevő Apollo-21 személyzetének 1975. július 25-ei visszatérése [30] igazolta, hogy a mérnökök munkája nem volt hiábavaló. (szerző megjegyzése).

[21] A kifejezés ejtőernyős zsargonban arra a jelenségre utal, amikor a földetérést követően az ejtőernyős a kutya galoppozásához hasonló négykézláb mozgással igyekszik felállni, vagy megközelíteni a talajszél hatására belobbanó, és őt vonszoló ejtőernyőkupolát. (szerző megjegyzése).

kívánatosnak [31]. A parancsnoki pult (9. a. és b. ábra) központi tablóján (10. ábра), felülről a második sor, balról második ablaka piros fénnyel villogva és egyidejűleg hangjelzést adva volt hivatott tudatni az űrhajósokkal a tartalék ejtőernyőrendszer működésbe lépését [35].

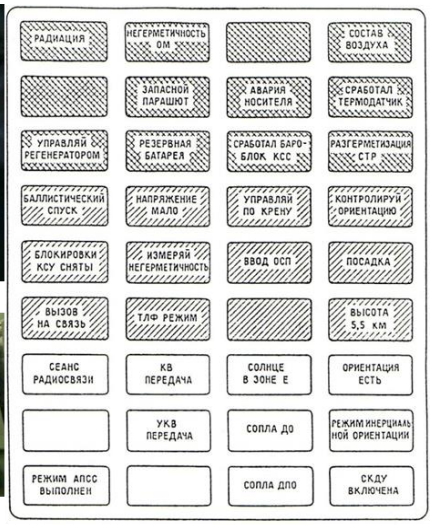


a.



b.

9. A Szojuz leszállóegység parancsnoki pultja (**a**. - szemből; **b**. bal oldali ablakon keresztül)
Hiba! A hivatkozási forrás nem található. Hiba! A hivatkozási forrás nem található.



10. ábra A parancsnoki pult központi tablója **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** (A „ЗАПАСНОЙ ПАРАШЮТ” felirat jelentése: „TARTALÉK EJTŐERNYŐ”)

Az ejtőernyőrendszer működési megbízhatósága

Ez elsősorban a teljes ejtőernyőrendszer dublírozását[22] jelentette, ahol a tartalék ernyőrendszer ún. „hideg” tartalékban[23] vplt [36].

A tervezett ejtőernyőrendszer szerkezeti elemei és működési folyamata

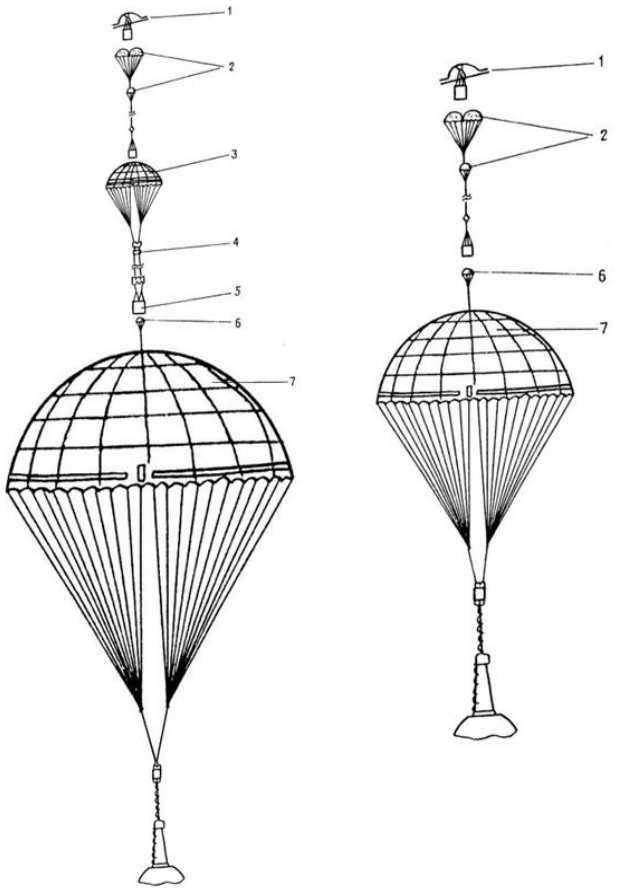
A fő- és tartalék ejtőernyőrendszer fő szerkezeti elemei

A tervező kollektíva elképzelése az volt, hogy a fő-, illetve – elsősorban csakis annak működésképtelenné válása esetén automatikusan működésbe lépő – tartalék ejtőernyőrendszer, a szerkezeti elemeit (11. ábra) és működési folyamatát tekintve nagyfokú hasonlóságot, illetve azonosságot mutasson egymással[24].

[22] Amíg a Vosztok űrhajóban a kozmonauta katapultülése és személyi fő- és tartalékejtőernyői biztosították a tartalék ejtőernyőrendszer funkcióját, – ezzel kapcsolatosan lásd: Szaniszló Zsolt: 1961. április 12. Gagarin földetérése személyi ejtőernyővel… valamint a folyamat technikai és személyi háttere (http://www. repulestudomany.hu /folyoirat/2016_3/2016-3-08-0349_Szaniszlo_Zsolt.pdf) – a Voszhod egymás mellett párhuzamosan kihúzódó és belobbanó, kettős ejtőernyőkupolás rendszert szereltek fel, amely bizonyos mértékig az Apollo parancsnoki egység „hármas ejtőernyő-fürt”-jéhez hasonlított. (szerző megjegyzése).

[23] Ez azt jelenti, hogy csak akkor kell működésbe lépnie, ha a fő ejtőernyőrendszer működésképtelenné vált. Ennek ellentéte az ún. „meleg” tartalék, melynek legjobb példája a már említett amerikai Apollo űrhajó parancsnoki egységének ejtőernyőrendszere, ahol az egyszerre működésbe lépő, három ejtőernyő-kupolából álló rendszer tölti be a fő- és a tartalék ejtőernyőrendszer funkcióját is. (szerző megjegyzése).

[24] Ez az irányvonal – a szovjet/orosz ejtőernyőrendszerek területén, – mind a mai napig nagymértékben leegyszerűsíti a kozmikus jármű speciális leszálló-berendezésének, valamint legfontosabb alkotórészeinek: a fő- és a tartalék ejtőernyőrendszernek a tervezési-, a gyártási-, majd később magára az alkalmazásra történő előkészítési folyamatát. (szerző megjegyzése).



11. ábra A Szojuz leszállóegység fő– és tartalék ejtőernyőrendszerének szerkezeti elemei [37]
1 – az ejtőernyő-konténer fedele, 2 – kihúzó ejtőernyők blokkja, 3 – fékező ejtőernyő, 4 – elforduló bekötési fészek, 5 – a fő ejtőernyőkupola belsőzsákja, 6 – segéd ejtőernyő, 7 – fő ejtőernyő

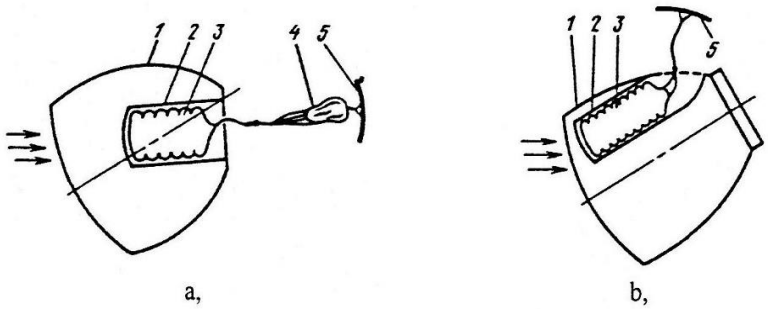
A fő- és tartalék ejtőernyőrendszer további szerkezeti elemei

Az ejtőernyőkonténerek

Az, hogy a fő- és tartalék ejtőernyőrendszert lerobbantható fedéllel ellátott –, és hitelesített csatolótag segítségével a kihúzó ejtőernyők blokkjával mechanikus kapcsolatban lévő, – különálló, hermetikusan zárt konténerekben kell elhelyezni, – amelyek megvédik a fő- és tartalék ejtőernyőrendszer elemeit a környezet káros hatásaitól, pl. az ultraibolya-sugárzástól, a magas hőmérséklettől a Föld sűrűbb légköri rétegeibe történő belépéskor stb., – szintén nem vitás. Viszont azok méretei, leszállóegységben történő elhelyezésük és alakjuk újabb kihívást jelentettek az ejtőernyőrendszert tervező mérnökök számára.

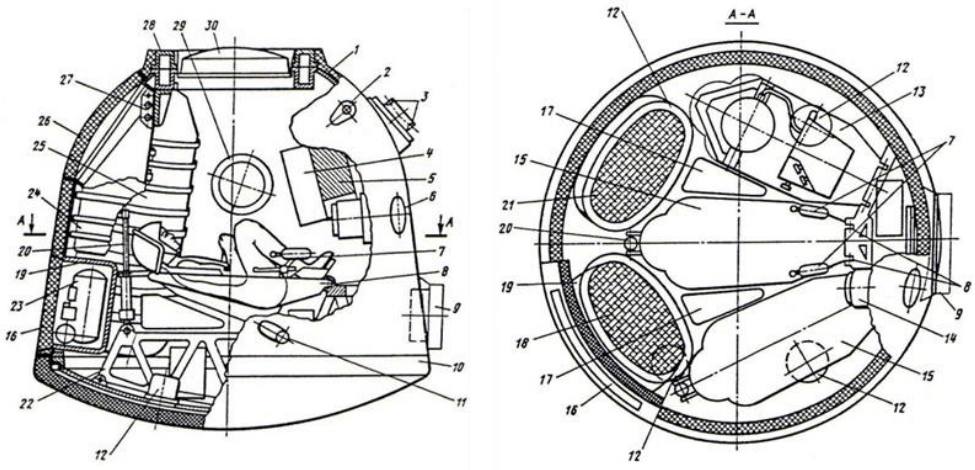
A konténerek befoglaló méreteit a fő- és a tartalék ejtőernyőrendszerek elemeinek, elsősorban a – legnagyobb helyet foglaló – nagyméretű ejtőernyőik befoglaló méretei határozták meg. Előbbinél ez 0,3 m^3-es, utóbbinál 0,2 m^3-es térfogatú konténert eredményezett [38].

A konténerek elhelyezése a rendszer elemeinek elakadásmentes kivezetését, vagyis az ejtőernyőrendszer számított paramétereknek megfelelő működését biztosították. A leszállóegység formai kialakításából adódóan erre két lehetőség kínálkozott, a kozmikus szerkezet súlyponti helyzetét is figyelembe véve (12. ábra). Az a, ábrán megfigyelhető a kihúzó ejtőernyők blokkját szemléltető ejtőernyőkupola a leszállóegységet körülvevő áramlás turbulens zónájába kerülésének esélye, amely a teljes ejtőernyőrendszer működésképtelenségét okozhatja.



12. ábra Az ejtőernyőkonténerek beépítési lehetőségei a Szojuz leszállóegységbe [39]
1 – leszállóegység, 2 – ejtőernyőkonténer, 3 – behajtogatott ejtőernyő, 4 – kihúzó ejtőernyő, 5 – az ejtőernyőkonténer fedele
a – a leszállóegység tömegközéppontjában történő elhelyezése, **b** – a leszállóegység fala mentén történő elhelyezése

Ennek elkerülése céljából a tervezők a b, ábra szerinti konténerelhelyezés mellett döntöttek, ahol a két ejtőernyőtartály egymás mellé került beépítésre (13. ábra).



13. ábra A Szojuz űrhajó leszállóegységének szerkezeti kialakítása [40]
10 – ledobható hővédő pajzs, 12 – puha leszállást biztosító hajtóműegységek (4 db), 18 – tartalék ejtőernyő-rendszer, 20 – ülésamortizátor, 21 – fő ejtőernyőrendszer, 24 – a tartalék ejtőernyőrendszer konténere, 25 – a fő ejtőernyőrendszer konténere, 26 – konténer fedél, 27 – az ejtőernyő felstakadó hevederének csomópontja

A konténerek alakja szempontjából a konstruktőrök –, elsősorban egyszerűbb kialakítása és gyártása miatt, – kezdetben a hengeres forma mellett döntöttek, amelyről a későbbiekben tragikus körülmények között derült ki, hogy nem volt a legideálisabb választás. A 13. ábra – amelyen a tanulmány csak az ejtőernyővel és a leszállórendszerrel kapcsolatos részeket nevezi meg, – még ilyen kialakítású konténerekkel mutatja be a Szojuz leszállóegység felépítését.

Mivel a tervezett alkalmazási magasságban a hermetikusan lezárt ejtőernyőkonténer fedelének lerobbantásakor a konténer belsejében lévő nyomás hirtelen leesik és a külső légköri nyomással lesz egyenlő, így várható volt annak jelentős deformációja. Biztonsági okokból ezért a konténer és a leszállóegység lakott belsejű egységének külső felületeit 10–11 Mp/m^2 (= 0,0981–0,10791 N/mm^2)-es felületi terhelésre méretezték [41].

Az ejtőernyő-leválasztók

Általánosságban igaz, hogy tartalék-ejtőernyő biztonságos működtetésének biztosításához először meg kell szabadulni a légáramlatba kijutott és meghibásodott vagy rosszul kinyílt főejtőernyőtől,

majd csak ezt követően szabad megindítani a tartalék-ejtőernyő nyitási folyamatát. Ha ez nem történik meg, – vagyis a fő ejtőernyőrendszer adott, meghibásodott elemét nem választják le a leszállóegységről, – akkor fennáll az esélye, hogy az a jól működő tartalék ejtőernyőrendszer főejtőernyőjének kupoláját is meggátolja a sikeres belobbanásban[25]. Ennek lehetőségét viszont speciális leoldózárak[26] felszerelésével nemcsak minimálisra lehet, de kell is csökkenteni!

A leoldózárak Szojuz leszállóegység ejtőernyőrendszerén történő alkalmazásával kapcsolatosan fontos tényt, hogy a konstruktőrök a fő ejtőernyőrendszer nem minden alkotóelemének leoldási lehetőségét biztosították azok meghibásodása esetén, s ez hiányosság –, elsősorban a kis kihúzó ejtőernyő, illetve a fékező ejtőernyő vonatkozásában, – 1967. április 24-én bosszulta meg magát.

A tartalék ejtőernyőrendszerrel kapcsolatosan egyszerűbb volt a helyzet: annak elemeit nem volt értelme leoldózárakkal ellátni. Ez vonatkozott földetérés utáni esetre is: így annak fő ejtőernyőjét sem kézi, sem automatikus működésű ejtőernyő-leválasztóval nem szerelték fel.

A nagyobb felületű kihúzó ejtőernyő leválasztása

A mérnökök úgy vélték, hogy a fő ejtőernyőrendszer működésbe lépését követően erre csak abban az esetben kerülhet sor, ha a leszállóegység a megengedettnél nagyobb sebességgel zuhan a Föld felé. Ez a meghibásodás vagy a leszállóegység ballisztikus pályán, a megengedettnél nagyobb sebességgel történő visszatérésekor a fő ejtőernyőrendszer fékező- és főejtőernyő kupolájának konténerbe történő beszorulását okozó konténer-deformáció miatt, vagy normál leszállási pályagörbe esetén a fő ejtőernyőkupola sérülése miatt jöhet csak létre.

E helyzetekben ugyanúgy szükséges a rosszul működő rendszerelem leválasztása, azonban a tervezők elégségesnek tartották a két kihúzó ejtőernyőből álló blokk nagyobb felületű ejtőernyőjének leválasztását biztosítani egy hitelesített szakítószilárdságú csatolótag segítségével, míg a kisebb felületű ejtőernyő számára már nem adták meg ennek lehetőségét.

A főejtőernyő leválasztása

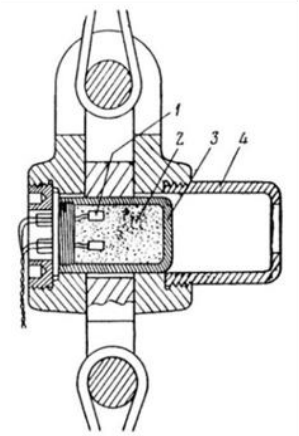
A rosszul kinyílt vagy működés közben meghibásodott főejtőernyő leoldásáért a teljesen automatikusan működő leszállítórendszer felelt, az előzetes tervezési elképzelésnek megfelelően. Az erre a célra szolgáló leoldózár (14. ábra) a fő ejtőernyőrendszer konténerének belsejében, annak pereme alá építették be (15. ábra).

Mivel a főejtőernyő leválasztása a földetérés után is szükségessé válhat – a már említett „kutyázás" jelenségének elkerülése okán –, ezért a konstruktőrök kezdetben egy speciális ejtőernyő-leválasztó mechanizmussal[27] (16. ábra) tervezték felszerelni a fő ejtőernyőrendszert.

[25] A turbulencia belesodorhatja a tartalékot a fő ejtőernyőkupola-zsinórzat által alkotott gubancba, megakadályozva ezzel nyílási folyamatát: ez kétséget kizáróan a leszállóegység lezuhanásához és a személyzet elvesztéséhez vezet. Igaz, hogy ez a megállapítás elsősorban a légcellás ejtőernyőkre igaz, de konvencionális kialakítású ejtőernyőkupola esetén is előfordult már ebből kifolyólag baleset, illetve katasztrófa. (szerző megjegyzése).

[26] Tény, hogy az 1960-as évekre a Szovjetunió olyan szintű, elsősorban gyakorlati ejtőernyős tapasztalatokkal rendelkezett, hogy a tervezők ezt az alapvető vészhelyzeti szituációt nem hagyhatták (volna) figyelmen kívül. Ebben az időszakban már elterjedten alkalmaztak a sportejtőernyőzés területén különféle leoldózárakat a rosszul kinyílt főejtőernyő leválasztására: megvolt tehát a feltétele a kozmikus eszközök fedélzetén történő alkalmazás adaptálhatóságának, ha a tervezők a kozmonauták biztonságát kívánták szem előtt tartani. (szerző megjegyzése).

[27] Ez a szerkezet a Légideszant Csapatok teherdeszant ejtőernyőihez kifejlesztett kezdeti, önműködő ejtőernyő-leválasztóinak működésén alapult. (szerző megjegyzése).

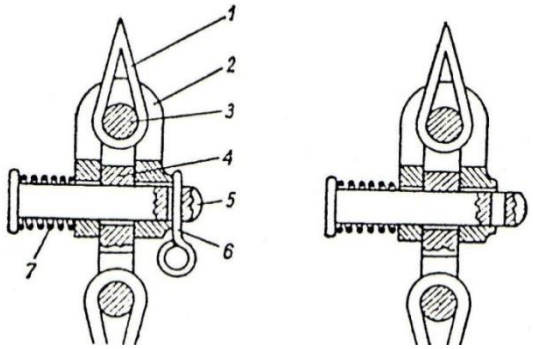


14. ábra A főejtőernyő leoldózár szerkezeti vázlata [42]
1 – elektromos gyutacs, 2 – lőportöltet, 3 – csap, 4 – csapelfogó



15. ábra A főejtőernyő leoldózár beépítése a fő ejtőernyő konténerének pereme alá [43]

Az önműködő szerkezet működési elve a következő: az ejtőernyő kupolájának belobbanásakor a zsinórok megfeszülnek, és ezek egyike kihúzza a tüskét a zárórúd furatából. A zárórúd viszont addig nem mozdul(hat) el, amíg a terhelés megszűntével (amely elméletileg csak a teher földetérését követően valósulhat meg) a rugó erejének hatására ez lehetővé nem válik.



16. ábra Az önműködő ejtőernyő-leválasztó szerkezeti vázlata [44]
1 – felszakadó heveder kötélszeme, 2 – kengyel, 3 – csapszeg, 4 – kapcsolószem, 5 – zárórúd, 6 – tüske, 7 – rugó

Mivel ez az egyszerű szerkezetű ejtőernyő-leválasztó nem adott megnyugtató választ a nyílási terhelés változásának problémájára[28], ezt a feladatot is a konténerperem alá beépített, de már kézi vezérléssel működő ejtőernyő-leválasztó alkalmazásával oldották meg. Ennek nyomógombját a gépszemélyzet-parancsnok vezérlőkarjának végére helyezték el[29].

[28] Az ejtőernyőkupola gyors belobbanása esetén előfordult olyan eset is, hogy a leoldózár tehermentesült és még a levegőben megtörtént az ejtőernyő leválasztása. Georgij Ty. Beregovoj repülő alezredes, a Szovjetunió Hőse – ezredesként később a Szojuz-3 űrhajósa, majd az első űrhajós vezérőrnagyként a Moszkva melletti Gagarin Űrhajósképző Központ parancsnoka –, repülőakadémiai tanulmányai során több automatikus működésű ejtőernyő-leválasztó légi meghibásodásának [45] volt szemtanúja egy ejtőernyős deszant gyakorlat szemléje során. (szerző megjegyzése).

[29] A leszállóegység földetérése után mindig a személyzet parancsnokának kötelessége volt a főejtőernyő felszakadó hevederének kézi leválasztása, ha a körülmények egyértelművé tették, hogy ez jelenti a biztonságot a személyzet részére. Dr. Magyari Béla nyugállományú okleveles mérnök ezredes, kiképzett űrhajós közlése szerint, biztonsági okokból a tervezők ennek lehetőségét is úgy oldották meg, hogy hiába is nyomogatta a személyzet parancsnoka az űrhajó irányítókarján elhelyezett leválasztó gombot, az csak a földetérés után aktivizálódhatott. A mérnökök ezzel kapcsolatos döntését az űrtörténelem bizonyítottan legalább egy alkalommal igazolta: 1975. április 5-én, Vaszilij G. Lazarev orvos ezredes, valamint Oleg G. Makarov, űrhajós pilóták sikertelen űrrepülésénél. A hordozórakéta meghibásodása miatt az orbitális pályára állás meghiúsult, az előírás szerint működő főej-

A fő- és tartalék ejtőernyőrendszer működése a Szojuz űrhajó visszatérési folyamatának ejtőernyős fázisában

A fő ejtőernyőrendszert – a már említett okok miatt –, az automatikus földetérés vezérlőrendszer hozza működésbe 9,6 km-es barometrikus nyomásnak megfelelő magasságban. A berendezés egy különbségképzőtő elemtől (egy barometrikus relétől) kapja meg a vezérlőjelet a fő ejtőernyőrendszer konténerfedelének eltávolítására, ami a leszállóegység aktuális tartózkodási magasságában uralkodó légnyomás értékét hasonlítja össze egy aneroid szelencébe zárt, 9,6 km-es magasságnak megfelelő, beállított barometrikus nyomásértékkel.

Az ejtőernyőkonténer teteje egy csatolótag segítségével kapcsolódik a kihúzóegység blokkjához, amelyet – lerobbantását követően – a leszállóegységtől történő eltávolodáskor maga után húz a légáramlatba, ahova a kihúzóegység nagyobb, 9,7 m^2-es, valamint kisebb, 1,5 m^2-es felületű kihúzó ejtőernyői ennek a sorrendnek megfelelően követik egymást [46]. A nagy kihúzó ejtőernyőt hitelesített csatolótag köti össze a kis kihúzó ejtőernyővel – és rajta keresztül a fékező ejtőernyővel –, amely ún. „nagy visszatérési sebesség” esetén a belőle képződő torlónyomás hatására elszakad: ebben az esetben a kis kihúzó ejtőernyő egymagában fogja betölteni a kihúzó blokk funkcióját. Ún. „kis visszatérési sebesség” esetén mind a két ejtőernyőkupola részt vesz a teljes rendszer további működési folyamatának fenntartásában [47]: ekkor a kis sebességértéket a kihúzó ejtőernyők kupoláinak összegzett, nagyobb felülete kompenzálja. Feladatuk végeztével a kihúzó ejtőernyők leválnak a fékező ejtőernyőről.

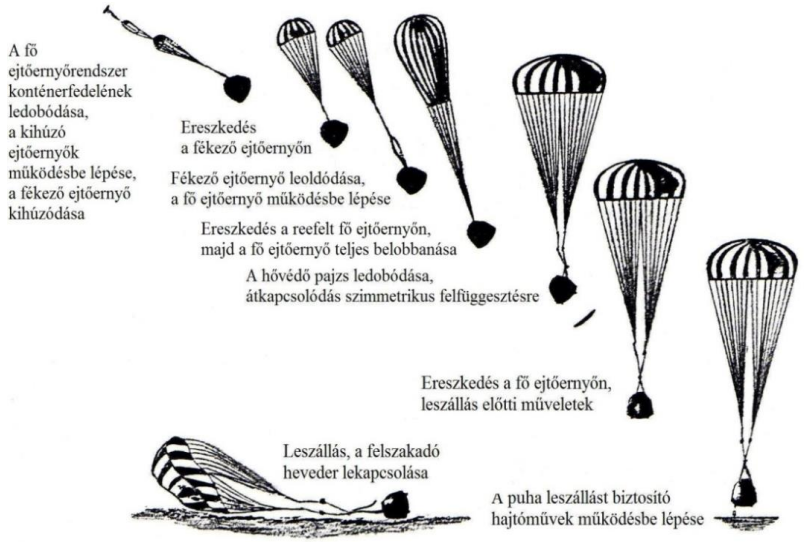
A 14 m^2-es felületű fékező ejtőernyő a leszállóegység fő ejtőernyőrendszerét magába rejtő konténer peremén kialakított szemhez, illetve egy csatolótag segítségével a főejtőernyő kupoláját rejtő belsőzsákra erősített, kis lehúzó ejtőernyőhöz kapcsolódik. A belobbant fékező ejtőernyő 90 m/s értékre csökkenti le a leszállóegység sebességét, majd a konténer fedelének lerobbantásától számított 16,5 s múlva [48], kb. 7 km-es barometrikus magasságban –, miután az automatika parancsot adott a szem lerobbantására, – eltávolodik a leszállóegységtől, maga után húzva az ejtőernyőtartályból a belsőzsákba rejtett fő ejtőernyőkupolát, majd szintén leválik a rendszerről.

Az 1000 m^2-es felületű kupolájú főejtőernyő „zsinórzat először”-elven működik, vagyis a belsőzsák az ejtőernyő zsinórok lefűződése és megfeszülése után kezd csak el lehúzódni a kupoláról, egy segéd ernyő segítségével. Miután a belsőzsák teljesen lehúzódott a kupoláról, az, az ún. „reefelés”[30]-nek köszönhetően még nem képes azonnal belobbanni, csak részben telik meg levegővel. Mindenesetre ez is fékezi a leszállóegység-ejtőernyő-rendszer komplexumot, így annak zuhanási sebessége a fő ejtőernyőkupola konténerből történő kihúzódását követően 4 s alatt 35 m/s értékre csökken le. Majd a reefelés megszűnik, a sebesség 13–17 m/s-os értékre csökken [49], amivel biztosítható, hogy a fő ejtőernyőkupola terhelése a teljes belobbanás pillanatában ne érje el a 13 Mp (= 127 530 N)-ot [50]. A fő ejtőernyőkupola a teljes belobbanási folyamatát 5,5 km-es barometrikus nyomásnak megfelelő magasságban

tőernyőnek köszönhetően a leszállóegység az Altaj-hegységben ért földet, ahol a szakadékba történő belecsúszástól a leoldózár mentette meg a fülkében ülő személyzetet, miután a főejtőernyő kupolája bokros-fás területen elakadt. (szerző megjegyzése).

[30] Reefelés (ang. kurtítás): A vitorláshajók korából megmaradt szakkifejezés a vitorlafelület csökkentésére. Ejtőernyős terminológiában az ejtőernyőkupola belépőéle által határolt keresztmetszet csökkentését jelenti, amely az ejtőernyő speciális nyíláskésleltetését jelenti. Lehetővé teszi a kupola lassabb belobbanását, ezáltal csökken az ejtőernyős rendszerre ható dinamikus terhelés nagysága is. (szerző megjegyzése).

fejezi be [51], a zuhanási sebességét lecsökkentve arra az – ejtőernyősök átlagos földetérési sebességének megfelelő, kb. 6 m/s-os nagyságú – értékre, amellyel a leszállóegység már biztonságosan képes végrehajtani a leszállást (17. ábra).



17. ábra A Szojuz leszállóegység fő ejtőernyőrendszerének működési folyamata [52]

A fő ejtőernyőrendszer konténerben maradása, bármely elemének meghibásodása, sérülése esetén a leszállóegység sebessége nem csökken le a számított értékekre, ezt sebességérzékelők érzékelik és jelzik az automatikus földetérés vezérlőegységnek. Ez az egység a fő ejtőernyőrendszer 9,6 km-es barometrikus nyomásnak megfelelő magasságban bekövetkező működésbe lépésétől számított 22. s-ban adja ki a vezérlőjelet a végrehajtó egységnek, amely 4,5 km-es barometrikus nyomásnak megfelelő magasságban [53] utasítást ad a tartalék ejtőernyőrendszer konténerfedelének lerobbantására. Ezt követően a fő ejtőernyőrendszer kihúzó elemeivel – minden tulajdonságát tekintve – tökéletesen megegyező ejtőernyőkből álló blokk vágódik ki a légáramlatba, amely a fő ejtőernyőrendszertől eltérően –, a kisebb magasság és a viszonylag kisebb zuhanási sebesség miatt –, közvetlenül a tartalék ejtőernyőrendszer 574 m^2-es felületű főejtőernyőjének kupoláját[31] húzza ki a saját konténeréből [54]. Bár a tanulmányozott szakirodalmak nem írnak belsőzsák alkalmazásáról a tartalék ejtőernyőrendszer ugyancsak „zsinórzat először” elven működésbe lépő fő ejtőernyő-kupolájával kapcsolatosan[32], az bizonyos, hogy azt – a fő ejtőernyőrendszer 1000 m^2-es felületű kupolájához hasonlóan – ugyancsak reefelik, amely ebben az esetben a működést követő 4. s-ban lesz egészen feloldva. A teljesen feltöltődött kupolájú tartalék főejtőernyő megközelítőleg 9 m/s-os nagyságú süllyedési sebességet biztosít a leszállóegység és a benne ülő kozmonauták számára (18. ábra)[33].

[31] Érdemes megfigyelni, hogy ez a kupolaméret pontosan megegyezik a Vosztok űrhajó leszállóegységét – a kozmonauta katapultálása után – a Földre visszajuttató ejtőernyő méretével. (szerző megjegyzése).

[32] A Szojuz-1 katasztrófája után készült helyszíni felvétel (lásd: 21. ábra!) sem támasztja alá belső zsák alkalmazását a tartalék ejtőernyőrendszer fő ejtőernyőkupolájánál. (szerző megjegyzése).

[33] Fontos tény az is, hogy a fenti összefoglalás a fő- és tartalék ejtőernyőrendszerrel kapcsolatosan csak annak „rendeltetésszerű”, vagyis a Föld körüli keringési pályáról történő visszatérési folyamatára igaz. Amennyiben az indítóasztalon vagy a startot követően, még az orbitális pályára állás ún. alacsony repülési pályán válik szükségessé a küldetés megszakítása, az adott pillanatnyi körülmények alapján már a vészhelyzeti mentőrendszer dönt a tartalék-, vagy a fő ejtőernyőrendszer működtetéséről. (szerző megjegyzése).



18. ábra A Szojuz leszállóegység tartalék ejtőernyőrendszerének működési folyamata [55]

A fentieken túl, mind a fő-, mind a tartalék ejtőernyőrendszer több olyan szerkezeti elemmel rendelkezett, – mint pl. az ejtőernyőrendszer szimmetrikus felfüggesztésre történő átállását biztosító TM-24B típusú pirotechnikai mechanizmus, a puha leszállást biztosító hajtóművek egysége, a kozmonauta ülésamortizátora, valamint ülésbetétje, – amelyek kiemelt fontosságú a leszállóegységben ülő űrhajós biztonságos földet érésének biztosításában, de e tanulmány témájához ez nem kapcsolódik szorosan, így részletes ismertetésükre most nem kerül sor.

Az ejtőernyőrendszer kipróbálásának folyamata

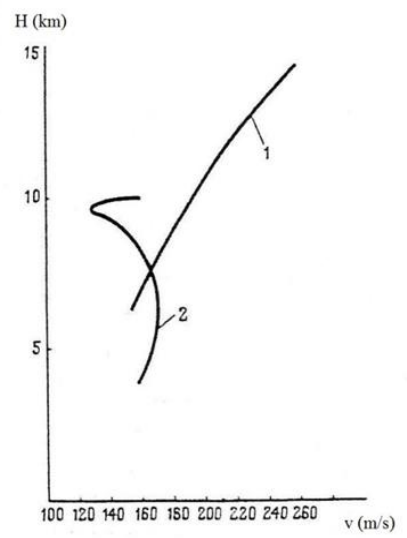
Egy ejtőernyőrendszert nem elég megtervezni, hanem azt valósághű, illetve azt jelentősen megközelítő körülmények között ki is kell próbálni: csak így bizonyítható annak működőképessége, illetve az eredeti mérnöki számításoktól, elképzelésektől történő esetleges eltérés szükségessége objektív okainak feltárása[34]. Noha a Szojuz leszállóegység ejtőernyőrendszere – természetesen nem elfelejtkezve a vészhelyzeti mentési funkcióról sem(!), – alapvetően az űrrepülési feladat végső fázisát jelentő ejtőernyős leszállás biztosítására került megtervezésre, így azt nem volt elég csak a troposzféra viszonyai között kipróbálni, még akkor sem, ha maga az ejtőernyő kupolája csak a Föld felszíne felett, 10 km-es magasság alatti működésre van tervezve.

Troposzféra kísérletek

Mind a fő- mind a tartalék ejtőernyőrendszer gyakorlati tesztelésének magasság és sebességparamétereit (19. ábra) a konstruktőrök megpróbálták úgy előírni, hogy azok a lehető legjobban megközelítsék a leszállító- illetve a vészmentő rendszer komplex alkalmazási körülményeit, illetve környezetét[35].

[34] A kísérleti példány csak abban az esetben teljesítheti pontosan az alkalmazni kívánt konstrukció feladatait, ha ugyanolyan körülmények között tesztelik, mint a kialakítandó légi szerkezetet. Mivel a leszállórendszer elemeinek széles magasságtartományban és eltérő körülmények között kell működniük, nagyon fontos volt a gyakorlati tesztelések, kísérletek lelkiismeretes végrehajtása. (szerző megjegyzése).

[35] Az ún. kissebességű és kismagasságú próbák végrehajtási körülményei hasonlóak voltak ahhoz, amelyek közvetlenül a startot követően a hordozórakéta üzemzavara esetén jelentkezhetnek, így ezekhez helikoptereket, míg – a több tucat (!) [57] – egyéb ledobási teszthez repülőgépeket alkalmaztak. (szerző megjegyzése).



19. ábra A tervezett Szojuz leszállóegység (1), illetve méret- és tömeghelyes makettjeinek (2) sebességértékei a földfelszíntől mért magasság függvényében [56]

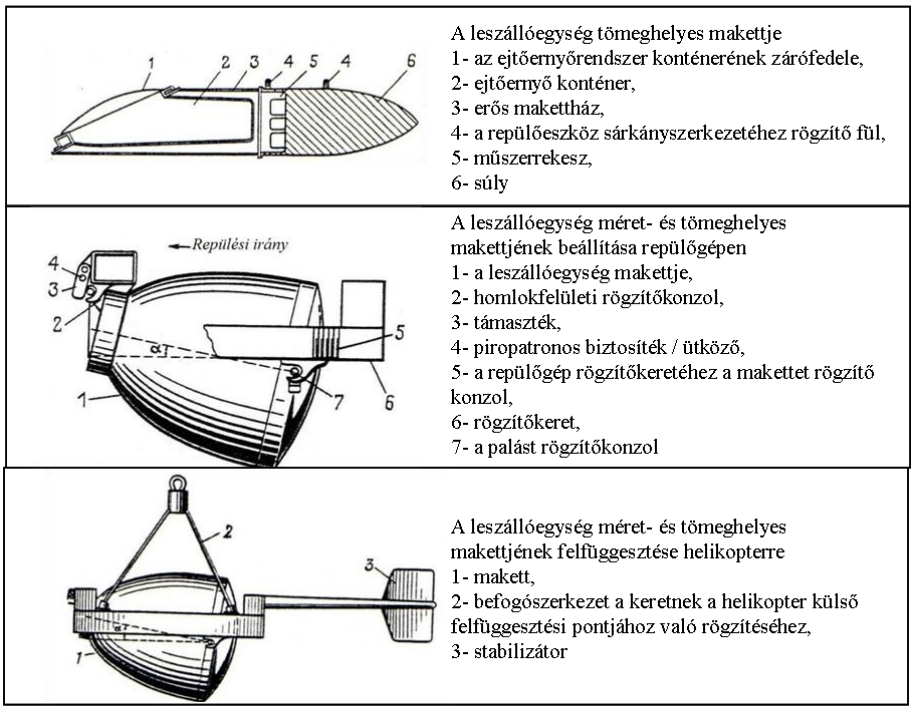
Az ejtőernyőrendszereknek a ténylegesen alkalmazni kívánt leszállóegység prototípusával végrehajtott ledobási tesztjeit megelőzték azok tömeg, illetve méret- és tömeghelyes makettjeivel (20. ábra) végzett kísérletek.

E próbák során az ejtőernyős dobás végrehajtó repülőeszköz fedélzetén, valamint a ledobási zónában felállított kamerákkal készített mozgókép felvételek nagy segítséget nyújtottak a mérnököknek a leszállóegység sűrűbb légrétegben történő mozgási (zuhanási) jellemzőinek (a leszállóegység tengelyei menti elfordulás stb.) megállapításában, az ún. „stabil zuhanási testhelyzet" vizsgálatára[36] céljából.

A ledobási próbák során több érdekes dologra derült fény, ezek közé tartozik az ún. „ejtőernyőanyag összeférhetetlenség"-jelensége[37] is, amely jól szemléltette a kifejezetten kozmikus feladatokra szánt ejtőernyőrendszerek tervezésének bonyolultságát.

[36] Ezt vizuálisan úgy segítették, hogy a leszállóegységet nagyméretű, szabályos fekete-fehér festéssel látták el, amely több felvételen is megfigyelhető. (szerző megjegyzése).

[37] A tartalék ejtőernyőrendszer egyik gyakorlati próbája során, 1966. november 3-án Fedoszijában, a Szovjet Légierő kísérleti lőterén a Szojuz leszállóegységet repülőgépről dobták le, 10 500 m-es magasságból. A kihúzó és a fékező ejtőernyő ugyanúgy, mint a fő ejtőernyő, rendben működött, majd ez utóbbi is levált, szimulálva egy fő ejtőernyőrendszer meghibásodást. A várakozásnak megfelelően a tartalék ejtőernyőrendszer működésbe lépett, azonban ereszkedés közben, annak mind a kihúzó ejtőernyőinél, mind a főejtőernyőjénél megfigyelhető volt a kupolák pulzálása, amely a leszállóegység súlyponton átmenő x tengely (lásd: 8. ábra) körüli – kb. 1 ford./s-os értékkel bekövetkező – forgómozgásához vezetett. Ez végül a főejtőernyő-zsinórzatának kb. 1500 m-es magasságban bekövetkező összecsavarodását eredményezte, amely a leszállóegység földön történő összetörését okozta. A meghibásodás visszavezethető volt a leszállóegység ejtőernyős ereszkedése során a stabilizáló hajtóműegységek maradék hidrogén-peroxid hajtóanyagának kieresztésére (alaphelyzetben úgy lehet számolni, hogy a légkörbe történt belépést követően a 70 kg hajtóanyagból 30 kg megmarad [59]), a tervezett leszállás előtti eljárássorozatnak megfelelően. És amikor ez végbement, a hajtóanyag megégette az ejtőernyő zsinórzatát, amely azok súlyos károsodását okozta. Minden zsinór terhelhetősége 450 kp (= 4414,5 N) volt, de a peroxiddal történő összeégése következtében, kézi erővel(!) el lehetett őket szaggatni [60]. (szerző megjegyzése).



20. ábra A Szojuz leszállóegység tömeghelyes-, valamint a méret- és tömeghelyes makettjeinek felfüggesztési lehetőségei kis- és nagysebességű ledobási próbákhoz [58]

Kozmikus tesztek

Az ejtőernyőrendszer sikeres ledobási próbáit a tényleges kozmikus kísérletek követték. Mivel a Szojuz- és a Zond[38]-program is Szergej Koroljov vezetése alatt haladt kitűzött célja felé, logikus megoldás volt a hasonló felépítésű, de nem ember vezette űreszközök leszállóegységeit is ugyanezzel az ejtőernyőrendszerrel ellátni, és így végrehajtani azok tesztelését. Erre – a költséghatékonyság okán, úgy ahogy az, az 1960-as évek elején a Vosztok és a Voszhod űrhajók egyes rendszereinek tesztelésénél is megvalósult, – „természetesen" a Kozmosz-sorozat egyes tagjait is felhasználták, meglehetősen balszerencsés módon[39].

Alekszej Leonov űrhajós úgy nyilatkozott, hogy *„az ejtőernyő kipróbálása során hét kísérletből csak kettő(!) végződött sikerrel[40]"* [62], de ennek Koroljov már nem lehetett tanúja[41]. Mi-

[38] Műhold, szonda (or. „Зонд") (szerző megjegyzése).

[39] Az *első* Szojuz űrhajót 1966. november 28-án bocsátották fel Kozmosz-133 jelzéssel, de stabilizációs rendszerének hibája miatt a repülési programot módosították, majd a földi repülésirányítók kiadták a visszatérési parancsot. Az űrhajó sorsa bizonytalan, az észlelt műszaki hiba miatt túlságosan lapos röppályán hatolt be a Föld légkörébe, amely a hővédő réteg sérülése mellett nagy valószínűség szerint kínai területen való leszállást eredményezett, ezért távirányítással felrobbantották. A *második* Szojuz űrhajó startjára 1967. február 7-én került sor Kozmosz-140 jelzéssel. Maga a repülés a program szerint zajlott, de leszállás közben a hőmérsékletet ellenőrző rendszer hibája miatt a hővédő pajzs kísérleti tömítése átégett, így az Aral-tó vizére ejtőernyőn sikeresen leereszkedő leszállóegység elsüllyedt. A *harmadik* Zond űrhajó sikeres indítására 1967. április 8-án került sor Kozmosz-154 jelzéssel. A 11 napos repülés után az űrhajó a visszatérés során megsemmisült, feltehetően a hőmérsékletet vagy a magasságot ellenőrző rendszer hibája [61] miatt. (szerző megjegyzése).

[40] Vélelmezhető, hogy Leonov ez alatt „csak" az ejtőernyőrendszer kozmikus próbáinak „nem túl meggyőző" eredményeire utalt. (szerző megjegyzése).

[41] „A Főkonstuktőr" 1966. január 14-én meghalt egy moszkvai kórházban, operációja közben. Utóda Vaszilij P. Misin lett, aki egyrészt még nem volt képes megfelelni a „koroljovi munkatempó"-nak [63] és nem rendelkezett azzal a befolyással sem, mint elődje. Így a politikai akarattal szemben nem tudott ragaszkodni ahhoz – a gyakorlati tapasztalatokon alapuló, jól bevált „koroljovi eljárásrend"-hez –, hogy minden emberes űrrepülés előtt két személyzet nélküli, automatikusan működő űrhajót kell indítani annak megállapítására, hogy a teljes rendszer a

vel e meghibásodások nem az ejtőernyőrendszer hibás működéséből következtek be, az illetékesek nem látták indokoltnak elhalasztani – az Állami Bizottság által már jó előre kitűzött dátumnak megfelelően – az első emberes Szojuz űrhajó startját[42].

Az űrrepülési feladat technikai kiszolgálásának kérdése – Az ejtőernyőrendszer működésre történő előkészítése

Az ejtőernyőrendszer tervezett alkalmazási körülmények között történő biztonságos működése annak előírásszerű előkészítésén is alapul. Ez magába kell, hogy foglalja:

1. a teljes rendszer elemeinek előállítását, valamint meghatározott körülmények közötti raktári tárolását és karbantartását;
2. a teljes rendszer elemeinek előírásszerű hajtogatását és konténerbe helyezését.

Az előkészítési munka olyan kiképzett szakszemélyzet alkalmazását követelte meg, amely a vonatkozó, többszörösen ellenőrzött és jóváhagyott technológiai utasítások alapján hajtotta végre tevékenységét, az ejtőernyő előírásszerű működésének elősegítése érdekében.

Az űrrepülési feladat végrehajtásának kérdése – Az ejtőernyőrendszer működtetése

Az ejtőernyőrendszer tervezési kritériumai között kiemelt helyet foglalt el a teljesen automatikus működés megvalósítására való törekvés. Ennek megfelelően – ahogy már említésre került, – a leszállóegységben helyet foglaló kozmonauta manuális beavatkozási lehetőségét egyedül a fő ejtőernyőrendszer 1000 m^2–es kupolájú fő ejtőernyőjének leoldása jelentette a földetérést követően, amennyiben azt a kozmonauta szükségesnek találja.

A KATASZTRÓFA VIZSGÁLATÁNAK EREDMÉNYEI



21. ábra A Szojuz-1 leszállóegység még füstölgő alsó része, mellette
a becsapódás erejétől levált hővédő pajzs **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**

A lángba borult[43] roncsok (21. ábra) nem igazán segítették a kivizsgáló bizottság munkáját, viszont a nem előírásszerűen működő fő- és a tartalék ejtőernyőrendszer – elsősorban az adott konténerekből részben kihúzódott – elemei, alapvetően „épségben maradtak”.

tervezett előírásoknak megfelelően működik-e. Így csak az új generációs űrhajó egyes rendszereit próbál(hat)ták ki kozmikus körülmények között, de a teljes rendszert már nem. (szerző megjegyzése).

[42] Ennek megfelelően alig négy nappal(!) a Kozmosz-154 sikertelen visszatérése után, a Szojuz-1 űrhajó elindult végzetes útjára. (szerző megjegyzése).

A katasztrófát közvetlenül kiváltó okok

A leszállóegység ejtőernyőjét vizsgáló szakértői csoport a katasztrófa helyszínén a következőket állapította meg:

1. A fő ejtőernyőrendszer konténerfedele ledobódott a konténerről, vagyis megindult a leszállórendszer ejtőernyőjének automatikus működése.



22. ábra A Szojuz-1 belobbanni képtelen tartalék ejtőernyőrendszerének fő ejtőernyőkupolája, rácsavarodva a fő ejtőernyőrendszer kihúzó ejtőernyő-blokkjának maradványára a helyszínen

2. A fő ejtőernyőrendszer kihúzó ejtőernyő-blokkjának nagyobb felületű ejtőernyője hiányzott, azonban a kisebb felületű ejtőernyő a fő ejtőernyőrendszer konténeren kívül, a csatolótagjára rögzítve volt előtalálható, körbetekerve a tartalék ejtőernyőrendszer belobbanásra képtelen („hurkában maradt”) főejtőernyőjének kupolájával (22. ábra).

A fentiek alapján a bizottság a következő kérdésre kereste a választ:

1. Mi okozta a fő ejtőernyőrendszer beszorulását a konténerébe?
2. Miért nem tudott belobbanni a tartalék ejtőernyőrendszer fő ejtőernyője?

A KATASZTRÓFÁT KÖZVETVE KIVÁLTÓ OKOK VIZSGÁLATÁNAK EREDMÉNYEI

A fenti kérdések vizsgálata[44] megdöbbentő válaszokat adva hívta fel a figyelmet az ejtőernyő biztonságos működését lehetővé tevő három fő alapfeltétel hiányosságaira, azon belül pedig az emberi tényezőben rejlő potenciális veszélyforrás megdöbbentő jelentőségére. Azaz, az előzőekben részletesen bemutatta a „gép” (a fő- és a tartalék ejtőernyőrendszer) földi légkörben tervezett, előírásszerű működését, amelynek az első fázisban a leszállóegység – formai kialakításából adódó – irányított zuhanása kellett jelentse. A Szojuz-1 esetében azonban a

[43] Ennek magyarázata a következő: miután az előírások szerint működő főejtőernyő egyenletes sebességgel süllyed a földfelszín irányába, a szimmetrikus felfüggesztésre történő átállást megelőzően a hővédő pajzs ledobódik és az orientációs hajtóművek megmaradt tüzelőanyag-mennyisége is kijut a légkörbe. Mivel a Szojuz-1 esetében erre már nem kerülhetett sor, így ez, valamint a puha leszállást biztosító hajtóműegységek szilárd tüzelőanyag-mennyiség a földfelszínbe csapódott leszállóegység roncsainak lángba borulását okozta. (szerző megjegyzése).

[44] Ez a vizsgálat klasszikus „ember-gép-környezet” rendszer alapján is végrehajtható lett volna. Mivel a „környezet” által nyújtott feltételeken –, amelyben az „ember” végre kell, hajtsa betervezett feladatát, – lehetetlen változtatni, így a „gép”-et kell olyan módon megtervezni és az adott feladat végrehajtására előkészíteni, hogy az igazodjon a „környezet” valamennyi körülményéhez, valamint a leszállóegységben ülő „ember” adottságaihoz (vagyis a légkör hőmérsékletéhez, sűrűségéhez, illetve a túlterhelési többes értékéhez). (szerző megjegyzése).

Föld légkörébe történő visszatérés körülményei messze voltak az ideálistól, így az előírásostól eltérően működő ejtőernyőrendszerrel kapcsolatosan a következő tényeket állapították meg:

1. Röviddel a Föld légkörébe történő belépés előtt – alapvetően a még komplex űrhajó ki nem nyílt bal oldali napelem-szárnyából adódó aszimmetria miatt, – a leszállóegység néhány fokkal eltért a tervezett leszállási irányszögtől. Ennek következményeként az automata leszállórendszer kiadta az ún. „Vészhelyzet-2" parancsot, amelynek hatására a leszállóegység olyan pályán lépett be a Föld légkörébe, amely átmenetet jelentett az irányított és a ballisztikus zuhanás között [66], jelentős sebességnövekedést, valamint túlterhelési többes értéket okozva.
2. A fő ejtőernyőrendszer konténerfedelét az automata rendszer az előírt magasságon ledobta, azonban – „köszönhetően" a földi légkörbe történő nagyobb belépési sebesség miatti nagyobb nyomáskülönbségnek, – az ejtőernyő-konténer oldalfala a tervezettnél nagyobb mértékben deformálódott. Ez volt a közvetlen oka annak, amely megakadályozta, hogy a kihúzó ejtőernyők blokkja a fő ejtőernyőrendszer elemeit a légáramlatba kijuttassa. Ebből adódóan a fő ejtőernyőrendszer kihúzódási folyamatának megállításában szerepet játszhatott az ejtőernyő-konténer tervezési hibája (hengeres alak, illetve a nem kielégítő falvastagság), továbbá felmerült a komplex leszállóegység elkészítésekor elkövetett technológia előírástól történő eltérés vétsége(!) is, amely az ejtőernyő-anyag és a konténer belső oldalfala közötti tapadási súrlódási együttható jelentős növekedését okozta[45]! Ezt később a konténer belső felületének polírozásával sikerült orvosolni.
3. A kihúzó ejtőernyő-blokkjának nagyobb, 9,7 m^2-es felületű ejtőernyője az erős légáramlat hatására –, a hitelesített szakítószilárdságú csatolótagja segítségével – leszakadt ugyan a rendszerről, a kisebb, 1,5 m^2-es felületű ejtőernyő azonban nem, így az tovább vonszolódott a leszállóegység mögötti turbulens zónában.
4. A sebességérzékelők jelezték az automatikus földetérés vezérlőegységnek, hogy a leszállóegység zuhanási sebessége nem csökkent le, így az automatikusan beindította a tartalék ejtőernyőrendszer működtetésének folyamatát.
5. A tartalék rendszer kihúzó ejtőernyő-blokkja a tartalék ejtőernyőrendszer fő ejtőernyőjét sikeresen kihúzták a konténerből, azonban annak kupolája –, rátekeredve a fő ejtőernyőrendszer kihúzó ejtőernyő-blokk csatolótagjára, valamint az arról le nem szakadt 1.5 m^2-es felületű kis kihúzó ernyőre, – képtelen volt belobbanni, ezért az sem csökkenthette le a leszállóegység zuhanási sebességét. Így a kabin földfelszínbe csapódásakor fellépő hirtelen lefékeződésből, mint negatív gyorsulásból adódó jelentős nagyságú túlterhelési többes értéke vezetett a kozmonauta halálához.

A fentieket a következőképpen foglalja össze a tanulmányom: a Szojuz-1 leszállóegységének ideális feltételekre tervezett, és azok megléte esetén „egyébként" előírásszerűen működő ejtőernyőrendszerét a ténylegesen meglévő alkalmazási körülményektől való jelentős eltérések tették alkalmatlanná a küldetése ellátására.

[45] A jóváhagyott technológia előírta a leszállóegység hővédő réteggel történő ellátásának folyamatát: a leszállóegység felületét be kellett kenni hővédő borítóanyaggal, majd a teljes szerkezetet ún. autoklávba, vagyis légmentesen lezárt térbe helyezték, ahol nagy nyomással elérhetővé vált a leszállóegység külső szerkezetének és a hővédő borítóanyagnak az egyesítése. Mivel az ejtőernyő-konténereket a leszállóegységtől külön gyártották, és külön is tárolták, erre különösebben senki sem fordított figyelmet, vagyis ezt a technológiai előírástól való „ártalmatlan eltérés"-ként kezelték: és egészen a 4. és az 5. leszállóegységig az autokláv-eljárást ejtőernyő-konténer nélküli leszállóegységen hajtották végre. Ezeknél már egybe volt építve a leszállóegység az ejtőernyő-konténerekkel, amikor az autokláv-eljárást végrehajtották [67], ekkor viszont a konténerfedelekről feledkeztek meg. (szerző megjegyzése).

A katasztrófát kiváltó okok sorában az emberi tényező tökéletlensége komoly szerepet kapott, ez megmutatkozott már az ejtőernyőrendszer tervezésében is(!),– vagyis abban, hogy nem feltételezték az adott elemek gyártásában megmutatkozó „előírt technológiától való eltérés"-t, amely aztán a fő ejtőernyőrendszer konténerbe történő beleszorulásában[46] realizálódott. Továbbá, hogy a teljes rendszer nem minden „kritikus" elemét látták el leoldási lehetőséggel …

Ezen kívül megmutatkozott a „koroljovi gyakorlat"-tól történő eltérésben rejlő kockázat lehetősége is: bizonyos ejtőernyő-nyílási rendellenességek bekövetkezése csak a kozmoszból történő visszatérés során következhetett be! Ugyanis a tanulmány által röviden bemutatott troposzféra kísérletek során a repülőgépről ledobott leszállóegység –, mivel a vizsgálati körülmények között nem is volt rá szükség(!) – nem kapott (!) hővédő borítást, így nem mutatkozhatott meg az ejtőernyőanyag és a konténer belső felülete között kialakult tapadás jelensége sem.

BEFEJEZÉS

A pontosan beazonosított problémák felismerése szükségessé tette a fő ejtőernyőrendszer adott elemeinek (elsősorban az ejtőernyő-konténerek) áttervezését, formai kialakításának módosítását, illetve további elemek (elsősorban a leoldózárak) rendszerbe történő olyan beillesztését, amelyek minden ejtőernyőnyílás során bekövetkező vészhelyzetre jó megoldást kínálnak.

Ahhoz, hogy az ejtőernyőrendszer főkonstruktőre által eredetileg megígért 99,9%-os biztonsági mutatóval rendelkező alkalmazhatósági szint [70] ténylegesen is elérhetővé váljon, egy népszerű űrhajós halála kellett és még további másfél év fejlesztői munkájára volt szükség, amely a szovjet emberes űrprogramot is megtorpanásra kényszerítette.

Az elvesztegetett idő mellett a fizetett ár nagyon drága volt, de lehetett volna még drágább is: ha a Szojuz-1 napelemtáblája kinyílik és az űrrepülést az előírtak szerint hajtották volna végre. Ekkor a leszállóegység a Komarov-Hrunov-Jeliszejev személyzettel csapódott volna a földfelszínhez, de minden bizonnyal életét vesztette volna az egyedül visszatérő Bikovszkij is. Hogy ez nem így történt, az Msztyiszláv Keldis akadémikus döntésének köszönhető, aki kategórikusan megtiltotta a Szojuz-2 startját.

A szovjet emberes űrprogram későbbi sikereit biztosító új űrhajóhoz viszont igenis szükség volt egy másik, bármilyen alkalmazási körülmények között biztonságos működő ejtőernyőrendszerre, amelynek további modifikálását a Szojuz-1 katasztrófájának tanulságai jelentősen befolyásolták. Ennek bemutatása azonban már egy másik tanulmány témája lehet.

[46] A későbbiekben ezt a helyzetet szélcsatorna-kísérletekkel, valamint ledobási próbákkal is igazolták. A tartalék ejtőernyőrendszer képtelen volt belobbanni a fő ejtőernyőrendszer konténerbe történő beszorulása után, a kihúzó ejtőernyők blokkjára, vagy a fékező ejtőernyőre történő rácsavarodásának következményeként [68]. Érdekességképpen meg kell említeni, hogy a konténer esetleges deformációjára is előzetesen számítva, a konstruktőrök 1500 kp (= 14 715 N) nagyságú húzóerő biztosítását írták elő a fékező ejtőernyőnek. Az utólagos elemzések megmutatták, hogy ez a húzóerő-szükséglet a Szojuz-1 esetében – elsősorban a nem előírt visszatérési görbének „köszönhetően" – a 2800 kp (= 27 468 N) nagyságot is elérte, a fékező ejtőernyő mégsem volt képes kihúzni a konténerből a fő ejtőernyőt. A tartalék ejtőernyőrendszer fő kupolájának kihúzásához elméletileg 1800 kp (= 17 658 N) nagyságú húzóerőre lett volna szükség, de gyakorlati ledobási próbák bebizonyították, hogy néha még a 3000–4000 kp (= 29 430–39 240 N) nagyságú húzóerő sem elég nagy [69]. A húzóerő utóbbi szükséges értéke nyilvánvalóan még a hengeres kialakítású konténerek esetére volt igaz, amennyiben azok „tervezett", jelentős deformációja bekövetkezett. (szerző megjegyzése).

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Лазарев В. Г., Ребров М. Ф.: Испытатель космических кораблей. Издательство Машиностроение, Москва, 1976. Т-16452, pp. 94-101.
[2] a Szerző saját fényképgyűjteményéből.
[3] Szerzői kollektíva: Űrhajózási lexikon. Budapest, Akadémiai Kiadó, Zrínyi Katonai Kiadó, 1984. ISBN 963 05 3628 5. p. 196.
[4] a Szerző saját fényképgyűjteményéből.
[5] Погибшие космонавты, (online), url:
[6] http://ikfia.ysn.ru/ru/9-uncategorised/738-kosmos.html (2017.02.17.)
[7] Schuminszky Nándor: Szovjet Zond szondák a Hold körül., Haditechnika, No. 1, (1998), p. 38.
[8] Авторский коллектив: Инженерный справочник по космической технике. Москва, Ордена Трудово Красного Знамени Военное Издательство Министерства Обороны СССР, 1977. p. 138.
[9] De Leon Pablo, Williamson Mark R.: A full-pressure space suit with bailout capabilities for experimental suborbital vehicles., Acta Astronautica, Journal of the International Academy of Astronautics, Vol. 60, Nu. 4-7, February-April 2007. p. 498.
[10] Chertok Boris: Rockets and People. Hot Days of the Cold War. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC., May 2009., NASA SP-2009-4110. p. 594.
[11] Schuminszky Nándor: Szovjet Zond szondák a Hold körül., Haditechnika, No. 1, (1998), p. 38.
[12] Комаров заменил Гагарина в кресле разбившегося «Союза-1»? (online), url:
[13] http://www.kp.ru/daily/25661.3/822807/
[14] Schuminszky Nándor: Szovjet Zond szondák a Hold körül., Haditechnika, No. 1, (1998), p. 38.
[15] De Leon Pablo, Williamson Mark R.: A full-pressure space suit with bailout capabilities for experimental suborbital vehicles., Acta Astronautica, Journal of the International Academy of Astronautics, Vol. 60, Nu. 4-7, February-April 2007. p. 498.
[16] Grahn Sven: An analysis of the Soyuz-1 flight. (online), url: http://www.svengrahn.pp.se/histind/Soyuz1Land/Soyanaly.htm
[17] Grahn Sven: An analysis of the Soyuz-1 flight. (online), url: http://www.svengrahn.pp.se/histind/Soyuz1Land/Soyanaly.htm
[18] Chertok Boris: Rockets and People. Hot Days of the Cold War. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC., May 2009., NASA SP-2009-4110. pp. 594-595.
[19] Szaniszló Zsolt: Ejtőernyőrendszerek alkalmazási lehetőségei és tervezésének lépései ember vezette űrjárművek Földre történő visszatérési folyamatának ejtőernyős fázisa biztosítására. Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2011. p. 123.
[20] Szaniszló Zsolt: Ejtőernyőrendszerek alkalmazási lehetőségei és tervezésének lépései ember vezette űrjárművek Földre történő visszatérési folyamatának ejtőernyős fázisa biztosítására. Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2011. p. 21.
[21] Романюк В. Г.: Заметки парашютиста-испытатетеля. Ордена Трудового Красного Знамени Военное Издательство Министерства Обороны СССР, Москва, 1973. Г-34 388, p. 29.
[22] Chertok Boris: Rockets and People. Hot Days of the Cold War. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC., May 2009., NASA SP-2009-4110. p. 645.
[23] Dr. Szabó Sándor András orvos alezredes: A katonai repülő-hajózó állomány repülőorvosi minősítése és kiképzése a NATO Standardizációs Egyezmények szellemében különös tekintettel a szív-érrendszeri adaptáció és readaptáció vizsgálatára komplex és szimulált repülési stressz környezetben. PhD értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, 2008. pp. 12-13.
[24] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова К. П.: Космические аппараты. Военное Издательство, Москва, 1983. Г-62643, p. 119.
[25] Бобков В. Н., Сыромятников В. С.: Космические корабли. Москва, Издательство «Знание», 1984. ББК 39.62 p. 22.
[26] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова, К. П.: Космические аппараты. Москва, Военное Издательство, 1983. Г-62643. p. 118.
[27] Елисеев А. С.: Техника космических полетов. Москва, Издательство Машиностроение, 1983. p. 119.
[28] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова, К. П.: Космические аппараты. Москва, Военное Издательство, 1983. Г-62643. p. 109.

[29] Liszun M.: Ejtőernyők a planéta alatt. Ejtőernyős tájékoztató 1983/5. LRI Repüléstudományi és Tájékoztatási Központ, Budapest-Ferihegy, LRI, 1983. pp. 24-27.
[30] A repülőorvostan elmélete és gyakorlata. Ejtőernyős tájékoztató 1982/5. LRI Repüléstudományi és Tájékoztatási Központ, Budapest-Ferihegy, LRI, 1982. pp. 1-10.
[31] Liszun M.: Ejtőernyők a planéta alatt. Ejtőernyős tájékoztató 1983/5. LRI Repüléstudományi és Tájékoztatási Központ, Budapest-Ferihegy, LRI, 1983. pp. 24-27.
[32] Ravnitzky M. J., Patel S. N., Lawrence R. A.: Zuhanás az űrből: Ejtőernyők és az űrprogram. Ejtőernyős tájékoztató 1997/3. LRI Repüléstudományi és Tájékoztatási Központ, Budapest-Ferihegy, LRI, 1997. p. 36.
[33] Елисеев А. С.: Техника космических полетов. Москва, Издательство Машиностроение, 1983. p. 221.
[34] a Szerző saját fényképgyűjteményéből.
[35] Le panneau central. online), url: http://spacerockethistory.com/wp-content/uploads/2015/01/soyouz2520interieur2520051.jpg
[36] Елисеев А. С.: Техника космических полетов. Москва, Издательство Машиностроение, 1983. p. 221.
[37] Magyari Béla, Schuminszky Nándor: Az első szovjet-magyar közös űrrepülés 10. évfordulója., Haditechnika, No. 2, (1990), pp. 36–38.
[38] Liszun M.: Ejtőernyők a planéta alatt. EJTŐERNYŐS TÁJÉKOZTATÓ 1983/5. LRI Repüléstudományi és Tájékoztatási Központ, Budapest-Ferihegy, LRI, 1983. pp. 24-27.
[39] Рысев О. В., Пономарев А. Т., Васильев М. И., Вишняк А. А., Днепров И. В., Моссев Ю. В.: Парашютные системы. Москва, Наука, Физматлит, 1996. ISBN 5-02-015160-2. p. 32.
[40] Visszatérési manőver. (az Авиация и Космонавтика folyóirat 1978-1979. évi számaiban megjelent cikkek alapján), Haditechnika, No. 3, (1979), pp. 114–117.
[41] Авторский коллектив: Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов. Москва, Издательство Машиностроение, 1986. p. 279.
[42] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова, К. П.: Космические аппараты. Москва, Военное Издательство, 1983. Г-62643. p. 122.
[43] Лобанов Н. А.: Из космоса на парашюте., Авиация и Космонавтика, Vol. 1978 No. 9. pp. 34-35.
[44] Лобанов Н. А.: Основы расчёта и конструктирования парашютов. Москва, Издательство Машиностроение, 1965. Г-27188. p. 360.
[45] a Szerző saját fényképgyűjteményéből.
[46] Лобанов Н. А.: Основы расчёта и конструктирования парашютов. Москва, Издательство Машиностроение, 1965. Г-27188. p. 358.
[47] Beregovoj G .T.: Egy űrhajós feljegyzései. Budapest, Kozmosz Könyvek, 1973. 72.0874/1-3351. pp. 163-164.
[48] Liszun M.: Ejtőernyők a planéta alatt. Ejtőernyős tájékoztató 1983/5. LRI Repüléstudományi és Tájékoztatási Központ, Budapest-Ferihegy, LRI, 1983. pp. 24-27.
[49] Лобанов Н. А.: Из космоса на парашюте. Авиация и Космонавтика, Vol. 1978 No. 9. pp. 34-35.
[50] Interkosmos znaczy współpraca, 1985.
[51] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова К. П.: Космические аппараты. Москва, Военное Издательство, 1983. Г-62643. p. 273.
[52] Лобанов, Н. А.: Из космоса на парашюте. Авиация и Космонавтика, Vol. 1978 No. 9. pp. 34-35.
[53] Kubaszov V. Ny.: A kozmosz érintése. Budapest, Kossuth Könyvkiadó, Ifjúsági Lap- és Könyvkiadó, 1986. ISBN. 963 09 2756 X, ISBN 963 422 458 X. pp. 126-130.
[54] Ракетно-космическая корпорация „Энергия" имени С. П. Королёва. Россия, РКК Энергия, 1994. p. 92.
[55] Авторский коллектив под общ. Ред. Феоктистова, К. П.: Космические аппараты. Москва, Военное Издательство, 1983. Г-62643. p. 273.
[56] Лобанов, Н. А.: Из космоса на парашюте. Авиация и Космонавтика, Vol. 1978 No. 9. pp. 34-35.
[57] Ракетно-космическая корпорация „Энергия" имени С. П. Королёва. Россия, РКК Энергия, 1994. p. 92.
[58] Chertok Boris: Rockets and People. Hot Days of the Cold War. National Aeronautics and Space Administration, Washington DC., May 2009., NASA SP-2009-4110. p. 625.
[59] Возвращение. Авиация и Космонавтика, No. ?, (?),. p. 32.
[60] Beszйlgetйs Mark Avrutin rendszerelemzx mйrnцkkel йs Leonyid Komisszareno fxkonstruktxrrel a Szojuz-1 katasztryfхjбt okozy problйmбkryl. p.2. (Kйziratban, megkapva: 2016.11.23-бn)
[61] Szaniszló Zsolt: Ejtőernyőrendszerek alkalmazási lehetőségei és tervezésének lépései ember vezette űrjárművek Földre történő visszatérési folyamatának ejtőernyős fázisa biztosítására. Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2011. p. 119.
[62] Schuminszky Nándor: Szovjet Zond szondák a Hold körül., Haditechnika, No. 1, (1998), pp. 38–42.

[63] Az űrhajózás úttörői, a szovjetek. Levetítve: BBC Earth
[64] Schuminszky Nándor: Szovjet Zond szondák a Hold körül., Haditechnika, No. 1, (1998), pp. 38–42.
[65] Vladimir Komarov and the Tragic Flight of Soyuz 1., (online), url: http://www.spacesafetymagazine.com/space-disasters/soyuz-1/tragic-death-vladimir-komarov/
[66] Sajtos Zoltán. Hősök panteonja. Aeromagazin, Vol. 5. No. 3, (2003), ISSN 1419-4074, pp. 50–53.
[67] Beszélgetés Mark Avrutin rendszerelemző mérnökkel és Leonyid Komisszareno főkonstruktőrrel a Szojuz-1 katasztrófáját okozó problémákról. (Kéziratban, megkapva: 2016.11.23-án) p. 2.
[68] Beszélgetés Mark Avrutin rendszerelemző mérnökkel és Leonyid Komisszareno főkonstruktőrrel a Szojuz-1 katasztrófáját okozó problémákról. (Kéziratban, megkapva: 2016.11.23-án) pp. 3-4.
[69] Hall Rex, Shayler David: Soyuz: a universal spacecraft. url: http://www.bookfayre.cz/books/item/9781852336578.html
[70] Szaniszló Zsolt: Ejtőernyőrendszerek alkalmazási lehetőségei és tervezésének lépései ember vezette űrjárművek Földre történő visszatérési folyamatának ejtőernyős fázisa biztosítására. Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2011. p. 124.
[71] Tkachev. url: http://www.astronautix.com/index.html
[72] Óvári Gyula: A légi járművek gazdaságosságát és manőverező-képességét javító sárkány-szerkezeti megoldások, Speciális légijárművek fejezet KGYRMF 1990, Szolnok, pp. 233-277. (Lényegesen átdolgozott elektronikus változat BME 2016) http://www.vrht.bme.hu/hu/hallgatoinknak/letoltesek.html

THE PARACHUTE FAILED … THE CATASTROPHY OF SOYUZ-1

Fifty years ago the first manned flight of the third generated Soviet personnel spacecraft end in failure. It was ascertained that the death of highly respected cosmonaut was „thanked" for the non-proper invented and prepared parachute system, according to the examination …

Keywords: *spacecraft Soyuz-1, cosmonaut, parachute system, auxiliary parachute, parachute canopy release assembly*

Szaniszló Zsolt okl. mk. őrnagy
repülésfelügyeleti (ejtőernyős) főtiszt
Honvédelmi Minisztérium
Állami Légügyi Főosztály
sunnyboymi24@gmail.com
orcid.org/0000-0003-0646-1505

Eng. Maj. Szaniszló Zsolt (MSc)
flight supervisor (parachutist) senior officer
Ministry of Defence
State Aviation Department
sunnyboymi24@gmail.com
orcid.org/0000-0003-0646-1505

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-25-0401_Szaniszlo_Zsolt.pdf

Salavec Péter, Bordás Árpád, Bozóki Zoltán, Joan Cuxart Rodamilans, Istenes Zoltán, Horváth Gyula, Gemma Simó, Nagy Zoltán, Tordai Ágoston Vilmos, Torma Péter, Weidinger Tamás, Burkhard Wrenger

REPÜLÉST VESZÉLYEZTETŐ MIKROSKÁLÁJÚ LÉGKÖRI JELENSÉGEK A 2015-ÖS SZEGEDI PLANETÁRIS HATÁRRÉTEG-MÉRÉSI ADATSOROKBAN

A PABLS-2015 planetáris határréteg mérési expedíció során az alsó 100–200 méteres légréteg profilmérései (kötött ballon, kvadrokopter) és az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Szegedi Magaslégköri Obszervatórium megfigyelései mellett felszíni energiaháztartási mérések is folytak a közeli repülőtéren 2015 nyarán. Két szónikus anemométer került telepítésre 10 Hz-es mérési frekvenciával. A turbulens áramokat a nemzetközi gyakorlatban elterjedten használt TK3 (Bayreuthi Egyetem) és az EddyPro (Li-Cor) szoftverrel számítottuk 5 és 30 perces átlagolási időtartamokkal. Elvégeztük a mérési adatok minőségbiztosítását. Két eset-tanulmányon keresztül mutatjuk be az olyan mikroskálájú jelenségeket (porvihar, zivatar kifutófrontja), amelyek általában nem láthatók a hagyományos repülőtéri meteorológiai észlelésekben, s így váratlan, veszélyhelyzetet teremthetnek. Mindez felhívja a figyelmet a hagyományos mérések és a gyors válaszidejű műszerek együttes alkalmazására, az átlagértékek mellett a szórások és a turbulens áramok meghatározására.

Kulcsszavak: *PABLS-2015 Szeged, mikrometeorológia, repülésbiztonság, turbulencia*

BEVEZETÉS

Az időjárás egyes jelenségei veszélyeztetik a biztonságos légi közlekedést, ezért elengedhetetlen i) a veszélyes időjárási jelenségek minél korábbi felismerése, ii) kialakulási és bekövetkezési valószínűségük előrejelzése és iii) a felhasználók felé történő megbízható és gyors kommunikációja.

A repülőgépes balesetek nem elhanyagolható része még mindig valamilyen időjárási eseményhez, jelenséghez köthető [1][2][3]. Ezek nagy többsége le- vagy felszállás közben történik, amikor a repülőgép a légkör legalsó rétegében, a planetáris határrétegben (PHR) tartózkodik. A planetáris határréteg áramlásainak fő tulajdonsága, hogy ott a Föld felszíne, annak tereptárgyai jelentősen befolyásolhatják az alapáramlást, létrehozva olyan jelenségeket, mint például a belső súrlódás miatt fellépő turbulencia, a felszín nappali inhomogén melegedése miatt létrejövő termikek stb. Ezek a nagyobb veszélyeket rejtő jelenségek – mint egy frontátvonulás, egy-egy zivatar kísérőjelenségei, vagy a köd – mellett szinte bármilyen időjárási alaphelyzetben okozhatnak kellemetlen meglepetéseket a pilóták számára. A PHR szerkezetéről, az ott lejátszódó folyamatokról lásd részletesebben Arya [4], vagy Stull [5] monográfiáját.

A planetáris határrétegben zajló folyamatok jobb megismerésére irányuló mérési kampányok fő célja a határréteget leíró elméletek pontosítása, ellenőrzése, s így a numerikus modellek javítása. Általában nem céljuk kiszolgálni a légi irányítás meteorológiai szolgálatát, ugyanakkor a repülőterek környéke kiválóan alkalmas ilyen mérési kampányok lebonyolítására. Nagy ki-

terjedésű, horizontálisan homogénnek tekinthető területek, mely tulajdonság a legtöbb határréteg-elmélet alapfeltevése. Többek között ezért esett a választásunk a Szegedi repülőtérre (PABLS-2013, PABLS-2015 mérési programok) [6][7][8].

A repülőgépek fel- és leszállásánál kiemelt szerepe van a turbulencia ismeretének. A repülőtéri észlelések során leginkább az átlagos szélviszonyokat és a legerősebb széllökéseket adják meg. A repülőtéri előrejelzésekben, ha szükségesnek ítélik, szerepel a turbulencia megadására is [9][10]. Az időjárás-előrejelző modellek – amelyekből a repülőtéri előrejelzéseket is készítik – meglehetősen korlátozottan, vagy gyakran sehogy sem képesek leírni a repülésre veszélyes turbulenciát (bár parametrizációk léteznek), de annak előrejelzése legtöbbször az előrejelző szolgálatban lévő szak-emberek tapasztalata alapján történik. A repülőtéri észlelők megfigyelései sokszor nem elég részletesek, illetve célirányosak. A turbulencia-előrejelzések ellenőrzése gyakran csak a pilóták észlelései alapján történik.

A repülőtereken végzett mikrometeorológiai mérési programok lehetőséget biztosítanak a felszínközeli turbulencia detektálására, az előrejelzések ellenőrzéséhez. A PABLS-2015 (Pannon Atmospheric Boundary Layer Experiment in Szeged, 2015) mérési kampány során (2015 nyarán) többször előfordult olyan időjárási helyzet (frontátvonulások, zivataros helyzetek), amikor a határrétegben a turbulencia erős térbeli és időbeli változékonyságot mutatott. Ezek nyomaira bukkantunk a nagy frekvenciás szónikus anemométer adatok feldolgozása során.

A PHR tulajdonságainak vizsgálatakor általában a határréteg nappali és éjszakai szerkezetére, az átmeneti időszakok folyamataira (a stabilitás változása napfelkelte után, illetve napnyugta környékén), vagy az energiamérleg lezárhatóságára vagyunk kíváncsiak. Az ezekhez szükséges számítások a Reynolds-átlagolásos módszeren alapulnak. Eszerint egy *f* változó időbeli átlaga $(\overline{f})$, pontosabban várható értéke az

$$\overline{f}(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t)\, dt$$

integrál alapján számolható, ahol t_0 az integrálás kiinduló időpontja, *T*, az átlagolási idő. Az átlagértékek alapján megadhatók a fluktuációk (az átlagtól vett eltérések)

$$f'(t) = \overline{f}(t_0, T) - f(t)$$

majd ezek alapján a turbulens áramok (*F*), vagyis az adott tulajdonság (*f*) és a vertikális sebesség (*w*) fluktuációinak a kovarianciája.

$$F(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f'(t) w'(t)\, dt$$

Megjegyezzük, hogy a vertikális sebesség átlagértékét (első közelítésként) nullának vesszük, továbbá teljesül, hogy az átlagolási periódussal összemérhető, vagy annál kisebb időskálán az átlag (pontosabban a várható érték) időbeli változása elhanyagolható a fluktuációkéhoz képest.

A nem-stacionárius (időben változó várható értékű) folyamatok leírására nem alkalmasak a Reynolds-módszeren alapuló elméletek. Ugyanakkor a mért pillanatnyi értékek és a számolt turbulens

karakterisztikák alapján becslést adhatunk arra, hogy az elmélet mennyire jól alkalmazható, a kapott eredmények mennyire reprezentatívak a légkör valódi állapotára. Ezekre minőségbiztosítási módszerek állnak rendelkezésre, pl. Foken és Wichura (1996) stacionaritási tesztje, Foken et al. (2004) integrál turbulencia karakterisztika tesztje, mely a turbulencia fejlettségét méri (lásd még Foken et al., 2012), vagy a Spoleto-teszt (a CarboEurope-IP 2004-es Spoleto-i konferencián hozott döntésekről[1] lásd Göckede et al. (2004) és Mauder et al. (2013) cikkét is) [11][12][13][14][15]. A stacionaritás sérüléséért felelhetnek műszeres, vagy a mérési körülményekből származó (pl. hulló csapadék, köd stb.) hibás adatok, de előfordulhat, hogy olyan időjárási jelenségek „zavarják" a mérést, amelyek miatt nem tudjuk leírni a turbulencia valódi állapotát a Reynolds-módszert alkalmazó elméletekkel. A „gyors" és „nagy" változások miatt sérül a stacionaritás, vagyis az átlagos időjárás változása összemérhető a fluktuációkkal a *T* átlagolási idő alatt.

A két szónikus anemométer és a direkt árammérésre használt H_2O/CO_2 szenzor jeleit 10 Hz-es frekvenciával (másodpercenként 10-szer), míg a többi meteorológiai műszer méréseit perces átlagolással rögzítettük. A turbulens áramokat a nemzetközi gyakorlatban elterjedten használt TK3 programmal (Bayreuthi Egyetem, [16]), valamint a Li-Cor cég által fejlesztett EddyPro [17][18] programcsomaggal számítottuk ki 5 és 30 perces átlagolási időtartamokkal. Elvégeztük a mérési adatok és a turbulens áramok minőségbiztosítását is[16][19]. Az alkalmazott módszertanról, a számítási eredményekről részletesebben lásd Salavec Péter 2016-ban készült diplomamunkáját[20].

Repülésbiztonsági szempontból a fent említett jelenségek nagy kockázattal rendelkeznek. Nemcsak a jól látható jeleket mutató eseményekről van szó, mint a zivatarok vagy a frontátvonulás kísérőjelenségei, hanem olyan veszélyforrásokkal is számolnunk kell, mint a váratlanul megélénkülő szél, az általa keltett hirtelen megerősödő turbulencia, egy-egy erősebb termik áthaladása a területen, amelyek nem hordoznak vizuális jegyeket. Ezek kis méretük és rövid élettartamuk miatt még a nagyfelbontású regionális időjárás előrejelző modellek számára is előrejelezhetetlenek, de az észlelők elől is könnyen rejtve maradnak. Ugyanakkor a mikrometeorológiai mérések elég pontosak és gyorsak ahhoz, hogy észrevehessük azokat, így rövidítve a reakcióidőt az ilyen helyzetekben bekövetkezhető veszélyhelyzetekre.

A következőkben ismertetjük a PABLS-15 mérési kampány műszerezettségét, majd két esettanulmányon keresztül bemutatjuk a mikrometeorológiai mérések repülésmeteorológiai alkalmazhatóságát. A cikket összefoglalás és részletes irodalomjegyzék zárja.

A MÉRÉSI ELRENDEZÉS

A PABLS-2015 mikrometeorológiai mérési kampány helyszínéül a szegedi repülőtér és az OMSZ közelben lévő Magaslégköri Obszervatóriuma szolgált. A mérési program 2015. június 16. és szeptember 8. között zajlott. Az intenzív mérési periódus (10 nap) július első felében volt. Ekkor került sor a kötött ballonos és a kvadrokopteres mérésekre. A mérésekben részt vevő főbb intézmények, a telepített műszerek, és az általuk szolgáltatott adatok az alábbi listán szerepelnek (ahol az külön nincs jelezve, a mérések a repülőtér délnyugati végében felállított mikrometeorológiai állomáson zajlottak; É. sz. 46°14'23,13", K. h. 20°5'22,72").

[1]http://carboeurope.org/ceip/products/spoleto.htm (2017. 03. 06)



1. ábra Balra a BME-vel közös örvénykovariancia-mérések, a két szinten elhelyezett 2D szónikus anemométer és a Väisälä hőmérséklet-nedvesség szenzorok, jobbra a METEK USA-1 szónikus anemométer a „háromlábon" a PABLS-15 expedíció során

- **Bolyai Tehetséggondozó Gimnázium, Zenta**
  - Kvadrokopteres mérések;
    - Légnyomás, hőmérséklet és nedvesség profilok az alsó 100 m-es rétegben a repülőtér központi területén.
- **BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék**
  - Campbell 2D szónikus anemométer (Campbell WINDSONIC 4-L) (1. ábra);
    - Két darab szenzor, 0,5 és 2 méter magasan, szélsebesség-komponensek (u, v) mérése;
  - Väisälä HMP-45 hőmérséklet és relatív nedvesség szenzorok a 2D szónikus anemométerrel megegyező magasságokban;
  - Örvény-kovarianciamérő állomás (1. ábra);
  - Az alábbi műszerek egy oszlopon, 1,5 méter magasan lettek elhelyezve, és tizedmásodpercenként szolgáltatták az adatokat:
    - Campbell CSAT3 szónikus anemométer;
      - Három szélkomponens és szónikus hőmérséklet;
    - Campbell EC150 gázanalizátor;
      - CO_2- és vízgőz-koncentráció, környezeti („állomásszinti") légnyomás és hőmérséklet;
- **Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék**
  - METEK-PCS.2000-64 Doppler SODAR;
    - Az alsó 300–500 méter szélsebesség és turbulencia intenzitás adatai 2015. július 24-ig. A műszer az OMSZ-állomáson lett felállítva.
- **ELTE, Meteorológiai Tanszék**
  - METEK-USA1 szónikus anemométer (1. ábra);

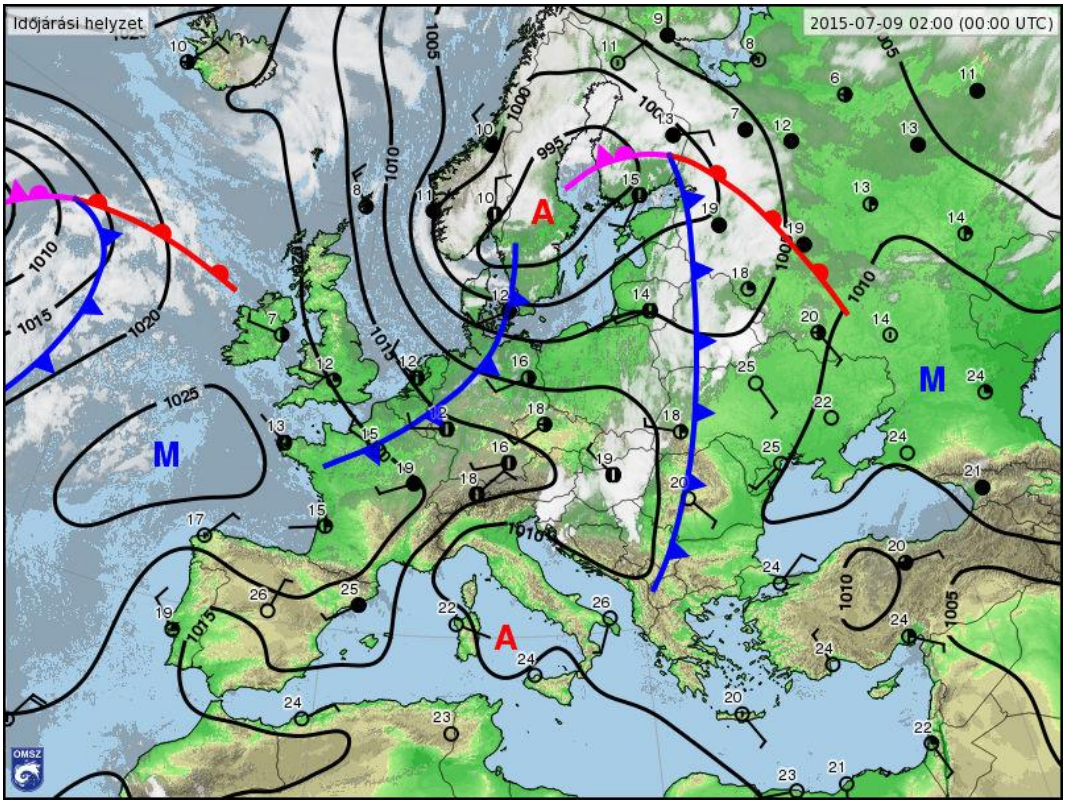
        - Három szélkomponens és szónikus hőmérséklet tizedmásodpercenként, 2,6 m magasan;
    - Sugárzásmérő oszlop;
    - Minden alább felsorolt műszer egy oszlopon, 180 cm magasan volt elhelyezve, és perces átlagolt adatokat szolgáltatott:
        - Kipp & Zonen CNR1 és Campbell-Q7 sugárzásegyenleg mérő;
        - Kipp & Zonen PAR-Lite direkt és visszavert fotoszintetikusan aktív sugárzás;
        - Schenck-1043 piranométer, globálsugárzás;
        - Campbell IRTS-P infravörös hőmérő, felszínhőmérséklet;
    - Talaj-energiaháztartás mérések:
        - Campbell-107 talajhőmérők (2, 5, 10 és 20 cm-es mélységben);
        - Campbell CS616 talajnedvesség mérő szenzorok 5, 10 és 20 cm mélyen;
        - 2 db Campbell HFP01SC önkalibráló hőárammérő 8 cm mélyen;
    - Campbell 237-L levélnedvesség-mérő;
    - Young 52202 billenőkanalas csapadékmérő.

- **Hochschule Ostwestfalen-Lippe**
    - MEMSIC eKo-S2000 teljes mikrometeorológiai mérőállomás: csapadék, hőmérséklet, légnedvesség, légnyomás, sugárzási komponensek perces átlagai;
    - Kvadrokopteres mérések az alsó 200 m-ben: infravörös sugárzás (hőmérséklet, nedvesség) és magasságmérések az intenzív mérési periódusok alatt.
- **Országos Meteorológiai Szolgálat, Szegedi Magaslégköri Obszervatórium**
    - Az állomás (12982) standard meteorológiai mérései;
    - Väisälä és GRAW rádiószondák;
        - Napi két felszállás, 00 és 12 UTC-kor;
    - Radiometrics MP-3000A radiométer;
        - Hőmérséklet és nedvességprofilok tízpercenként;
    - Väisälä LAP-3000 windprofiler és RASS–SODAR;
        - Szél- és virtuális hőmérsékleti profilok, turbulencia intenzitás a mérési kampány második felében;
    - GRAW DFM-09 típusú rádiószonda;
        - Hőmérséklet, relatív nedvesség, légnyomás, geopotenciál, GPS jel alapján számított szélsebesség, szélirány és magasság másodpercenként.
- **Universitat de les Illes Balears, Equip de Turbulencia Atmosférica**
    - Saját tervezésű szonda és kötött ballon;
        - Hőmérséklet, légnedvesség, szélsebesség (hődrótos szenzor) a repülőtér központi részén az IOP-ok (intenzív mérési periódusok) alatt;
    - Campbell 107 talajhőmérők;
        - Talajhőmérséklet csupasz talaj, elszáradt és zöld fű alatt 1cm mélyen, saját árnyékolóval 5 és 10 cm magasan, továbbá az OMSZ-os szellőztetett (aspirációs) árnyékolóival 20, 30, 50 és 100 cm magasan a mikrometeorológiai mérőplatformon a kifutópálya végénél.

A mérőrendszer kialakításáról, az adatfeldolgozás első eredményeiről részletesebb ismertetés található Cuxart et al. (2016) és Tordai (2016) munkájában [8][21]. A következőkben a szónikus anemométeres mérésekre koncentrálunk. Két repülésmeteorológiai szempontból érdekes esetben vizsgáljuk a meteorológiai állapotjelzők és a turbulencia-karakterisztikák viselkedését.

ESETTANULMÁNYOK

Olyan helyzeteket elemeztünk, amikor a hivatalos időjárás előrejelzések alapján várható volt valamilyen gyors lefolyású időjárás változás. Ezekben az esetekben a nagyfrekvenciás adatsorokból számolt turbulens karakterisztikák egy része irreális értékeket vett fel, rossz adatminőségi jelzőkkel. A gyorsan zajló változások miatt sérültek a Reynolds-módszer alkalmazhatóságához szükséges feltételek. Az események lefolyását a hivatalos észlelések és a nagyfrekvenciás mérési adatok elemzésével rekonstruáljuk. Megkíséreljük feltárni az irreális értékek keletkezésének az okát. A turbulencia-karakterisztikákat (turbulens áramok és szórások) a CSAT3 – EC150 rendszer adataira támaszkodva a TK3 (TurbulenzKnecht 3.11, Mauder és Foken, 2015) szoftver alkalmazásával mutatjuk be [16]. A két szónikus anemométer, illetve a két – korábban említett – adatfeldolgozó program összehasonlításáról Salavec (2016) munkájából tájékozódhatnak [20].



2. ábra Az OMSZ frontanalízis térképe 2015. július 8-án 00 UTC-kor

2015. 07. 08. Hidegfront, az első zivatarlánc

E napon az előrejelzések országszerte többfelé zivatarokkal, néhol heves zivatarokkal érkező hidegfrontot vártak. A front egy Skandinávia fölött elhelyezkedő ciklonhoz tartozott, mely viszonylag lassan mozgott kelet felé, és Európa szerte heves zivatarokat okozott. Hazánk felett az esti órákban

vonult át a front, ami már az éjféli órákban elhagyta Szeged térségét (2. ábra). A frontról részletesebb tanulmány született Horváth Ákos jóvoltából, amely az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapján elérhető[2]. A délkeleti eseményekről pedig a delmagyar.hu hírportál élőben közvetített[3]. (A mikrometeorológiai méréseket – a villámveszély miatt – 22:40 UTC-kor leállítottuk.)

Az események leírása a repülőtéri és a szinoptikus észlelések alapján

A Szegeden történt zivataros események a hidegfront második hullámához tartoztak. Az első hullám zivatarjai észak felől elkerülték a környéket, azonban a talajfront mögött északnyugatira fordult és átmenetileg megélénkült a szél, porvihart okozva a repülőtér környékén és a kb. 1,5 km-re lévő szinoptikus állomáson is. A repülőtéri észlelések között 17:13 UTC-kor jelent meg az első SPECI távirat 30 kt-s (15 m/s) széllökéssel (SPECI LHUD 081713Z AUTO 24008G30KT //// ////// 32/16 Q1007=), majd egy perc múlva követte a porvihar–homokvihar jelenidő. Az addigi tiszta (CAVOK) látási viszonyokról 5 km-re csökkent a látástávolság, és tornyos gomolyfelhők jelentek meg (SPECI LHUD 081714Z 25009G29KT 5000 DS SS FEW053TCU SCT083 32/18 Q1007=). A szél 17:26 UTC-re északnyugatira fordult, a levegő hőmérséklete pedig mintegy 6 °C-kal csökkent (SPECI LHUD 081726Z AUTO 32020G34KT //// ////// 26/18 Q1008=).18:15 UTC-re aztán „megnyugodott” az időjárás (METAR LHUD 081815Z 35008KT 9999 FEW040TCU 24/18 Q1007=). A szinoptikus észlelésekben 17 UTC-ről (AAXX 08171 12982 41760 32004 10333 20162 39960 40052 55006 70300 81282 333 81856 555 10036 55091=) 18 UTC-re (AAXX 08181 12982 11958 33109 10249 20174 39983 40078 53023 60002 70130 81062 333 10365 30/// 90710 91117=) az északnyugatira forduló megélénkülő szél látható, elmúlt időben por- vagy homokvihar, valamint a távirat végéről leolvasható az elmúlt órában mért 17 m/s-os maximális széllökés.

Az előző átmeneti időjárás változás után a fő események csak később következtek be. 20 UTC-kor észleltek először villogást (AAXX 08201 12982 41970 23503 10225 20181 39981 40077 52021 71300 81082 555 10076=), 22 UTC-kor pedig már dörgött az ég, és újra megerősödött a szél, ismét előfordultak 17 m/s-os lökések is (AAXX 08221 12982 41665 63210 10216 20145 30019 40115 52045 71792 83980 333 81940 82846 555 10064 55174=). A repülőtéri észlelések szerint 20:58 UTC-kor érkezett egy 24 kt-s (12 m/s) széllökés (SPECI LHUD 082058Z AUTO 31014G24KT //// ////// 22/17 Q1011=), két perc múlva pedig meghallották az első dörgést (SPECI LHUD 082100Z 31014KT 9999 TS FEW040CB SCT083 22/17 Q1011=). A csapadék 21:49 UTC-kor érkezett (SPECI LHUD 082149Z 33021G35KT 9999 TSRA FEW040CB SCT083 21/15 Q1012=), így a 22 UTC-s SYNOP táviratba még nem került bele. A zivatar és a csapadék ezután hajnalig kitartott, majd reggelig gyengülő zivatartevékenység és mérséklődő szél volt jellemző. (A mikrometeorológiai mérések reggeltől folytatódtak.)

A repülőtéren észlelt mikrometeorológiai jelenségek

A repülőtéren zajló mikrometeorológiai mérésekből származó adatsorokon is végig követhető az események alakulása. A hidegfront első hulláma olyan változásokat okozott, amelyek irreális, kiugró értékeket eredményeztek a félórára átlagolt turbulens karakterisztikákban (3. ábra).

[2]http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1350&hir=Forro_periodust_zaro_zivataros_hidegfront,_szupercellakkal_julius_8-an

[3]http://www.delmagyar.hu/idojaras/ejfel_elott_ert_ide_a_vihar_fakat_csavart_ki_a_szel_de_szeged_felfrissult_−_fotok/2437087/

A nyomás minimuma a front első hullámának érkezése előtt, még 16 UTC körül állt be. 17 UTC után, a porvihar érkezésekor, egy átmeneti nyomásmaximumot láthatunk, majd az átmeneti csökkenés után a zivatartevékenység „leállásig" folyamatosan nyomásemelkedés volt tapasztalható, kb. 1 hPa/óra intenzitással. A szél 17 UTC után északira fordult és megélénkült, majd az éjszakai zivatarok érkezése előtt átmenetileg újra legyengült. A front első hulláma közel 10 °C-os hőmérséklet-csökkenést hozott kevesebb mint egy óra alatt, valamint némi nedvességet is (csapadékhullás közben egyébként a direkt árammérő műszer nem tudta jól mérni a nedvességet, lásd később a másik esettanulmányt).

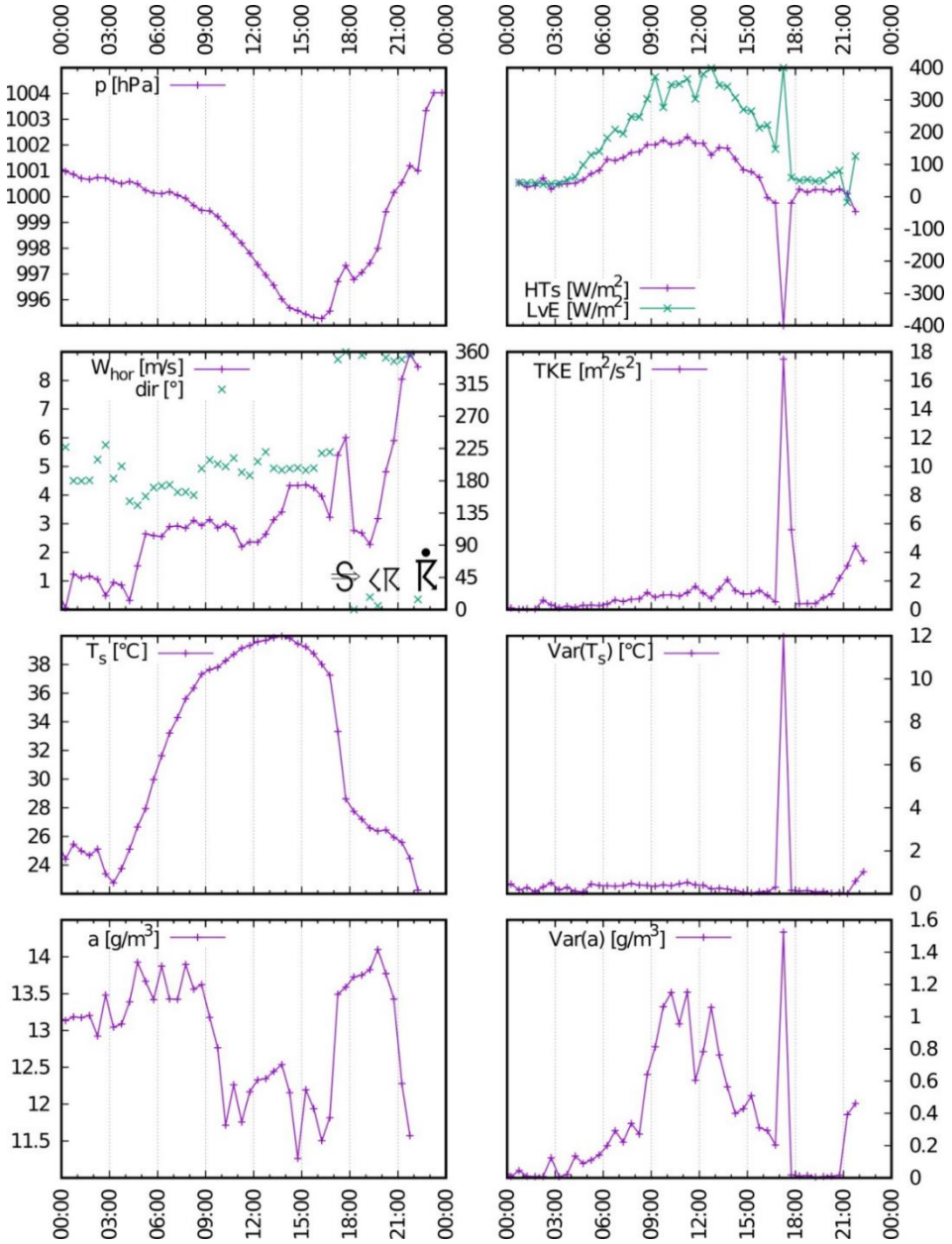
A turbulens karakterisztikák közül a szónikus hőmérsékletből számolt szenzibilis hőáram (HT_s) a porvihart magában foglaló fél órára irreálisan alacsony értéket mutat, holott amikor a meleg felszín fölé hideg levegő érkezik, akkor pozitív kiugrást kellene tapasztalnunk. Ennek magyarázatát később megadjuk. A látens hőáram (L_vE) az érkező nagyobb nedvességtartalmú levegő és a szél megerősödése miatt szenved pozitív kiugrást. A turbulens kinetikus energia (*TKE*), valamint a szónikus hőmérséklet (Var(T_s)) és az abszolút nedvesség (Var(a)) szórásai szintén irreálisan magasra ugranak. A *TKE* esetében ez nem magyarázható a szélerősödéssel, hiszen akkor az esti zivatarok érkezésekor is hasonlóan magas értékeket kellene detektálnunk. Érdekes még, hogy az abszolút nedvesség szórása a porvihar után gyakorlatilag eltűnik, csakúgy, mint a látens hőáram. Ennek oka valószínűleg az, hogy az advekció által érkezett nagyobb nedvességtartalmú levegő, illetve a besugárzás megszűntével lecsökkent a párolgás és meg-szűnt a termikképződés is. Az addig pozitív sugárzási egyenleg előjelet váltott.

UTC	16:45	17:15	17:45	18:15
ITC(W_{hor})	1	7	4	1
ITC(w)	2	2	3	2
ITC(T_s)	1	4	3	4
stat($u'w'$)	1	4	1	1
stat($T_s'w'$)	1	5	3	3
stat($a'w'$)	1	5	2	3
u_*	1	8	3	1
HT_s	1	6	5	1
L_vE	*1*	*6*	*3*	*4*

1. táblázat Foken és Wichura (11) sémája szerinti adatminőségi értékek (részletek: Mauder és Foken, 2015, 4. fejezet (16)) 2015. július 8-án, a porvihar ideje alatt. Az időpontok az átlagolási intervallumok közepét jelölik. A legjobb adatminőség az 1-es, a legrosszabb a 9-es. W_{hor} a horizontális, w a vertikális sebesség, T_s a szónikus hőmérséklet, u_* a súrlódási sebesség, a az abszolút nedvesség. A vesszős tagok a fluktuációkat jelölik. HT_s a szenzibilis, L_vE a látens hőáram. ITC az integrál turbulencia karakterisztika, stat a stacionaritási teszt.

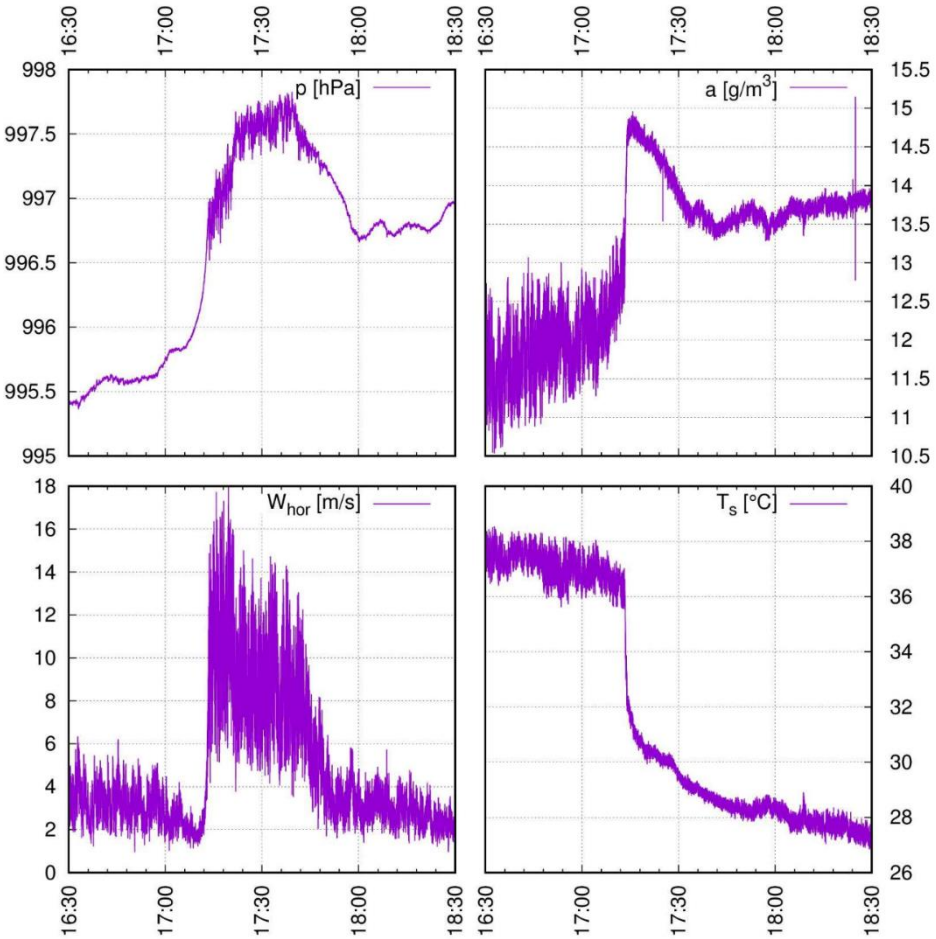
A következő lépésben megvizsgáljuk a direkt árammérések adatminőségét (1. táblázat). Az általunk használt osztályozási rendszerben (16) az 1-es érték jelenti a legjobb minőséget. A legrosszabb a 9-es, amelyeket semmiképpen sem szabad felhasználni. A 7–8 kategóriában, bár az adatminőség rossznak mondható (a stacionaritási teszt alapján), az adatok feldolgozása során még mindig jobbaknak tekinthetők, mint ha helyettük valamilyen interpolált értéket használnánk. A porvihar fél órájában e kategóriát mindössze a szélsebesség, és ezen keresztül a súrlódási (vagy dinamikus) sebesség érte el. (A súrlódási sebesség az impulzusáram gyökével arányos.) Minden

más turbulencia karakterisztika adatminősége a 4–6 tartományban maradt (ezeket elméletek ellenőrzésére nem használhatjuk, de az adatsorban megszorítás nélkül benne maradhat). Ez arra utal, hogy az adatsorokban észlelhető jeleket, változásokat meteorológiai jelenség okozta.



3. ábra Félórás időszakokra átlagolt turbulens karakterisztikák a CSAT3 – EC150 rendszer adatai alapján 2015. július 8-án. Bal oldalon fölülről lefelé az átlagos nyomás (*p*, [hPa]); a szélsebesség (*u*, [m/s], lila) és az átlagszél iránya (*dir*, [fok], zöld); az átlagos szónikus hőmérséklet (T_s, [°C]) és az átlagos abszolút nedvesség (*a*, [g/m^3]). Jobb oldalon a szenzibilis (HT_s, [W/m^2], lila) és a látens (L_vE, [W/m^2], zöld) hőáram; a turbulens kinetikus energia (*TKE*, [m^2/s^2]), a szónikus hőmérséklet szórása (Var(T_s), [°C]) és az abszolút nedvesség szórása (Var(*a*), [g/m^3]). A szél diagramjában a szinoptikus állomáson (12982) észlelt jelenidők piktogramjai is szerepelnek

Az esti időszakban, amikor a zivatarok megérkeztek, a nedvességet tartalmazó turbulens karakterisztikák mind 8-as, vagy 9-es minőségi értékeket kaptak. Az EC150 műszer csapadékos időben hibásan méri a légnedvességet, így a látens hőáram értékei használhatatlanokká váltak (ezt követően le is állítottuk a mérést).



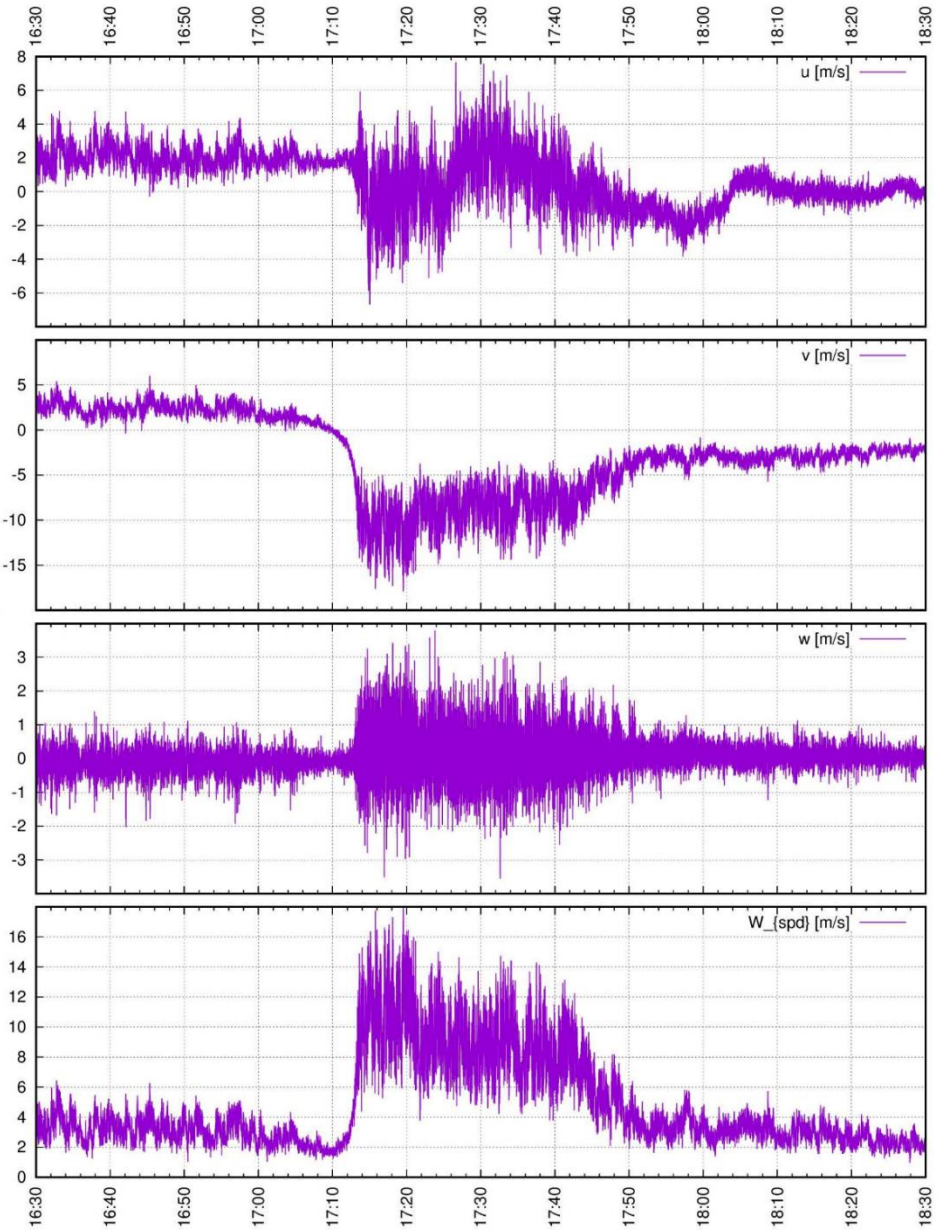
4. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a porvihart körülölelő időszaban 2015. július 8-án: légnyomás (p, [hPa], balra fent), horizontális szélsebesség (W_{hor}, [m/s], balra lent), abszolút nedvesség (a, [g/m^3], jobbra fent), szónikus hőmérséklet (T_s, [°C], jobbra lent).

Végül vizsgáljuk meg a nagy felbontású adatsorokat! A porvihart körülölelő időszak eseményei jól elemezhetők a 4. ábra alapján. A porvihart okozó szélerősödés időtartama kb. fél óra volt, ez alatt több fokkal visszaesett a hőmérséklet, és „benedvesedett" a levegő. Fontos észre venni a turbulencia intenzitás-változását. A porvihar érkezésekor hirtelen megerősödött a szél, és bár utána folyamatosan mérséklődött, csak fél óra múlva állt vissza a porvihar előtti szélsebesség értékre (iránya északias maradt).

A porvihar előtt erősen emelkedni kezdett a légnyomás, s a porvihar alatt érte el maximumát, utána átmenetileg ismét csökkent. Érdekesség, hogy ebben az időszakban megjelent a nyomás jelentős, néhány tized hPa-t átfogó fluktuációja (az EC150 nyomásmérési frekvenciája egyébként 1 Hz). Az abszolút nedvesség szintén jelentősen megnőtt a porvihar érkezésekor, majd fokozatosan csökkent kb. 17:40 UTC-ig, fluktuációja viszont erősen visszaesett. Ezzel együtt a hőmérséklet először mintegy 6 °C-kal esett vissza, majd további lassuló csökkenést figyelhetünk meg. A fluktuációk szintén lecsökkentek.

A 4. ábra közölt menetek magyarázataként szolgálhat, hogy az addig instabil nappali felszínközeli rétegződésű légtömegbe északnyugat felől betört a nem messze elhaladó zivatarok kifutófrontja, mely a környezeténél hidegebb, és nedvesebb volt. Ebben a légtömegben neutrális rétegződés

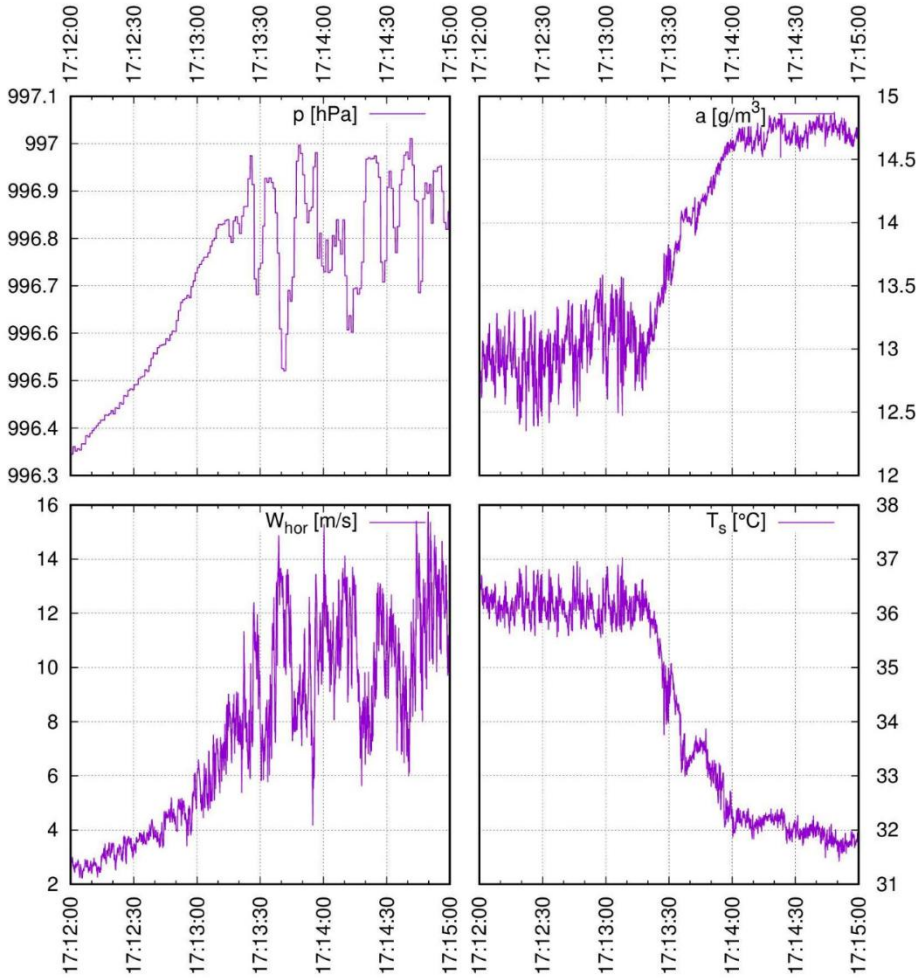
alakulhatott ki, az addig képződő termikek megszűntek, s a párolgás – ahogy korábban már említettük – a növekvő légköri relatív páratartalomnak is köszönhetően jelentősen csökkent. A neutrális rétegződésben szintén a termikek hiánya miatt csökken a hőmérséklet fluktuációja. A szélkomponensek menetét az 5. ábra mutatja. Ezeken jól látszik, hogy az áramlás északi komponense (*v*) nőtt jelentősen, így a szélirány átmenetileg északira fordult. Jelentősen megnőtt a vertikális áramlás fluktuációja is, vagyis az erősödő áramlásból (jelentősen nőtt a szélsebesség) származó mechanikai turbulencia sokkal erősebb volt, mint korábban a termikus turbulencia.



5. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott szélkomponens-adatok (*u*, *v*, *w* és a 3D áramlási sebesség W_{spd}) a porvihart körülölelő időszakban 2015. július 8-án. A szokásos jelölések szerint a koordináta-rendszerünk *x*, *y*, *z* tengelye rendre keletre, északra és a helyi függőleges irányába mutat

Ilyen esetekben könnyen előfordulhat, hogy a kifutófront érkezésére az észlelők nem számítanak, így az épp leszálló repülőgépek komoly veszélyhelyzetbe kerülhetnek. Hasonló veszélyhelyzetek akkor háríthatók el, ha a pilóták még a repülőtér közelébe érkezésük előtt értesülnek a várható változásról. Ez akkor lehetséges, ha a jelenséget legalább néhány perccel korábban

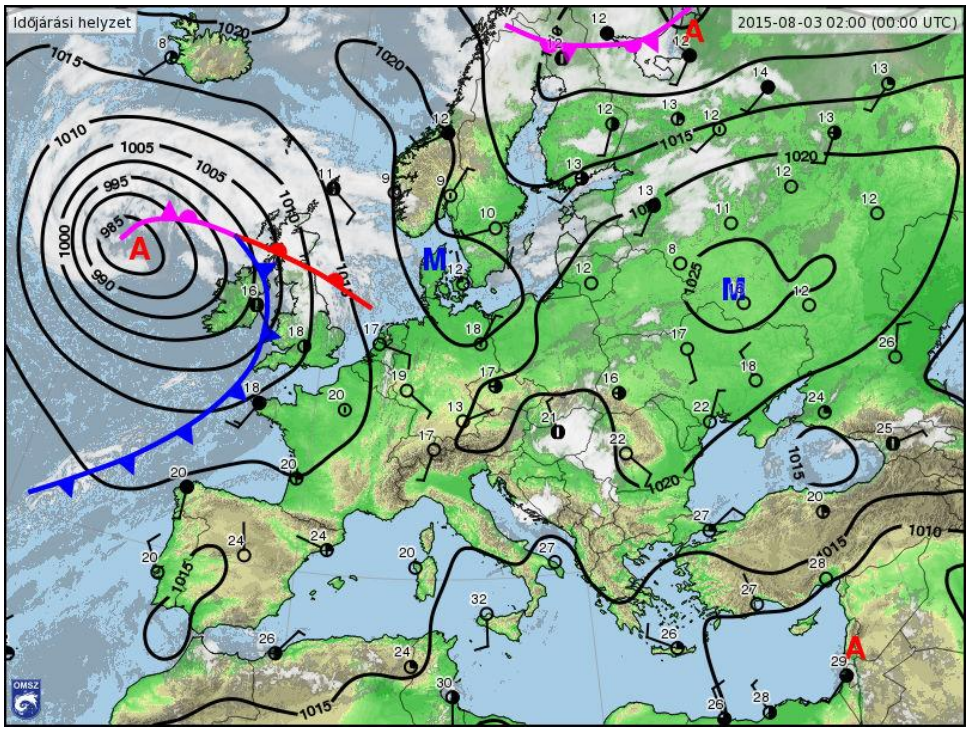
felfedezik, és azonnal jelzik a pilóták felé. Ilyen helyzetben mindenképp segítene, ha a mikrometeorológiai mérések folyamatosan a repülőtéri észlelők rendelkezésére állnának, így valós időben nyomon követhetnék a hirtelen bekövetkező változásokat.



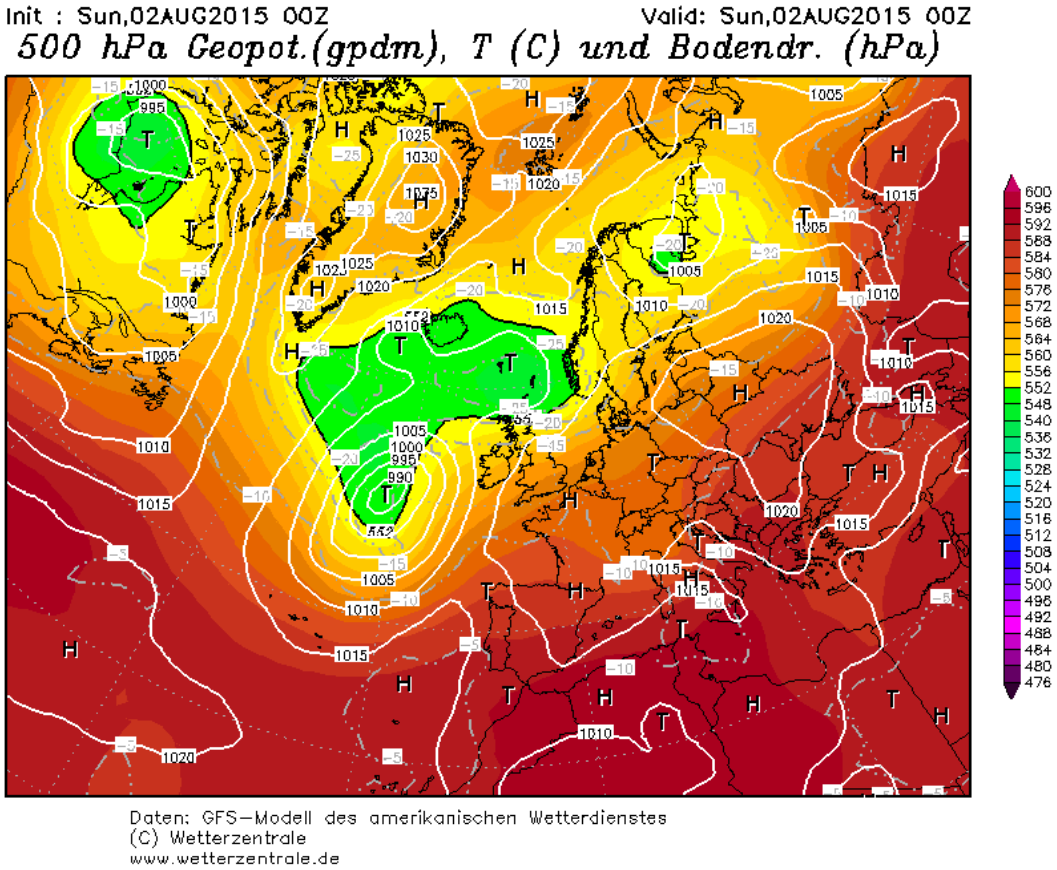
6. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a porvihar érkezésének három percében 2015. július 8-án: légnyomás (balra fent), szélsebesség (balra lent), abszolút nedvesség (jobbra fent), szónikus hőmérséklet (jobbra lent)

2015. 08. 02. Délutáni, esti zivatarok

E napon az előrejelzések alapján magassági hidegörvény hatására egyre labilisabbá váló légkörben zivatarok, a déli országrészben heves zivatarok kialakulására lehetett számítani. Az előző esethez képest jóval kevésbé előzte meg fokozott várakozás e napot, hiszen a heves események valószínűsége jóval kisebb volt, és jóval kisebb területre is korlátozódott. A médiában sem lehetett sokat hallani a zivatarok lehetőségéről. Az OMSZ frontanalízis térképén (7. ábra) csak a Kárpát-medencétől északkeletre lévő anticiklon peremén látható egy ciklonális görbület. A GFS előrejelzési modell reanalízisen (8. ábra) viszont már felfedezhető tőlünk nyugatra a gyenge magassági hidegörvény.

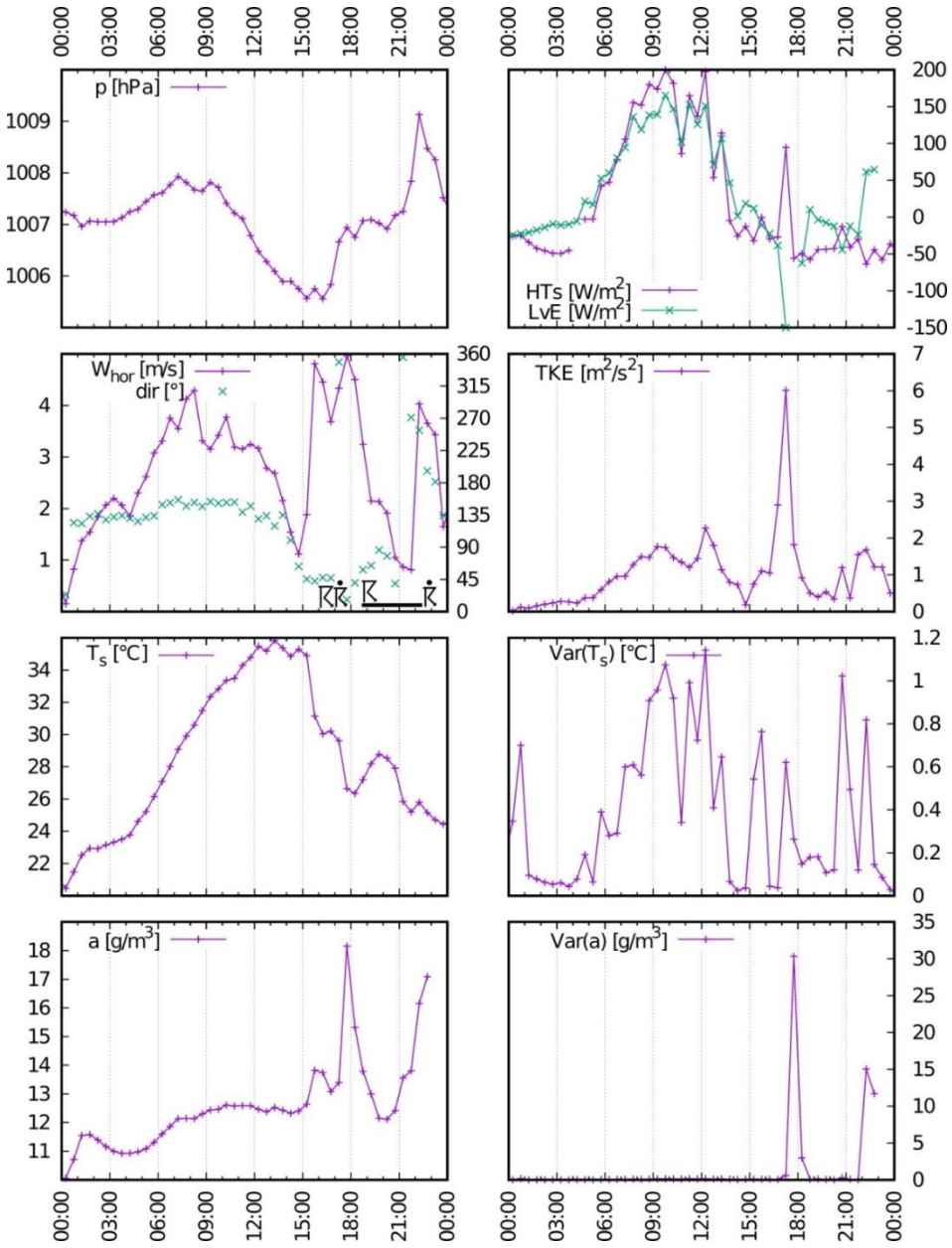


7. ábra Az OMSZ frontanalízis térképe 2015. augusztus 2-án 00 UTC-kor



8. ábra A GFS reanalízise az 500 hPa-os nyomási szinten 2015. augusztus 2. 00 UTC-re. A jobboldali színskála a geopotenciál magasságokat jelöli [gpm]. Az izotermákat [°C] a szürke szaggatott vonalak, a tengerszinti légnyomás izobárjait [hPa] fehér folytonos vonalak jelzik

Az események leírása a repülőtéri és a szinoptikus észlelések alapján



9. ábra Félórás intervallumokra átlagolt turbulens karakterisztikák a CSAT3 – EC150 rendszer adatai alapján 2015. augusztus 2-án. A jelölések megegyeznek a 3. ábra közöltekkel

Az események Szeged térségében helyi idő szerint fél öt körül indultak, amikor a város mellett erős zivatar alakult ki. Ez a repülőtér közvetlen közelében, attól északra kezdett el fejlődni, majd észak-északkelet felé vonult. Az OMSZ 14:40 UTC-s radarképén jelent meg először. Érdekessége, hogy sem a repülőtéren, sem a közelebb eső OMSZ állomáson nem észlelték magát a zivatart. Mindkét helyen csak a zivatarfelhőt látták (METAR LHUD 021445Z 07003KT 9999 FEW040CB SCT051 31/18 Q1016=, AAXX 02151 12982 41675 70702 10307 20178 30062 40156 56011 70322 85382 333 82940 83850 555 10046=). Később a nyugatabbra kipattant zivatarok már „eltalálták” Szegedet. A repülőtéren 16:07 UTC-kor észleltek zivatart (SPECI LHUD 021607Z 02010KT 9999 TS FEW026 BKN033CB 26/18 Q1016=), a szél azonban csak jóval később, 17:26 UTC-re élénkült meg (SPECI LHUD 021726Z AUTO 30012G34KT //// ////// 26/17 Q1017=), amikor a zivatar a város fölött megerősödött, és ekkor is csak átmenetileg. A

zivatartevékenység ezután kb. 00 UTC-ig kitartott kisebb megszakításokkal, közben még egy átmeneti szélerősödéssel 22:11 UTC-kor (SPECI LHUD 022211Z AUTO 21012G24KT //// ////// 22/18 Q1020=). A hőmérséklet visszaesése már az első, közelben kipattant zivatar elvonulása után megtörtént (METAR LHUD 021545Z 01012KT 9999 BKN040 BKN200 27/18 Q1016=).

A repülőtéren észlelt mikrometeorológiai jelenségek

Az előző esettanulmány gondolatmenetét követve elsőként a félórás átlagolással számított turbulencia-karakterisztikákat mutatjuk be. A 9. ábra látható, hogyan jelentkezik ezekben az állomás közelében kipattant zivatarok hatása. A délutáni, kora esti órákban a környéken, vagy kissé nyugatabbra kipattanó zivatarok „kerülgették" a repülőteret kb. 3–5 km-es távolságban, majd kis szünet után éjfél körül egy fejlettebb, de leépülő félben lévő zivatarlánc érkezett délnyugat felől.

A szónikus hőmérséklet félórás (szórás értékei egész nap jelentős ingadozásokat mutatott, így nem lehet eldönteni, hogy a 14:30 UTC után jelentkező ingadozások a zivataroknak tudhatók-e be. Ugyanakkor maga az átlag 15 UTC-ig nem mutat jelentős változásokat (belesimul a várt napi menetbe), 15 UTC után azonban már megjelenik a zivatarok hűtő hatása. A légnyomás minimuma is ekkor „állt be", a szél pedig délkeletiről északkeletire fordult. A szenzibilis (HT_s) és a látens (L_vE) hőáram, a turbulens kinetikus energia (*TKE*) és az abszolút nedvesség (*a*) adatsoraiban a legjelentősebb kiugrások 18 UTC előtt jelentkeznek. A szónikus hőmérsékletben ekkor egy újabb visszaesés következett be, s egy újabb szélmaximumot is láthatunk. Az utolsó zivatar ideje alatt, éjfél körül, csak az abszolút nedvesség szórása és a légnyomás emelkedett meg, a szél iránya pedig 2–3 óra alatt 360°-os fordulatot tett, ahogy a zivatar körül kialakuló lokális áramlások a cella vonulása közben folyamatosan módosították a szélirányt.

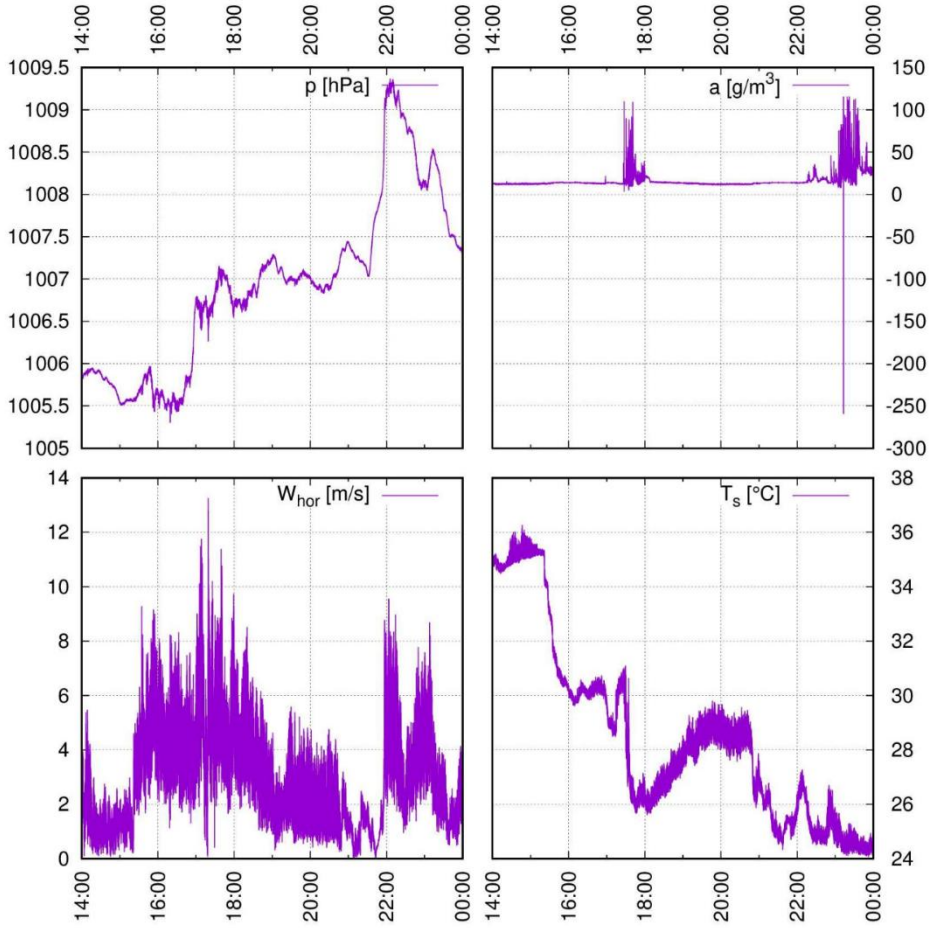
UTC	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**
ITC(W_{hor})	33	62	27	13	12	54	35	66	32	42
ITC(w)	22	12	16	31	11	12	11	33	11	12
ITC(T_s)	72	76	47	23	22	42	38	66	63	11
stat($u'w'$)	21	41	14	31	11	11	14	44	11	11
stat($T_s'w'$)	71	57	66	61	12	31	16	54	43	21
stat($a'w'$)	21	32	64	69	72	61	16	54	33	99
u_*	33	71	18	53	11	53	35	77	31	31
HT_s	81	68	77	74	12	41	17	65	44	54
L_vE	21	42	77	79	82	71	17	65	64	99

2. táblázat Foken és Wichura (1996) (11) sémája szerinti adatminőségi értékek (részletek: Mauder és Foken, 2015, 4. fejezet (16)) 2015. augusztus 2-án, a zivatarok ideje alatt. Az időpontok az órát jelölik, a két érték az adott óra első és második félóráját jelöli

A következő lépésként megvizsgáljuk az adatminőségi értékeket. Azokban az időszakokban, amikor erősebb volt a szél (14, 17, 18 és 23 UTC), az adatminőség csökken, vagyis fejlettebb a turbulencia. Hasonló mintázatot láthatunk a szónikus hőmérséklet és a súrlódási sebesség (u_*) esetén is. A statisztikai tesztek a Reynolds-feszültségre (impulzusáram) nem adnak magas értékeket, 4-es a legrosszabb. A hőáramok esetében azonban gyakran fordul elő 7-et elérő, vagy meghaladó érték, a nedvességmérés hibája miatt (amit a csapadékhullás okoz) pedig a 17:45 UTC körüli fél órában, valamint 23 UTC-kor nem is született értelmezhető eredmény a látens hőáramra. (A szenzibilis hőáram és az impulzusáram méréséhez elég a szónikus anemométer.) Jelen esetben tehát nem tudjuk eldönteni, hogy az észlelt jeleket valóban meteorológiai jelenségek okozták-e: a látens

hőáram esetében egyértelműen közrejátszanak mérési hibák (csapadéktevékenység), míg a Reynolds-feszültség esetében fel lehet tételezni, hogy a műszer mérései jó eséllyel valós állapotokat tükröznek, bár a csapadékhullás befolyásolhatja a szónikus anemométer méréseit is). A szenzibilis hőáram esetén a hőmérséklet mérésében jelentkeznek problémák. Ha feltesszük, hogy a műszer nem hibás, akkor az időjárásban olyan változékonyságnak kell lennie, melyből következően a Reynolds-átlagoláson alapuló módszerek már nem alkalmazhatók a turbulens áramok számítására. Ha megvizsgáljuk a 10 Hz-es adatokat, az segíthet eldönteni, hogy mérési hibájáról van-e szó, vagy az időjárás változásából erednek-e a rossz minőségi értékek.

A 10. ábra leolvasható, hogy nem sokkal 15:30 UTC előtt történt a szél első megélénkülése. A szélirány már korábban elkezdett délkeletiről északkeletire fordulni. A szónikus hőmérséklet (jó közelítéssel megegyezik a virtuális hőmérséklettel) egy gyors visszaesés után lassuló ütemben 35 °C-ról 16 UTC-ig 30 °C-ra csökkent. Ennek okozója az első, közelben kipattant zivatarok egyikének kifutófrontja lehetett. Ezt követően a nyugat felől érkező, erősödő zivatarok hatására 17 UTC körül egy újabb átmeneti kisebb, majd egy erősebb, tartós hőmérséklet-csökkenés következett be. Újabb 4 °C-kal lett hűvösebb, amit további szélerősödés, és légnyomás emelkedés kísért. E zivatarok is éppen csak elkerülték az állomást, bár csapadékot már kapott belőlük a repülőtér. A gyenge intenzitású csapadékhullás alig fél óráig tartott, s mindössze 0,4 mm hullott (AAXX 02191 12982 41570 70305 10222 20186 30071 40168 52010 72992 8496/ 333 83926 82833 555 10080 55101 6994/=).



10. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a zivatarok időszakában 2015. augusztus 2-án. A feliratok megegyeznek a 4. ábra szereplőkkel

E zivatarok elvonulása után szünet következett, a további cellák még jobban (kb. 5–10 km-rel) elkerülték a repülőteret és a hatásuk sem volt kimutatható. A „szünet” alatt mérsékelt maradt az északkeleti szél, és a hőmérséklet is újra emelkedni kezdett. 20:40 UTC körül a szél legyengült, ezzel együtt a hőmérséklet is gyorsan csökkenésnek indult. Délnyugat felől aztán egy kiterjedt zivatarrendszer érte el az állomást, s bár a zivatarok már gyengültek, a csapadékzónából még kora hajnalig kapott a mérőhelyünk csapadékot. A csapadéktevékenység kezdete 22:15 UTC-re tehető. Az érkező zivatarok kifutófrontja hatására ismét megélénkült a szél, mely ekkor már észak-nyugatira, majd délnyugatira (kora hajnalban tovább keletire) fordult. A légnyomás 21:30 UTC-től fél óra alatt mintegy 2 hPa-t emelkedett, a hőmérséklet pedig 20:50 UTC-től ismét csökkent 4 perc alatt 2 °C-kal.

A 10. ábra jobb felső részében láthatjuk a nyers abszolút nedvesség 10 Hz-es menetét. 17:30 és 18:00 UTC között, valamint 23 UTC után a mért nedvességértékek irreálisan nagy oszcillációkat mutatnak. Ez a két időszak jórészt egybeesik a csapadékot jelentő METAR észlelések időszakaival. A vízgőztartalmat mérő EC150 műszer egy infravörös fényimpulzus gyengülését méri, és a vízgőztartalmat ebből számítja. A kibocsátott és a detektorra érkező fényimpulzus intenzitásának aránya szintén szerepel adatsorunkban, valamint egy diagnosztikai változó is, amellyel a műszer maga is képes jelezni, hogy hibás mérési kimenetek adódtak az egyes rekordokban. Az irreális értékek megjelenése alatt a vett infravörös jelek erőssége erősen lecsökken (külön ábrát nem mutatunk be). Ez idézi elő az ún. diagnosztikai jelző-bitek változását. (A jelző-bit „igaz”-ra vált, vagyis problémát diagnosztizál a módszer.) Az infravörös jelerősség 0,9 körüli, nem „túlzottan” ingadozó viselkedése esetén tekinthető megfelelőnek a mérés, ekkor a jelzőbitek mind hamisak (tehát a diagnosztika értéke zérus). A csapadékhullás ideje alatt a jelgyengülést az esőcseppek vagy a műszer kibocsátó, illetve detektáló felületére rakódó vízréteg fénytörése okozza. A részletekről a CSAT3 és az EC150 műszerek gépkönyveiben olvashatunk[18]. Megállapíthatjuk (de ezt is vártuk), hogy a rossz minőségi értékek a nedvességgel kapcsolatos turbulens karakterisztikák esetén a csapadékos időszakokban mindenképpen a műszeres mérés hibájából erednek, így azokat az időjárási események rekonstruálására nem tudjuk felhasználni.

ÖSSZEFOGLALÁS

A 2015-ös szegedi PHR-mérési expedíció során alkalmazott gyors válaszidejű örvény-kovarianciás műszerek adatainak feldolgozása során néhány esetben irreális értékek adódtak a turbulencia-karakterisztikákra. Azt vizsgáltuk, hogy az irreális értékeket mérési hiba (pl. csapadék) vagy valamilyen gyors lefolyású időjárási jelenség okozta-e. Két zivataros időjárási helyzeteket elemeztünk repülésmeteorológiai szempontból.

A 2015. augusztus 2-i esetben (csapadéktevékenységgel kísért zivatarrendszerek átvonulása az állomás felett) a nedvességgel kapcsolatos turbulens jellemzőknél – a várakozásoknak megfelelően – megmutatkozott, hogy az EC150 műszer esős időben nem képes megmérni a légköri víz- és gőztartalmat. A szónikus anemométerrel végzett impulzus és szenzibilis hőáram mérések viszont repülésmeteorológiai célokra használható információt szolgáltattak. Nyomon követhettük a kifutófront érkezését.

A 2015. július 8-i esetben (zivataros időjárási helyzet, az állomáson kialakuló porviharral, a kezdeti szakaszban csapadéktevékenység nélkül) azonban – nagy valószínűséggel – a műszerek

kimenetén megjelenő értékek valós jelek. A megjelenő gyors változások miatt (instacionárius idősorok) azonban a turbulens áramok meghatározására alkalmazott Reynolds-módszer nem használható. E mérések igazolják, hogy egy, a repülésre veszélyes, hirtelen fellépő turbulencia leírásához gyakran nem elég még a perces felbontású mérés sem. (Az általunk bemutatott esetben pl. a hőmérséklet 4 °C-ot csökkent 45 másodperc alatt, lásd 6. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a porvihar érkezésének három percében 2015. július 8-án: légnyomás (balra fent), szélsebesség (balra lent), abszolút nedvesség (jobbra fent), szónikus hőmérséklet (jobbra lent).)

A bemutatott esetekhez hasonlókban, a repülőtéri meteorológusok és észlelők számára is gyakran nehéz feladatot jelent az ilyen mikroskálájú jelenségek felismerése, „pláne" kialakulási valószínűségük előrejelzése. A hivatalos észlelésekben csak a műszerek által jelzett változások kerülnek közvetítésre, a konkrét, veszélyes mikrometeorológiai jelenséget az érkező repülőgépek személyzete felé gyakran csak néhány perc késéssel tudják közölni. Ez adott esetben a repülőtérhez érkező gépek számára olyan veszélyhelyzetet teremthet, melyre a megfelelő információk hiányában nincsenek kellőképpen felkészülve.

A turbulenciát leíró elméletek többségéhez a Reynolds-átlagolásos módszert alkalmazzák, mely felteszi, hogy az átlagolási intervallumon belül a változók időbeli menetének zajtalanított (turbulenciamentes) része konstans. Ez nem mindig van így. Ilyenkor a turbulencia intenzitására, a turbulens áramokra irreális értékek adódnak, amelyeket ki kell zárni a további vizsgálatokból, holott a turbulencia mindig létezik, sőt, időben erősödhet is. Ezekben az esetekben (ha nem történt műszeres hiba) más elméleteket kell kidolgozni a turbulencia leírására.

Vizsgálataink felhívják a figyelmet a nagy időbeli felbontású (1–10 Hz-es) mérési adatok repülésmeteorológiai alkalmazásának fontosságára. Az átlagértékek mellett ismernünk kell a turbulens áramokat, illetve – ami könnyebben előállítható – a meteorológiai állapotjelzők (pl. hőmérséklet, szélsebesség, szélirány) szórásait, akár 1 perces felbontásban is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Bottyán, Zsolt, Hámori, István, Sárközi, Szilárd: A „mozgó sekély köd" jelenség első ismertetése, mint a repülést veszélyeztető elem – egy helikopter katasztrófa elemzése, 2000/29, pp. 238–248

[2] Li, Guohua, Baker, Susan P.: Crash Risk in General Aviation, 2007/297(14), pp. 1596–1598

[3] Bottyán, Zsolt: Kísérlet egy repülőgép-katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára – a Malév HA-MOH repülőgépének balesete, 2008/20(3), p. 1

[4] Arya, S. Pal: Introduction to Micrometeorology, International Geophysics Series, vol. 79. 2 ed., Academic Press, Raleigh, NC, USA, 2001

[5] Stull, Roland B.: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer Science and Business Media, Dordrecht, 2012

[6] Weidinger, Tamás, Cuxart, Joan Rodamilans, Gyöngyösi, András Zénó, Wrenger, Burkhard, Istenes, Zoltán, Bottyán, Zsolt, Simo Diego, Gemma, Tátrai, Dávid, Jeričević, Amela, Matjačić, Blaženka, Kiss, Melinda, Józsa, János: An experimental and numerical study of the ABL structure in the Pannonian Plain (PABLS13). In 21st Symposium of Boundary Layers and Turbulence, Leeds, UK, 2014

[7] Bottyán, Zsolt, Gyöngyösi, András Zénó, Wantuch, Ferenc, Tuba, Zoltán, Kurunczi, Rita, Kardos, Péter, Istenes, Zoltán, Weidinger, Tamás, Hadobács, Katalin, Szabó, Zoltán Attila, Balczó, Márton, Varga, Árpád, Bíróné Kircsi, Andrea, Horváth, Gyula: Measuring and modeling of hazardous weather phenomena to aviation using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). Időjárás, 2015/119(3), pp. 307–335

[8] Cuxart, Joan Rodamilans, Tátrai, Dávid, Weidinger, Tamás, Bíróné Kircsi, Andrea, Józsa, János, Kiss, Melinda: Infrasound as a Detector of Local and Remote Turbulence, 2016/159(2), pp. 185–192

[9] International Civil Aviation Organization: Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation. 16 ed., International Standards and Recommended Practices, ICAO, Montréal, 2007
[10] Gyöngyösi, András Zénó, Kurunczi, Rita, Kardos, Péter, Bottyán, Zsolt, Weidinger, Tamás, Istenes, Zoltán, Szabó, Zoltán Attila: Unmanned aerial observation of the Planetary Boundary Layer for model evaluation and weather prediction purposes in support of UAV operation. In EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 15, 2013, pp. EGU2013–12429
[11] Foken, Thomas, Wichura, Bodo: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric. Forest Meteorol., 1996/78(1), pp. 83–105
[12] Foken, Thomas, Göckede, Mathias, Mauder, Matthias, Mahrt, Larry, Amiro, Brian, Munger, William: Post-Field Data Quality Control. In Lee, Xuhui, Massman, William, Law, Beverly (eds.), Handbook of Micrometeorology, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol. 29, chap. 9, Springer Netherlands, 2004/ pp. 181–208
[13] Foken, Thomas, Leuning, Raz, Oncley, Steven Philip, Mauder, Matthias, Aubinet, Marc: Corrections and Data Quality Control. In Aubinet, Marc, Vesala, Timo, Papale, Dario (eds.), Eddy Covariance, chap. 4, Springer Atmospheric Sciences, Springer Netherlands, 2012/pp. 85–131
[14] Göckede, Mathias, Rebmann, Corinna, Foken, Thomas: A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, 2004/127(3–4), pp. 175–188
[15] Mauder, Matthias, Cuntz, Matthias, Drüe, Clemens, Graf, Alexander, Rebmann, Corinna, Schmid, Hans-Peter, Schmid, Marius, Steinbrecher, Rainer: A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. Agric. Forest Meteorol., 2013/169, pp. 122–135
[16] Mauder, Matthias, Foken, Thomas: Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update), Arbeitsergebnisse, vol. 62. Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, Bayreuth, 2015
[17] Burba, George: Eddy Covariance Method. LI-COR Biosciences, Lincoln, 2013
[18] Sargent, Steve: EC150, IRGASON, or EC155: Which CO2 and H2O Eddy-Covariance System Is Best for My Application? Campbell Sci. White Paper, 2013/2013
[19] Aubinet, Marc, Vesala, Timo, Papale, Dario: Eddy Covariance. Springer Atmospheric Sciences, Springer, Dordrecht; Heidelberg; London; New York, 2012
[20] Salavec, Péter: Örvény-kovariancia számítási módszerek összehasonlító vizsgálata a PABLS-2015 Szegedi Határréteg Mérési Program során. Msc diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 2016
[21] Tordai, Ágoston Vilmos: Mikrometeorológiai mérőrendszer kialakítása és alkalmazása síkvidéki, magashegyi és barlangi körülmények között. Tdk dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 2016

AVIATION-HAZARDING MICRO-SCALE PHENOMENA IN THE PLANETARY BOUNDARY LAYER MEASUREMENT DATASETS OF SZEGED, 2015

During the PABLS-2015, at the Airport of Szeged (ICAO: LHUD), Hungary, in the summer of 2015, micrometeorological measurements of the planetary boundary layer were made. Surface energy budget measurements were also carried out. Two high frequency sonic anemometers were used with 10 Hz frequency. The turbulent fluxes were calculated with TK3 and EddyPro (Li-Cor) software using eddy-covariance method with 5 and 30-minute averaging intervals. The quality assurance and control system was also applied. We are presenting two case studies, when some micrometeorological phenomena (e.g. gust fronts, dust storms) – which could be invisible using usual airport measurements – can cause sudden and potentially dangerous aviation situations. This study aims to illustrate the importance of using short response-time equipment together with traditional sensors, and the importance of calculating variances and turbulent fluxes beyond averages.

Keywords: *PABLS-2015, Szeged, Micrometeorology, Aviation Safety*

Salavec Péter (MSc) repülésmeteorológus Országos Meteorológiai Szolgálat Előrejelzési Főosztály Repülésmeteorológiai Osztály salavec.p@met.hu orcid.org/0000-0001-5126-192X	Salavec Péter (MSc) aviation meteorologist Hungarian Meteorological Service Department of Forecasting Unit of Aviation Meteorology salavec.p@met.hu orcid.org/0000-0001-5126-192X
Dr. Bordás Árpád, PhD középiskolai tanár Bolyai Tehetséggondozó Gimnázium, Zenta, Szerbia bordas.arpad@gmail.com orcid.org/0000-0001-5185-5189	Dr. Bordás Árpád, PhD secondary school lecturer Bolyai High School, Zenta, Serbia bordas.arpad@gmail.com orcid.org/0000-0001-5185-5189
Dr. Bozóki Zoltán, PhD egyetemi tanár MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport zbozoki@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-3638-9524	Dr. Bozóki Zoltán, PhD Professor HAS-SZTE Photoacoustic Research Group zbozoki@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-3638-9524
Dr. Joan Cuxart Rodamilans, PhD egyetemi tanár Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica joan.cuxart@uib.cat orcid.org/0000-0002-6217-8045	Dr. Joan Cuxart Rodamilans, PhD Professor Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica joan.cuxart@uib.cat orcid.org/0000-0002-6217-8045
Dr. Istenes Zoltán, PhD egyetemi docens Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatikai Kar Programozáselmélet és Szoftvertechnológiai Tanszék istenes@inf.elte.hu orcid.org/0000-0002-0169-4791	Dr. Istenes Zoltán, PhD Associate Professor Eötvös Loránd University Faculty of Informatics Department of Software Technology and Methodology istenes@inf.elte.hu orcid.org/0000-0002-0169-4791
Horváth Gyula szakmai elnökhelyettes Országos Meteorológiai Szolgálat horvath.gy@met.hu orcid.org/0000-0001-5431-1355	Horváth Gyula vice-president Hungarian Meteorological Service horvath.gy@met.hu orcid.org/0000-0001-5431-1355
Gemma Simó (MSc) PhD hallgató Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica gemma.simo@uib.cat orcid.org/0000-0001-8219-0810	Gemma Simó (MSc) PhD Student Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica gemma.simo@uib.cat orcid.org/0000-0001-8219-0810
Nagy Zoltán (MSc), osztályvezető Országos Meteorológiai Szolgálat Megfigyelési Főosztály Adatellenőrzési Osztály nagy.z@met.hu orcid.org/0000-0002-4600-5232	Nagy Zoltán (MSc), Head of Unit Hungarian Meteorological Service Observations Department Unit of Data Verification nagy.z@met.hu orcid.org/0000-0002-4600-5232
Tordai Ágoston Vilmos BSc hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék tordaiagoston@gmail.com orcid.org/0000-0002-8617-0531	Tordai Ágoston Vilmos BSc student Eötvös Loránd University Department of Meteorology tordaiagoston@gmail.com orcid.org/0000-0002-8617-0531

Dr. Torma Péter, PhD egyetemi adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék torma.peter@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-9282-6931	Dr. Torma Péter, PhD Assistant Professor Budapest University of Technology and Economics Department of Hydraulic and Water Resources Engineering torma.peter@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-9282-6931
Dr. Weidinger Tamás, PhD egyetemi docens Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék weidi@caesar.elte.hu orcid.org/0000-0001-7500-6579	Dr. Weidinger Tamás, PhD Associate Professor Eötvös Loránd University Department of Meteorology weidi@caesar.elte.hu orcid.org/0000-0001-7500-6579
Prof. Dr. Burkhard Wrenger, DSc oktatási rektorhelyettes, egyetemi tanár Hochscule Ostwestfalen-Lippe burkhard.wrenger@hs-owl.de orcid.org/0000-0003-0196-0698	Prof. Dr. Burkhard Wrenger, DSc Vice-Rector, Professor Hochscule Ostwestfalen-Lippe burkhard.wrenger@hs-owl.de orcid.org/0000-0003-0196-0698

A szerzők köszönetet mondanak az OMSZ munkatársainak, a Szegedi Magaslégköri Obszervatórium észlelőinek és PABLS-13 és PABLS-15 mérési programban résztvevő kutatók munkájáért. Külön köszönet illeti Sebők Istvánt (OMSZ) a mobil rádiószondás mérésekhez nyújtott segítségéért, Gyöngyösi András Zénót (SZTE) a mérések előkészítésben való részvételért és Bottyán Zsoltot (NKE) a kutatási program elindításáért. A kutatás az OTKA NN-109679 és a GINOP-2.3.2-15-2016-00007, valamint a spanyol ATMOUNT-I program támogatásával valósult meg.

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE" című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „UAS ENVIRON" nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-26-0383_Salavec_Peter_et_al.pdf

Domján Károly

A LÉGIERŐ SZÁMÁRA KIALAKÍTHATÓ MODULÁRIS SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET KIALAKÍTÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI, KÉPESSÉGEK MEGSZERZÉSÉHEZ, FENNTARTÁSÁHOZ ÉS ELJÁRÁSOK TÖKÉLETESÍTÉSÉHEZ

A Magyar Honvédség és együttműködő szervezeteik, valamink a katonai oktatási intézmények számára testreszabottan tervezett, globális, makro és mikró szimulációs környezet kialakításának, kihasználhatóságainak lehetőségeivel foglakozik a publikáció. A kor igényeit a katonai szervezetekre és ezen belül is elsősorban a légierőre levetítve, a virtuális valóság felhasználásával, a technológia által biztosított lehetőségekkel viszonylag egyszerűen és költséghatékonyan ki lehet elégíteni. A mikrokörnyezeteket egy közös Virtuális Légtéren keresztül kezdetben makro, később globális környezetté lehet összekapcsolni. Az így teremtett virtuális világ számtalan lehetőséget hordoz magában, mely mind a képzésben, mind a gyakoroltatásban, mind pedig a hatékonyabb eljárások kidolgozásában felbecsülhetetlen értékű rendszert alkot. Nem elhanyagolható az a lehetőség sem, mely alapján a már kiképzett, de egyéb okok miatt már nem repülő hajózó állomány szaktudása továbbra is kiaknázható.

Kulcsszavak: *virtuális légtér, szimuláció, virtuális valóság, kiképzés, gyakoroltatás, tovább foglalkoztathatóság, repülésbiztonság.*

A témakör bemutatásához – a terjedelemre való tekintettel – a publikációt három fő fejezetre kellett felosztani, melyek mindegyike önmagában is egy külön álló publikáció. A felosztás fő csoportjai, az elméleti kihasználhatóság és az ezt biztosító környezet ismertetése, a hálózat topológia, a szoftverkörnyezet, valamint azok szinkronizációja. A szükséges és megfelelő szoftver környezet alkalmas kell, hogy legyen arra, hogy eltérő platformok eltérő adatfolyamait a megfelelő módon átforgatva, azt minden rendszer számára értelmezhető és megjeleníthető információkká tegye. A választott globális szimulált világ a speciális virtuális környezeteknek biztosít a valóságban is előfordulható szituációkat, sőt sok esetben még olyan helyzeteket is, melyek csak szándékos generálás útján hozhatók létre. Korunk félelmetes sebességgel változó kihívásainak csak úgy tudunk eleget tenni, hogy kihasználjuk a cyber világ nyújtotta lehetőségeket és kihasználjuk azt az oktatástól a gyakorláson keresztül alkalmazott vagy alkalmazandó eljárások tesztelésére vagy begyakorlására. A publikáció a következő fa struktúra szerint került bontásra. A három rész egy egészként próbál egyfajta alternatívát kínálni az imént felvázoltakra.

A GLOBÁLIS SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETBEN REJLŐ LEHETŐSÉGEK

A szimulációról általánosságban

A szimuláció talán már a földi élet megjelenésével egyidős jelenség. Az élővilág törvényeinek köszönhetően, szinte minden élőlény kifejlesztett valamilyen szimulációs eljárást, képességet, a túlélés érdekében. Erre a képességre rengeteg példát találhatunk a természetben. Vannak növények melyek különleges és figyelem felkeltő színekkel szimulálják mérgező mivoltukat, miközben mindez csak álca. Az állatvilág némely képviselője halottnak tetteti magát veszélyhelyzetben,

más állatfajok a növényekhez hasonlóan színekkel jelzik a ragadozók felé, hogy bizony nem a legjobb ötlet elfogyasztani őket. Ezzel is megtévesztve támadóikat. A kaméleon a környezetének színvilágát szimulálva rejtőzik el, a botsáska – ahogy a nevében is benne van - képes utánozni egy faágat, így biztosítva nagyobb túlélési esélyét. Azonban ez is mind a szimuláció valamely formája. Az emberiség a technika fejlődésével egyre komolyabb szinten volt és lesz képes az őt körülvevő valóságot leutánozni. A repüléshez kapcsolódóan a modellezés szinte elhanyagolhatatlan, függetlenül attól, hogy ezt fizikailag vagy szoftveresen teszik. A szélcsatorna a modell és az arra ható áramló fizikai környezet viszonyán keresztül képes utánozni a repülés során jelen lévő aerodinamikai jellemzőket. Mindez olyan lehetőséget biztosít, mely segítségével képesek vagyunk felkészülni bizonyos - főleg kiemelt – helyzetekre, és szinte készség szintre emelhetők az alkalmazandó eljárások. A történelemből egy egyszerű példán keresztül erre közvetlen bizonyítékot is találhatunk. Az Amerikai Űrkutatás történetében a NASA egyik holdexpedícióján előre nem várt események következtek be. Az Apollo 13 űrhajó a hold felé szenvedett olyan sérüléseket, hogy a személyzet csak a szerencsének, illetve az akkor még kezdetlegesnek számító szimulátoroknak köszönheti a szerencsés kimenetelű katasztrófa túlélését. A teljes visszatérési programot létre tudták hozni úgy, hogy a szimulátorban addig tesztelték az eljárásokat, míg a használható eljárást meg nem alkották. Mind ehhez a szóban forgó szimulátor vizuális megjelenítő képessége erősen korlátozott volt. Az azóta eltelt idő és az informatika robbanásszerű fejlődése a szimulátorok felhasználását, az élet számtalan területére lehetővé tette. A vizuális megjelenítés óriási fejlődésen ment keresztül, ami igen csak szükséges, hiszen az ember, a szeme által felfogott ingereket kezeli első helyen, az összes többi érzékszervvel szemben. Természetesen a többi érzékelési forma is magas prioritást élvez. Az építészek képesek szimulálni a megtervezendő épületek, objektumok időjárási vagy fizikai behatásokkal szembeni ellenállását, de más szakmák is komoly hasznot húznak a teremtett valósághű környezetből. Manapság már a tervező szoftverek azt is lehetővé teszik, hogy a megtervezett tárgyakon, eszközökön, folyamatokon … stb., előre lefuttatnak szimulációkat, így adva lehetőséget a tökéletesítésre.

Tulajdonképpen ez az a pont, ahol a publikáció témája kapcsolódik a kihasználandó lehetőségekhez. Több szempontból is kiemelten hasznos lehet a Magyar Honvédség, és elsősorban a Magyar Légierő számára, ha a megadatott (technológiai) lehetőségeket, akár egy folyamatos lépéssorozat révén kiaknázza.

A szimulációs környezet előnyei

A virtuálisan létrehozható világ a számtalan veszély mellett, számtalan előnnyel is rendelkezik. Ezekre fókuszálva, a számunkra legelőnyösebb tulajdonságokat kell megragadni és kihasználni, a káros tulajdonságokat pedig a lehető legkisebb szintre leredukálni. A repülés egyik legfontosabb összetevője a repülésbiztonság (Flight Safety). A magasabb biztonsági szint eléréséhez is elhanyagolhatatlan a szimuláció. Akár a repülő- hajózó, akár a légiforgalmi irányító, vagy akár a repülő műszaki szakszemélyzetet véve alapul. Minden területen megtalálhatóak a kiépíthető rendszer előnyei. Ezek közül nézzünk meg néhányat.

A repülő- hajózó (pilóta) szakszemélyzetek, a számukra optimalizált repülő szimulátorok alkalmazásával úgy végezhetnek kiképzési vagy gyakorló repüléseket, hogy sem magukra, sem a külvilágra nem jelentenek a tevékenységeik veszélyt. A virtuális légtérben történő repülések bizonyos területeken, például műszeres repülési feladatok gyakorlására szinte teljesen

megegyezhet a valósággal. A szimulátor programok képesek utánozni a valós műszeres repülés minden összetevőjét. Az eljárások gyakorlása így egyszerűbb, biztonságosabb és költséghatékonyabb. A gazdaságosság elhanyagolhatatlan a mai világban, ahol a katonai repülésben egyre kevesebb pénzt fordítanak a repülési óraszámokra. Mivel a repülés törvényeit vérrel írták, így előre borítékolható, hogy mindez a repülésbiztonság rovására történik. A virtuális valóság ebben is megoldást jelenthet. A vészhelyzetek bekövetkeztét hatékonyabb kiképzettséggel, gyakorlással, fejlett eljárásokkal, valamint a technológiai fejlődés kihasználásával egyre alacsonyabb valószínűségi szintre csökkenthetjük, azonban teljesen megszüntetni soha nem fogjuk tudni. A szimulátorok ezen az igen csak komoly területen is segítséget nyújthatnak, hiszen a vészhelyzetekben alkalmazandó eljárások begyakorlása korlátlan számban megismételhetők, természetesen veszélytelenül. Olyan vészhelyzetek is előidézhetők melyek előfordulása a valóságban szinte a nullával egyenlő. Azonban az alacsony valószínűség ellenére mégis bekövetkezhetnek, de ellensúlyozásukra hatékony eljárások dolgozhatók ki.

A légiforgalmi irányítók a szimulátorok segítségével biztonságosan megtanulhatják, gyakorolhatják a légtérben, a légiforgalomban résztvevő légijárművek biztonságos elkülönítését, irányítását, fel-és leszállítását, valamint a földi gurultatását.

A légvédelmi irányítók veszélytelenül gyakorolhatják a harci alkalmazás eljárásait levegő- föld, levegő- levegő, vagy levegő- víz helyzetekben is. Képesek lehetnek teljes harci taktikákat elsajátítani, vagy készség szintre emelni. A szimulátor programoknak köszönhetően, mindezt a szimulált valós légterekben vagy területek felett is végrehajthatják. Ebből tisztán láthatjuk, hogy a teljes föld, illetve annak teljes légtere is elérhető. Bizonyos meglévő hadműveleti, légi vezetési, és/vagy irányítási rendszerek például: MASE[1], CSI[2][3], ICC[4], ACCS[5] rendelkeznek saját, beépített szimulációs képességekkel, de mégsem alkotnak globális rendszert, ahol minden szakterület egyszerre képes csak szimulátor segítségével gyakorolni, valamint szimulációs képességeik korlátozottak. Ez a virtuális világon alapuló szimulációs környezet, melyről a publikáció szól, képes ezeket egy rendszerben kezelni és mindenkit láthatóvá tenni a másik résztvevő számára, mindezt kizárólag csak szimulátorral. Az említett Hadműveleti rendszerek esetében a MASE[1] rendszer ISP[6] szimulációs modulja képes komplett Scenario (forgatókönyv) létrehozására, valamint annak visszajátszására az éles hadműveleti rendszerben. Azonban ez paraméterezett programsorok általi szimuláció. A szimulációban résztvevő elemek mindegyike egy előre bevitt idő, irány, sebesség, magasság és koordináta szerinti programsor, így mögötte nem áll élő szakember. Itt különbséget kell tennünk azonban a „Driver[7]" pozíciókban ülő szakemberek és az általam említett, a szimulációban közvetlenül résztvevő, élő személy között. Ugyanis az köztudott, hogy ahol emberi tényező is szerepet játszhat, ott olyan változókkal is számolni kell, melyeket előre megírt modellek képtelenek valósághűen szimulálni.

Mit értek ez alatt?

[1] MASE: Multi Aegis Site Emulator
[2] CSI: CRC System Interface
[3] CRC: Command and Control Center
[4] ICC: Integrated Command Control System
[5] ACCS: Air Command and Control System
[6] ISP: Integrated Simulation Package
[7] Driver: Az ISP által létrehozott élő szimulációjában résztvevő, kezelő személy, aki egyidőben akár több szimulált légijárművet is kezel

Ha alapul veszünk például egy egy-az-egy elleni elfogási gyakorlatot, akkor ez úgy néz ki, hogy az IC[8] (Légvédelmi irányító, közismertebb néven vadászirányító) adja az utasításokat a valósággal teljesen megegyező módon, de az utasításait egy a „Driver" pozícióban lévő szimulált vadászrepülő hajózó (vadászpilóta) hajtja végre. A kapott utasítások alapján az irány sebesség, magasság paramétereket egy beviteli ablak segítségével betáplálja, rendszer pedig az adott paraméterek alapján mozgatja a szimulált légicélt. Tisztán látható, hogy ebben az esetben a mesterségesen létrehozott légicélokat a rendszer kötött, szabályozott paraméterek alapján szinte tökéletesen mozgatja kizárva a valódi személyzet repülőgép vezetési képességéből adódó, de a valóságban megjelenő eltéréseker.

Ezzel szemben az általam tervezett rendszer a szimulációt is élőbbé teszi, hiszen a légvédelmi Irányító is a saját munkaeszközén dolgozik, a repülőgép vezető pedig egy repülőgép szimulátorral hajtja végre a feladatokat, valódi vezérlőkkel (Joystick, gázkar, pedál).

A repülőgépek üzemben tartásában, fejlesztésében résztvevők speciális szimulátorokkal képesek a megbízhatóság és a rendelkezésre állás szintjének mind magasabbra emelésére. Ez, és az összes többi előny – ami csak néhány volt a számtalan lehetőség közül –, együtt emelik a repülésbiztonság szintjét.

KIÉPÍTÉSI LEHETŐSÉGEK ÉS A RENDSZER KIHASZNÁLHATÓSÁGA

A már korábban említett informatikai világ rohamléptekkel halad egy a valóságot nagymértékben szimulálni képes „Virtuális Valóság" irányába. Kétségtelen, hogy a folyamat megállíthatatlan, és hogy ez milyen kihatással lesz az emberiség mindennapjaira, egyelőre megbecsülhetetlen. Mivel ezt a folyamatot sem fékezni, sem megállítani nem tudjuk, valamint megpróbálni sem volna helyes, csak egyet telhetünk. Megpróbáljuk kiismerni a rendszer erős és gyenge pontjait, majd a szerzett ismeretek, tapasztalatok függvényében törekszünk a maximális kihasználhatóságra. Sajnos a Magyar Honvédség egészében komoly lemaradás tapasztalható a szimulátorok felhasználásában. Több egymástól független és csak egy- egy speciális területre rendszeresített szimulátor van alkalmazásban. Természetesen mindenekelőtt le kell szögeznünk, hogy a komoly szimulátorok bekerülési és üzemeltetési költsége akár a „csillagászati szintet" is elérheti. Azonban van olcsóbb és egyben hatékonyabb megoldás is. Ebben a publikációban én egy kifejezetten a légierő számára felhasználható mikró, makró és globális környezetet ismertetek, de nyitva hagyva egy kaput más fegyvernemek bekapcsolhatóságának lehetőségére. Köszönhetően annak, hogy kezdetben csak a szórakoztatás volt a szimulátor programok fő célja, a számítógépek teljesítményének növekedésével ezek a felhasználási lehetőségek kiszélesedtek. Minden idők eddigi legsikeresebb és egyben a legnagyobb múltra visszatekintő szimulátor programja, a „Microsoft Flight Simulator" sorozata volt. Jogos a kérdés, ha valami ilyen sikeres volt, akkor miért múlt időben beszélünk róla? Hosszú évtizedek után, a Microsoft cég sajnos úgy gondolta, hogy a sikeres program sorozatát egy inkább bevételorientált játszható „szimulátor" verzióvá fejleszti. A világon milliók használják a Flight Simulator programokat, és rengeteg cég is abból él, hogy a lehető legrealisztikusabb kiegészítőket alkossa meg a szoftverhez. Így a „Microsoft Flight" már megjelenése előtt halálra volt ítélve. Természetesen a

[8] IC: Intercept Controller

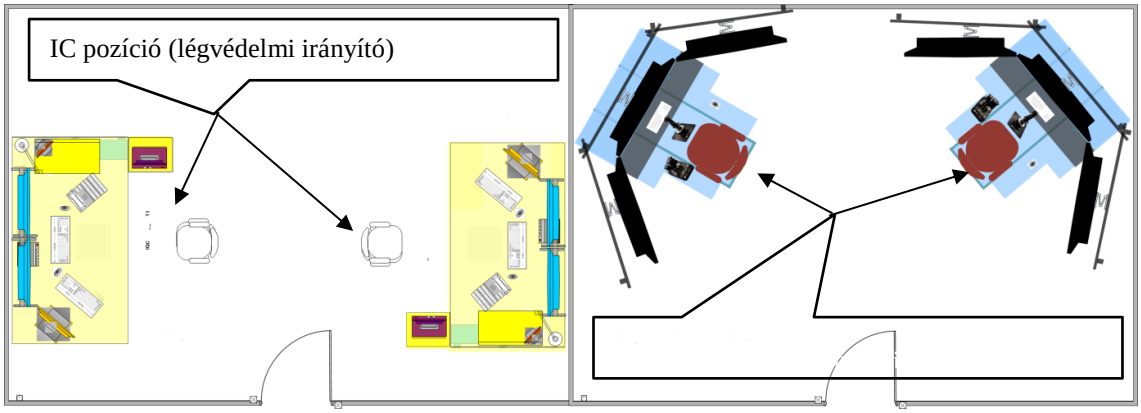
jósolt bukás be is következett, így az oly sikeres programsorozat alkotóit, az anyacég „Microsoft" szélnek eresztette. Ekkor jött a képbe a Lockhead Martin, a világ egyik legnagyobb fegyvergyártója. Ők felkarolták az éppen szabadúszó kis fejlesztő csapatot, és a Flight Simulator X verzióját alapul véve megalkották a részben kompatibilis utódot, a „Prepar 3D-t. Ez a szoftverkörnyezet ad lehetőséget arra, hogy az általam „elképzelt", tervezett szimulált világot kialakíthassuk. Az új verzió már filozófiájában is egy komoly rendszer lehetőségét vetíti elénk, mely egyszerre lesz képes „Realtime", valós idejű virtuális világot teremteni levegőben, földön, föld körül, vízen, valamint a víz alatt. A Prepar 3D nemcsak valós idejű, de a méreteket (föld, repülőterek, domborzat, objektumok) is 1:1 méretarányban szimulálja.

Ezen rövid bevezető, valamint szoftvertörténeti áttekintés után, alkalmazzuk a harcias sebészek csatakiáltását, és „vágjunk bele!". Köszönhetően annak, hogy ez a szoftver „hagyományos" PC alapú, elénk vetíti, hogy bekerülési és fenntartási költsége barátságosabb, mint a „komoly" szimulátoroké. Ismerve a Magyar Honvédség anyagi helyzetét, muszáj egyfajta fokozatosságra törekednünk. A csecsemő is mászik mielőtt járni tanul, így az egészen kicsi „mikró" környezetben érdemes első lépésként gondolkodnunk. Mondhatnánk, hogy „minden Szentnek maga felé hajlik a keze" ez most egy kicsit rám is igaz lesz és a saját munkahelyem lehetőségeihez kezdem a tervek kialakítását. A Magyar Honvédség Légi Vezetési és Irányítási Központjában szolgálva találtam jó lehetőségekre, Partnerekre a rendszer kialakítását illetően. Ahogy a Központ nevében is benne van, fő feladatköre a légi vezetés, valamint a légi irányítás. Az előző fejezetben megemlített rendszerek itt is visszaköszönnek, de egy másik aspektusból megközelítve tárgyaljuk őket. Sajnos ismételten a szűkös anyagi körülményekre kell visszatérnem, ami a mi alakulatunknál akár komoly repülésbiztonsági kérdéseket is felvet. A kevés repülés miatt kevés a lehetőség a légvédelmi irányító IC állomány képzésére, gyakoroltatására, jártasságuk magasabb szintre emelésére. Ha a valós repülési óraszámokat – annak költségessége miatt – nem tudjuk emelni, szimuláljunk nekik irányítható Légi forgalmat, légi célokat, légi járműveket. Az irányító állomány gyakorlása szempontjából, a monitor előtt ülve szinte elhanyagolható az a különbség, hogy a szimulált jel forrása mögött valódi repülőgép és pilóta, vagy egy szintén szimulátor előtt ülő szakember manőverezése látható. Itt egy pillanatra megállva térjünk vissza az előző fejezetre. Furcsának tűnhet, de míg az IC[9] szemszögéből szinte mindegy, hogy a jel forrása valódi vagy szimulált, mégsem mindegy, hogy a szimulált jel mögött az ISP-t kezelő, vagy egy repülőgép szimulátor előtt ülő személy a kulcsfigura. Az IC-k számára azonban lényeges, hogy a szimulációt a munkájukhoz is használt rendszeren hajtsák végre. Gondolok itt arra, hogy a Magyar Honvédség Légi Vezetési és Irányítási Központ, Légi Irányító Központjában (a továbbiakban: MH LVIK LIK), a Légi Irányítási Rendszer (a továbbiakban: LIR) fő alrendszereként használt MASE rendszeren legyen lehetőség a légi irányítás gyakorlására. Ez feltétlenül szükséges, hiszen a készség szinten történő eljárások elsajátításához az alkalmazott rendszer szoftver készség szintű alkalmazása elengedhetetlen. Az eltérő szoftverkörnyezet ugyanis további tévedési és hibalehetőségeket hordoz magában. Ezen elvet követve olyan környezetet kell kialakítani, melyben helyileg egy helyen, de elkülönítve van a rendszer kiépítve. Az információ védelmi előírásoknak eleget téve, hadműveleti rendszer (MASE[11]) egy másik szimulátorral, (Prepar3D) – és ezzel együtt az internettel – történő összekötése, csak komoly biztonsági eszközök és előírások meglétével lehetséges. Mindemellett a Nemzeti Biztonsági Felügyeletnél (a továbbiakban: NBF) a rendszer akkreditálása is szükséges lenne.

Tekintsük át a kialakítható és kialakítandó mikró, makró és globális környezet elméleti lehetőségeit.

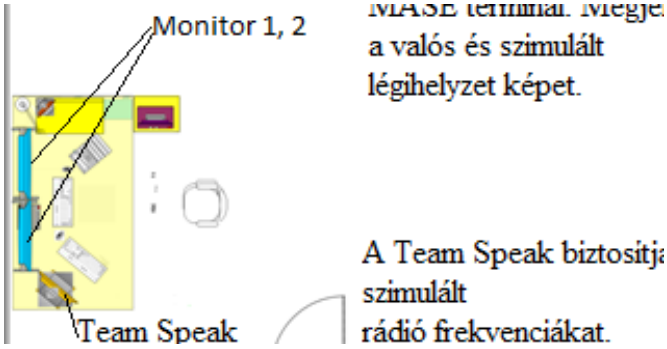
Mikró szimulációs környezet kiépítése

Viszonylag kis helyigényű kialakítás, melyben a fizikai elkülönítés megoldható. Az elkülönítés pilóta ás irányító között feltétlenül fontos szempont, mert az áthallás nagymértékben lerontja a szimuláció realisztikusságát. A két helyiség azonban lehet közvetlenül egymás mellett. A hardveres kialakítás az MH LVIK viszonylatában első ütemként elegendő lenne egy két- két gépes konfiguráció. Két nagyteljesítményű PC és egy szerver futtathatná a külön kiépített MASE LIR[9] környezetet, két PC pedig a szimulált repülőgépeket, melyek a Prepar3D (a továbbiakban: P3D) szimulátor szoftver biztosít. Ez az elméleti konfiguráció a képzésen túl képes biztosítani a levegő-föld, levegő-levegő, levegő-víz, de akár az 1-1, 1-2, vagy 2-2 elleni légi harc imitációt is. Két PC bővítéssel a 2-4 elleni arány is elérhetővé válik.



1. ábra A Mikró szimulációs környezet elvi vázlata

A PC-k tekintetében többféle hardveres kialakítás is kivitelezhető egy konfigurációban. Ez lefedi a széles látótér (Widewiev) többmonitoros megjelenítést, de képes az Oculus Rift (Virtuális szemüveg) által biztosított teljes virtuális élmény átadására is. A kezelőszervek, úgymint botkormány, gázkar, pedál, professzionális eszközökkel biztosíthatók. Ahhoz, hogy a szimulált környezet megfeleljen a valóságnak, a valós idejű (realtime) vizuális kapcsolat mellett az audio kapcsolat is elengedhetetlen. Az hangkommunikációs kapcsolat biztosítására is megfelelő szoftverek állnak rendelkezésre például a „Team Speak”.



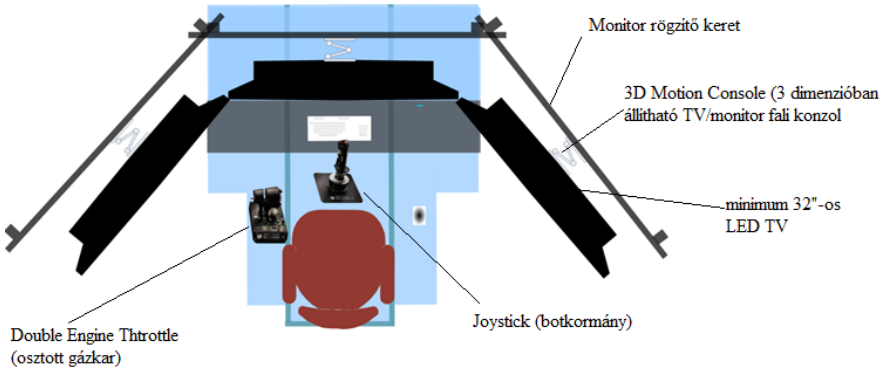
2. ábra Az irányító pozíciók kiépítése

A szoftver lehetővé teszi, hogy a szerver verzión az összes olyan frekvencia, mely a valós légiforgalmi irányításban, vagy a katonai légvédelmi irányításban is használt, külön- külön is fel legyen programozva. Ezen frekvenciák közti váltás a szimulátorba betöltött légijármű saját

[9] LIR: Légi Irányítási Rendszer

rádió berendezés alkalmazásával is lehetséges, a csatornák között áthallás nincs. Az IC pozíció kialakítása igényli a hadműveleti teremben kialakított pozíciók klónozását, azonban ez a bútorzati és berendezési igények alapján csak akkor vet fel extra költséget, ha például az irányításban használt Ground Air Ground (a továbbiakban: GAG) rádió replikájának használata szükséges. Amennyiben a szimulációban elegendő a frekvenciák váltásához egy PC is, úgy a kiépítés extra költséget nem igényel. Az 1. ábra jól mutatja a mikró környezet két teremben elkülönített kialakítási vázlatát. A bal oldali teremben kapnának helyet a légvédelmi irányítók. A munkahelyek kialakítása viszonylag egyszerű.

A hajózó pozíciók kialakítása egy kicsit más filozófiát igényel. Itt is igaz az a felfogás, hogy minél inkább törekszünk a valódi ergonómia eléréséhez, az mindig emeli valamennyire a költséget. A szimulátort alkalmazva pontosan tudom, hogy ha hobbi helyett valódi munkához használom a szoftvert lényeges a valósághű ergonómia. Viszonylag könnyen kivitelezhető egy vonalaiban a valódi pilótafülkét imitáló keretrendszer, mely egy speciálisan kialakított bútorzat. Ezen megfelelően el lehet helyezni az ülést, az oldal paneleket, valamint a megjelenítő eszközkeretet. Az eltérő lábhosszok miatt a pedál állítható, így biztosítva a kényelmes alkalmazását. Az oldal paneleken el lehet helyezni bal oldalt rögzítve a gázkart, a jobb oldalt egy speciális keretben az egeret. A műszerfal helyén kialakítható a billentyűzet hely. Ezt követően a megjelenítő eszközök egy speciális keretre lennének erősítve, ezzel közel 170 fokos látószöget biztosítva.



3. ábra Repülő szimulátor ergonómiai kialakítás

A Oculus Rift[10] alkalmazásával a megjelenítés egy újabb dimenziója válik valóra, hiszen kialakításának köszönhetően képes az agyat teljesen átverni. Nincsenek valódi fizikai vonatkoztatási pontok, mert az eszköz teljesen zárt, a beépített giroszkópok pedig biztosítják, hogy a fej bármely irányba történő mozdítása a virtuális térben megfelelően megtörténjen. A repülőgép vezetők szempontjából ez egy olyan „élmény”, hogy bár fizikailag nem érzékeli a gép mozgását, annak egy részét az agy fogja megtenni. Természetesen a G (túlterhelés) hatása nem lesz fizikailag érezhető, de a vizuális érzékelés segíti a valós repülés közben tapasztalható ingerek átadását. Az ergonómiailag kialakított fülkemásolat fokozza a szimuláció hatásosságát, azonban egyszerűsített változata asztali számítógépekkel kialakított munkahelyekkel is kivitelezhető. A terem berendezése is eltérő lehet, bár véleményem szerint a sugár irányú elrendezés a legcélszerűbb. Ez a berendezési forma biztosítja a munkahelyek könnyű megközelítését anélkül, hogy zavarólag hatna az éppen aktív munkahelyekre, megkönnyíti a pozíciók bekábelezését, és használat közben az

[10] Oculus Rift: VR szemüveg. Giroszkópok biztosítják a fejmozgás átvitelét a virtuálistérbe, így biztosítva, hogy minden irányba kizárja a fizikai valóságot. A beépített megjelenítők a teljes látóteret lefogják.

egyik szimulátor előtt ülő pilóta nem kap közvetlen rálátást a másikra. Ez a vizuális ingerek megfelelő mértékű feldolgozása szempontjából kiemelkedően magas prioritást élvez.

Az irányító szekció a hajózó szekcióval nem közvetlen összeköttetésben van, hanem egy úgynevezett csillag pontos szerver által biztosított közvetett kapcsolatban. A szakmai szempontokat figyelembe véve, azonban szükséges a hadműveleti rendszeren látott légihelyzet kép RAP[11] integrálása a szimulátor MASE konzolra, ez mellett jelenik meg a szimulátorral generált jel. Ez a kialakítás biztosítja, hogy az irányító a szimulált repülőgépet a saját terminálján valós idejű Track[12]- ként lássa, a RAP többi Track- jével együtt, valamint a repülőgépek is szinkronizáltan, csúszás nélkül kapjanak a másikról vizuális megjelenítést. Itt lép a képbe az internet szükségessége. Ugyan mikrokörnyezeti kialakításban nem lenne rá feltétlenül szükség, mert a Virtuális Légteret biztosító szerver zárt hálózaton is képes a kapcsolatok kezelésére, ugyanakkor kizárja a mikró rendszerek összekapcsolásának lehetőségeit. Márpedig ezt a lehetőséget fenn kell tartani, mert a makró környezettel, vagy más mikrokörnyezetekkel csak így alakítható ki a globális rendszer.

Makró szimulációs környezet kialakítása

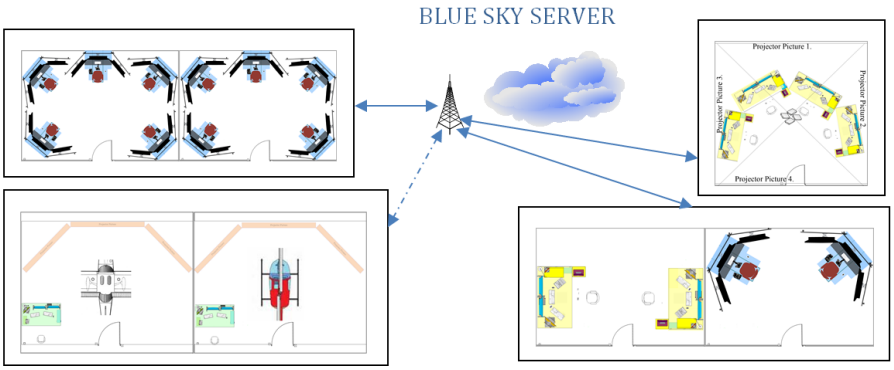
A Mikró környezethez képest, a Makró, több különféle kapcsolatot is lehetővé tesz. Helyszínre levetítve ez Szolnok szempontjából lehet kifejezetten előnyös. Az MH 86. Helikopter Bázis ugyanis más alakulatoknak és oktatási intézményeknek is helyet biztosít, például a Nemzeti Közszolgálati Egyetemnek (a továbbiakban: NKE). Tekintve, hogy a légiforgalmi irányító képzés is itt folyik – sok más speciális képzéssel együtt –, a szolnoki helyszín szerepét különösen kiemeli. A helikopter bázis viszonylag kis létszámú üzemképes helikopterrel rendelkezik, így a hajózó állomány egy főre eső repült óraszáma is kevés. A jártasság és a repülésbiztonság magas szinten tartásához a repülési óraszámok egy meghatározott értéken tartása elengedhetetlen. A szimulátorokkal végrehajtott repülés ugyan nem helyettesíti a valódi repülést, mégis egy bizonyos százalékban helyettesítheti azt. Ennek pontos százalékban meghatározott értéke, nemzetenként eltérő lehet. Azonban a legnagyobb problémát az jelenti, ha a lehetőség sem adott a szimulátor repüléshez. Az MH 86. Helikopter bázisán ki lett építve egy Cessna egymotoros repülőgép és egy Robinson R-22 típusú helikopter szimulátora. A szoftvercserének köszönhetően ez is P3 D alapú. Megfelelő tárgyalások után, több mint valószínű, hogy megszerezhető lenne az engedély a két szimulátor közös virtuális térbe csatolásához. Egy, a helikopter bázis számára kiépített többgépes szimulátor terem kapcsolódhatna szintén a virtuális légtérhez. Ez a teremkialakítás ugyanazt a megvalósítást jelentené, mint a mikró szimulációs környezetnél, eltérést csak a gépek száma jelenthet.

A Makró környezet lényege csak most domborodik ki, ugyanis a bázis szimulátoraival együtt az egyetem szimulációs parkja is beköthetővé válik. Helyileg ugyan egy helyen, de mégis több eltérő alakulat, eltérő rendszerének kapcsolatát jelenti a makró környezet. Az egyetem lehetőségei, illetve szimulációs igényei sem elhanyagolhatóak. A légiforgalmi irányító és repülő hajózó képzésben résztvevő főiskolai, egyetemi hallgatók, a képzésük során igénybe vehetik a számukra optimalizált szimulátorokat és ennek eredményeként a virtuális légtérben, együtt tudnak gyakorolni, tanulni. Irányító és pilóta valós körülmények szimulációjában közvetlenül valós idejű hang és vizuális kapcsolatban állhatnak egymással. Szinte a nap bármely időszakában

[11] RAP: Recognised Air Picture (azonosított légihelyzet kép)
[12] TRACK: Azonosított jel

élő lehet a légtér, így a gyakorlás valósághűbb lehet. Mindez elősegíthető azzal is, ha a képzési tematika időrendben össze van fésülve a szakágak között.

A légiforgalmi irányító hallgatók külön torony szimulátorral is rendelkezhetnek, amelyet ergonómiailag a valódi torony mintájára lehet kialakítani. Egy teremben dolgozhat például gurító és toronyirányító is. Számukra a megjelenítést projektoros vagy nagyméretű LED kivetítés teszi lehetővé, ami 360 fokban is kivitelezhető. Külön terminálokon egyéb műszereket is képesek aktiválni, így a közel körzeti lokátor, és/vagy gurító radar képet is. A képzés részét képezhetné az is, hogy a leendő légvédelmi irányítók, már a főiskolán ismerkedhessenek az alapvető – nem minősített – eljárásokkal, a RAP előállításával, illetve a MASE szoftver környezettel. A végzett irányítók, akik a légiirányító központokba kerülnek, óriási előnnyel indulhatnának a kiképzésük folyamán. Nemcsak alkalmazhatóságuk gyorsulna fel, de lenne tapasztalatuk a szimulált helyzetekkel is. Ez minden esetben hatékonyabb munkavégzést jelent.



4. ábra Makró szimulációs környezet összekapcsolásának elvi vázlat

Globális szimulációs környezet kialakítása

Azt hiszem a mikró és a makró környezet kiépítésének ismeretében már kezd kirajzolódni egy kép, mely a globális rendszer elvét képezi le. Jelen pillanatban is működik egy Virtuális Légtér szerver, mely napi 24 órában kezeli a csatlakozásokat. Ez a légtér a „Blue Sky”. A szimulátor környezet, legyen az makró vagy mikró, szinte az összes frekventált légi bázison létrehozhatók és összekapcsolhatók. Ez minden helyszínen, valamint a Légi Irányító Központokban is szimulált forgalmat generál, mely lehetőséget ad a gyakorlásra, képzésre.



5. ábra Globális szimulációs környezet elvi vázlat (Készítette a szerző)

A Blue Sky használatával, mivel egy repülő klubtagjai használják – természetesen szabályozott körülmények között –, a pilóták és az irányítók civilekkel is találkozhatnak, vagy irányíthatják őket a légtérben. Mindez hozzáteszem nemcsak légből kapott ötlet. Világszerte több ilyen légtér

is üzemel. A kérdés csak az, hogy a Magyar Honvédség lát e potenciát egy ilyen rendszer kihasználásában. Ne hagyjuk, hogy a lehetőség elmenjen mellettünk, használjuk ki azt. Pénzt takaríthat meg vele a minisztérium, illetve a befektetett indulási költség rövid időn belül megtérül és közvetlen kihatással lehet a képzések színvonalára, valamint a repülés biztonságra.

Képzési és felhasználási igények

A repülés biztonság növelése és a hatékonyabb kiképzés érdekében kialakítható globális szimulációs környezet nagyon sok speciális igényt képes kialakítani. Gondolok itt arra, hogy alakulatonként, oktatási intézményenként, repülőterenként más és más igények lehetnek egy adott szimulációs rendszerrel szemben. Az általam tervezett rendszer nem vetélytársa a már meglévő „komoly" szimulátoroknak, sokkal inkább egy olcsóbb, könnyebben üzemeltethetőbb és felhasználhatóbb szinte minden helyszínt és szakágat összekapcsolhatóbb kiegészítője. Az előző bekezdésekben már kifejtettem a mikró, makró, és a globális rendszerelméletet, így most inkább az életszerűbb helyzetekre fókuszálnék.

Tegyük fel, hogy az NKE légiforgalmi Irányító hallgatója, a tanórák után vagy szabadidejében hobbiból vagy érdeklődésből úgy gondolja, hogy szívesen gyakorolná a tanultakat. Rendszer szintű felhasználás esetén, illetve a Blue Sky server használata esetén a légtér nagy valószínűséggel nem lesz üres. Tehát valamilyen virtuális légiforgalom jelentkezik a Virtuális Légtérben. Arról nem is beszélve, ha a hajózó állomány is igénybe veszi a szimulátor adta gyakorlási lehetőségeket, szolgáltatásokat. Tehát egy feltételezett szolnoki üzem esetében a hallgató a torony szimulátorban gyakorolhatja a toronyirányítást. Ugyanez visszahat a szimulátor pilótákra is, akik hasonlóan élő környezetben találnák magukat. A valós idejű audio és vizuális kapcsolat, ezt az élő környezetet szinte 100%-ban lehetővé teszi. Ha a globális rendszer egésze működik, érdeklődésnek vagy valamilyen szabályzásnak köszönhetően akkor a generált légiforgalom kiterjedhet az egész ország, vagy akár az egész világ területére. A pápai repülőbázis tekintetében szintén nem beszélhetünk túlterhelő légiforgalomról. Egy mikró szimulációs környezet itt is hatékonyan ki tudná elégíteni a felmerülő igényeket. Alapvető igényként merülhet fel a tornyos vagy a közel körzeti légiforgalmi irányítók gyakorlási igénye. Mivel a mikrokörnyezet tartalmaz repülőgép vezető szimulátorokat is, szolgálaton kívüli hajózók repülési feladatokat végrehajtva, kellő forgalmat generálnának a gyakorló irányító személyzetnek.

A globális kialakítás kiteljesítheti a rendszert, és szinte minden felmerülő igényre megfelelő megoldást jelenthetne. A hajózó állomány szimulátoros repülési igényeinek kielégítése talán a legnehezebb. Nemcsak a feladatok összetettsége, hanem a repülés során látható, érzékelhető hatások szimulálása miatt is. Azonban, ha megfelelő kompromisszumképes hozzáállással közelítjük meg a lehetőséget, megtalálhatjuk a megoldást szinte az összes felmerülő igényre. Lehetőség nyílik a szimulátor segítségével arra is, hogy egy esetleges külföldi misszió, vagy gyakorlat előre begyakorolható legyen és nagyvonalakban megismerkedjenek a pilóták a környékkel, főbb tereptárgyakkal és a jellegzetes támpontokkal. A szimulátor grafikai teljesítménye elegendő ahhoz, hogy a VFR repülésekben segítsen minket. Gondoljunk csak a BAP[13]-ra. A VFR mellett az IFR eljárásokban is megfelelő alternatíva lehet ez a Globális Szimulációs Rendszer (GSS[14]).

[13] BAP: Balti Air Policeing
[14] GSS: Global Simulation System

A szimulátorok adta lehetőségek kihatása a repülés biztonságra

Amikor felnézünk az égre, a nap bármely időszakában, szinte biztos, hogy legalább egy repülőgépet láthatunk az égbolton. Mit is jelent ez? A megnövekedett légiforgalom, a repülővel szállított utasok döbbenetes száma nem teszi lehetővé, hogy figyelmen kívül hagyjuk a repülésbiztonság folyamatos növelését. Ez csak a hatékonyabb kiképzéssel, szintfenntartással, ellenőrzési rendszerrel és a megfelelő szűréssel érhető el. Mindenki, aki a repülésben közvetlenül részt vesz, közvetlenül ki is hat a repülés biztonságára. A balesetek, nem kívánt légi események mind hatékonyabb kiküszöbölése érdekében szükségesek a szimulátorok alkalmazásai. A szimulátorokkal jól rekonstruálhatók bizonyos katasztrófák, balesetek, veszélyes repülési helyzetek. Ennek egyik kiváló bizonyítéka az az amatőr kisfilm, melyet a z MH LVIK állományából két szakember – Lőkös Tamás, Domján Károly –, valamint a Blue Sky Virtuális Repülő klub egy másik tagja – Viola László - készítettek egy a Németországi Learjet-Eurofighter katasztrófájáról.

2014 nyarán, egy „RENEGADE” eljárás gyakorlása során történt katasztrófa, melyben egy Learjet 35A és egy Eurofighter Typhoon ütközött egymással. A Learjet 35A az észak Németországi Hohn repülőtérről szállt fel, két tapasztalt egykori katonai pilótával a fedélzetén. Nagyjából másfél óra eseménytelen repülés után megkezdték a Renegade gyakorlást. - A „Renegade” 2001.09.11 óta, minden nemzet saját védelmi eljárása, a polgári repülőgépek fegyverként történő felhasználása ellen -. A Nörvenich repülőtérről két Eurofighter vadászrepülőgép szállt fel és elkezdte a vélt eltérített repülőgép elfogását. Sajnálatos apróságoknak tűnő események sorozata, és egy jóadag balszerencse eredményezte a két repülőgép összeütközését. Néhány kép bemutatásával ábrázolom, mire képes a szimulátor szoftver, például egy rekonstrukcióban.



6. ábra A Hohn repülőtérről felszálló Learjet típusú repülőgép



7. ábra A valóságnak is megfelelő pilóta pozícióból szemléltetett realisztikus megjelenítés, mely teljesen megegyező a másodpilóta által látott vizuális környezettel



8. ábra Az elfogásban részt vevő Eurofighter vadászrepülőgépek láthatósága a másodpilóta szemszögéből, mely a kis belátási szög miatt közvetlenül is részese volt a bekövetkező balesetnek



9. ábra közvetlenül az ütközés előtti pillanat és a Learjet lezuhanása

A rekonstrukció érdekében végrehajtott több mint 22 óra szimulátor repülés egyik legmegdöbbentőbb eredménye az volt, hogy mennyire kicsi volt az esély a két repülőgép összeütközésére. Az utolsó pillanatban a személyzet váltott a gép vezetésében, mert a másodpilótának megszűnt a vizuális kapcsolata a követendő vadászrepülőgéppel. Ekkor a gép kapitánya átadja az ölében elhelyezkedő laptopot a másodpilótának - erről a laptopról követték a Renegade eljárását -, majd reflexszerű kormánymozdulatát korrigálva, és az elveszett vizuális kapcsolat visszaállítását megkísérelve, a manőver összeütközéshez vezetett.

Több más légi esemény rekonstruálása ma is folyamatban van, de a szimulátorokkal mind ezek bekövetkezési valószínűsége hatékonyan csökkenthető. A publikációban eddig már többször is megemlített lehetőségek, illetve az imént taglalt rekonstrukciós, illetve tréning lehetőségek közvetlenül is emelik a repülés biztonságát.

A szoftverhez beszerezhető repülőgépek és területi kiegészítők megjelenítésének csak a számítógépek teljesítménye szab határt. Nem ritka ma már, hogy repülőterek vagy bizonyos területek HD[15], FHD[16] vagy akár 4K felbontásban is megjelennek. Ez teljesen fotó realisztikus megjelenést biztosít. A textúrák nagy felbontásának köszönhetően a repülés élménye is magasabb szintre emelkedik. Az amúgy is komoly megjelenítést, virtuális szemüvegekkel még jobban fokozni lehet, így a teljes virtuális kép alapján az agy, egy bizonyos szinten képes még a repülés érzését is leszimulálni.

[15] HD: 1280*720 p felbontás
[16] Full HD (FHD): 1920*1080p felbontás

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Lockhead Martin: Prepar3D, (online) url: http://www.prepar3d.com
[2] BFU: Investigation Report. BFU 1x002-14, Germany, 2014
[3] Domján Károly. Saját jegyzetek, szimulátoron szerzett tapasztalatok
[4] Domján Károly. A Fligt simulator felhasználásának lehetőségei a légiforgalmi irányítás és a repülés oktatásában. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2007/2.
[5] Wikipédia. Magyarország térkép (online) https://hu.wikipedia.org/wiki/Sablon:Magyarorsz%C3%A1g_t%C3%A9rk%C3%A9p#/media/File:Magyarorsz%C3%A1g.png
[6] NASA. Az amerikai űrkutatás története. DVD kiadás 3. Rész (Apollo program 13)

THEORETICAL AND PRACTICAL POSSIBILITIES OF A MICRO AND MACRO SIMULATED ENVIRONMENT IN HUNGARIAN DEFENCE FORCES IN ORDER TO GAINING AND SUSTAIN CAPABILITIES

The aim of this publication is to sum up the possible micro, macro and global simulated environments designated for the Hungarian Defence Forces, its partners and military training facilities. The requirements of the defence forces, especially the Air Force, may be met by utilizing the latest technological improvements. This creates a virtual reality in order to maintain a beneficial and simple solution. As a result the micro simulation can be combined to macro- and later on to global simulated environment utilizing a mutual Virtual Airspace that provides unlimited opportunity for training and exercising.

Keywords: *flight simulator, simulation enviroments, recognised air picture, virtual airspace, simulation training*

Domján Károly
informatikai szakértő
domjan.karoly74@gmail.com
orcid.org/0000-0002- 0349-0338

Károly Domján
IT specialist
domjan.karoly74@gmail.com
orcid.org/0000-0002- 0349-0338

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-27-0375_Domjan_Karoly.pdf