RTK

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM • A HAZA SZOLGÁLATÁBAN •

XXX. évfolyam
2018. 1. 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
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Békési Bertold alezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Palik Mátyás ezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Szilvássy László alezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Dunai Pál alezredes, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Dr. Bottyán Zsolt százados, PhD
Nemzeti Közszolgálati Egyetem/National University of Public Service
Prof. Dr. Makkay Imre ny. ezredes, CSc

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

Varga Béla
Helikopter gázturbinás hajtóművek technikai elemzése 7

Kretz András
A repülőterek zajterhelésének vizsgálata, a környezet zaj elleni védelmének lehetőségei 29

Wantuch Ferenc, Krekk Patrik
Szondázási adatokon alapuló szélnyírás főbb sajátosságai a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren 43

Ondrék József
Nemzetközösségi légi szerepvállalás a malájföldi fel-kelés leverésében 55

Szabó József Zoltán, Dömötör Ferenc
Villanymotorok műszaki állapotának meghatározása motoráram-, és rezgéselemzés segítségével 69

Salavec Péter
Fejlesztések a hullám-előrejelzés terén az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 77

Patartics Bálint, Péni Tamás, Vanek Bálint
Flexibilis szárnyú repülőgép aktív flatter szabályozása 99

Ady László, Terpecz Gábor
Mesterséges Intelligencia alkalmazása az oktatásban 111

Várkonyi Anikó, Kardos Péter
Felhőalap és felhőborítottság rövid távú előrejelzése neurális hálózat segítségével 127

Farkas Márton, Vanek Bálint, Rózsa Szabolcs
Pilóta nélküli repülőgép pozíciójának és orientációjának meghatározása Low-Cost GNSS, inerciális és mágneses szenzorok Tightly Coupled integrációjával 139

Schuster György, Ady László
Biztonságkritikus szoftver fejlesztés 151

Baár Tamás, Bauer Péter
A repülési biztonság növelése levegőhöz képesti sebesség más szenzorokra támaszkodó becslésével 161

Vránics Dávid Ferenc, Palik Mátyás, Bottyán Zsolt
Esettanulmány egy nyílt repüléstámogató rendszer biztonságáról 185

Hadobács Katalin
Risk of Airframe In-Flight Icing and Icing Prediction Algorithms 195

Vas Tímea
Hadműveleti repülőterek általános és speciális forgalmának irányításához szükséges képességek I. 213

Sándor Zsolt
A pilóta nélküli légijármű rendszerek forgalmi menedzsmentjét biztosító megoldások fejlesztési fokozatai 227

Horváth Fruzsina, Pokorádi László
Változók és dimenzióik 237

Annamária Koncz, László Pokorádi, Gyula Szabó
Failure Mode and Effect Analysis and Its Extension Possibilities 247

Rohács József
A repülés és a repülőipar fejlődésének hatása a gazdaságra 255

Estók Sándor
A hálózati rendszerlogisztika interaktív virtuális integrációja 275

SZERZŐK – AUTHORS

Ady László hallgató Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet ady.laszlo@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-6702-6000	László Ady Student Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation ady.laszlo@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-6702-6000
Baár Tamás (MSc) tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium baar.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0003-0036-4114	Tamás Baár (MSc) Research associate Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab baar.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0003-0036-4114
Bauer Péter (PhD) tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium bauer.peter@sztaki.mta.hu orcid.org/ 0000-0002-1925-2270	Péter Bauer (PhD) senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab bauer.peter@sztaki.mta.hu orcid.org/ 0000-0002-1925-2270
Bottyán Zsolt (PhD) tanszékvezető, 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) Head of department, 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
Dömötör Ferenc (PhD) címzetes egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Gépjármű Technológia Tanszék ferenc.domotor@gjt.bme.hu orcid.org/0000-0003-3385-9287	Ferenc Dömötör (PhD) Honorary associate professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Vehicle Engineering and Transport Engineering Department of Automotive Technology ferenc.domotor@gjt.bme.hu orcid.org/0000-0003-3385-9287
Estók Sándor (PhD) ny. alezredes, közgazdász Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola estok.sandor@gmail.com orcid.org/0000-0002-2422-5293	Sándor Estók (PhD) r. Lt.Col, economist Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Sciences estok.sandor@gmail.com orcid.org/0000-0002-2422-5293
Farkas Márton (MSc) Tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium farkas.marton@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-6739-4989	Márton Farkas (MSc) Research associate Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab farkas.marton@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-6739-4989

Hadobács Katalin hadnagy meteorológus főtiszt MH GEOSZ IESZO katalin.hadobacs@gmail.com orcid.org/0000-0003-1200-5098	Lt (OF1) Katalin Hadobács meteorologist officer HDF GEOS katalin.hadobacs@gmail.com orcid.org/0000-0003-1200-5098
Horváth Fruzsina BSc. hallgató Óbudai Egyetem, Műszaki Biztonságtudományi Szakműhely – μβσ hrvt.fruzsina@gmail.com orcid.org/0000-0002-3072-9623	Fruzsina Horváth BSc. Student Óbuda University, Workshop of Technical Safety Sciences – μβσ hrvt.fruzsina@gmail.com orcid.org/0000-0002-3072-9623
Kardos Péter Csoportvezető HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. Repülésmeteorológiai 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
Annamária Koncz (MSc) PhD Student Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Sciences konczannamaria@gmail.com orcid.org/0000-0002-9171-4441	Koncz Annamária (MSc) PhD hallgató Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori iskola konczannamaria@gmail.com orcid.org/0000-0002-9171-4441
Kretz András doktorandusz hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola andras.kretz@gmail.com orcid.org/0000-0002-5096-6298	András Kretz PhD student National University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Military Technical Doctoral School andras.kretz@gmail.com orcid.org/0000-0002-5096-6298
Krekk Patrik egyetemi hallgató Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék krekk.patrik@gmail.com orcid.org/0000-0002-1878-5745	Krekk Patrik Student National University of Debrecen Faculty of Meteorology krekk.patrik@gmail.com orcid.org/0000-0002-1878-5745
Ondrék József Nemzeti Közszolgálati Egyetem Nemzetközi Kapcsolatok Iroda Nemzetközi referens jozsef.ondrek.89@gmail.com orcid.org/0000-0002-1831-5479	Ondrék József National University of Public Service International Relations Office International officer jozsef.ondrek.89@gmail.com orcid.org/0000-0002-1831-5479
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

Patartics Bálint (MSc) Tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium Repülésirányítási és Navigációs Csoport patartics.balint@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1445-9061	Bálint Patartics (MSc) Assistant research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory AeroGNC Research Group patartics.balint@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1445-9061
Péni Tamás (PhD) Tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium Repülésirányítási és Navigációs Csoport peni.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1440-4263	Tamás Péni (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory AeroGNC Research Group peni.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1440-4263
Pokorádi László (CSc) egyetemi tanár Óbudai Egyetem, Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-2857-1887	László Pokorádi (CSc) Full professor Óbuda University, Institute of Mechatronics and Vehicle Engineering pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-2857-1887
Dr. Rohács József (PhD) egyetemi tanár Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék jrohacs@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-4607-9063	Dr. Jozsef Rohacs (PhD) professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles jrohacs@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-4607-9063
Rózsa Szabolcs (PhD) Egyetemi docens, Tanszékvezető Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék rozsa.szabolcs@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-5335-6455	Szabolcs Rózsa (PhD) Associate Professor, Head of Department Budapest University of Technology and Economics Faculty of Civil Engineering Department of Geodesy and Surveying rozsa.szabolcs@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-5335-6455
Sándor Zsolt (PhD.) okleveles közlekedésmérnök, közlekedési szakértő zsolt.sandor1@gmail.com orcid.org/0000-0001-7117-9069	Zsolt Sándor (PhD.) certified traffic engineer, traffic specialist zsolt.sandor1@gmail.com orcid.org/0000-0001-7117-9069
Dr. Schuster György (PhD) Egyetemi docens, főiskolai tanár Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670	György Schuster (PhD) College professor Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670

Gyula Szabó Associate professor Óbuda University, Institute of Mechanical Engineering and Safety Sciences szabo.gyula@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-3963-2916	Dr. Szabó Gyula egyetemi docens Óbudai Egyetem, Gépészeti és Biztonságtudományi Intézet szabo.gyula@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-3963-2916
Szabó József Zoltán (PhD) egyetemi docens Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825	József Zoltán Szabó (PhD) Associate professor, Dy leader of Institute Óbuda University Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Institute of Mechatronics and Automotive Technology szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825
Terpecz Gábor mérnöktanár Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet terpecz.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837	Gábor Terpecz Engineer Teacher Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation terpecz.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837
Vanek Bálint (PhD) Tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium Repülésirányítási és Navigációs Csoport vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725	Bálint Vanek (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory AeroGNC Research Group vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725
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
Várkonyi Anikó (MSc) Hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Meteorológiai Tanszék kisaaa93@gmail.com orcid.org/0000-0003-4319-2375	Várkonyi Anikó (MSc) Student Eötvös Loránd University Faculty of Science Department of Meteorology kisaaa93@gmail.com orcid.org/0000-0003-4319-2375

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	Tímea Vas 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
Vránics Dávid Ferenc (MSc) doktoranduszhallgató, informatikus Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola 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 vranicsd@gmail.com orcid.org/0000-0003-0637-476X
Dr. Wantuch Ferenc (PhD) meteorológus Nemzeti Fejlesztési Minisztérium Közlekedési Hatósági Ügyekért Felelős Helyettes Államtitkárság Légiforgalmi és Repülőtéri Hatósági Főosztály wantuch.ferenc@nfm.gov.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527	Dr. Wantuch Ferenc (PhD) meteorologist Ministry of National Development Deputy State Secretariat for Transport wantuch.ferenc@nfm.gov.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527

Varga Béla

HELIKOPTER GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK TECHNIKAI ELEMZÉSE

A helikopterek erőforrásainak jelentős fejlődése, ami főképpen a hajtómű teljesítmény–tömegviszony, a hatásfok és fajlagos-tüzelőanyag fogyasztás, valamint megbízhatóság, és üzemeltethetőségben jelenik meg, természetesen kihatással volt a helikopterek harcászati technikai jellemzőire. Ezek a tények kutatásra érdemessé teszi ezt a területet. A cikkben végig követem a helikopter hajtóművek időbeni fejlődési folyamatát. Ismertetem működésük jellegzetességeit, a legfontosabb gyártókat és gyártmányokat. Statisztikai kimutatásokon keresztül szemléltetem, hogy milyen teljesítmény paraméterekkel rendelkeztek a múltban és rendelkeznek a jelenleg alkalmazott helikopter hajtóművek.

Kulcsszavak: *Helikopter gázturbinás hajtóművek, turboshaft, tengelyteljesítmény, fajlagos tüzelőanyag fogyasztás, termikus hatásfok, fajlagos hasznos munka.*

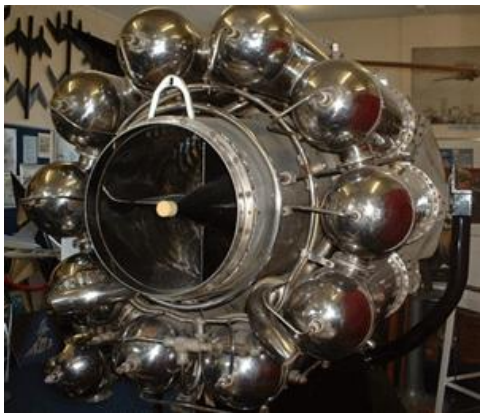
A GÁZTURBINÁS KORSZAK KEZDETE

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 elérte egy átlagos vadászrepülőgép esetében a 12 km-t, speciális felderítő változatok esetében pedig a 14–15 km-t. Jól példázza ezt a folyamatot a II. világháború egyik legismertebb és talán legtöbb fejlesztési fázison átesett vadászrepülőgépe, a Messerschmitt Bf 109. Az 1. táblázatban táblázatban a teljesség igénye nélkül felsoroltam néhány fő változatát ennek a repülőgépnek, szemléltetve, hogy az egyre nagyobb teljesítményű motorok nem hoztak átütő eredményt a repülőgépek sebesség növekedése szempontjából.

Típus változat	Év	Motor	Teljesítmény (Le)	Sebesség (km/h)
Bf 109B	1937	Jumo 210	720	466
Bf 109D	1938	DB 600	960	514
Bf 109E	1939	DB 601A	1175	569
Bf 109F	1941	DB 601N	1200	614
Bf 109G	1942	DB 605	1475	643
Bf 109K	1944	DB 605D	2000 (metanol befecsk.)	724

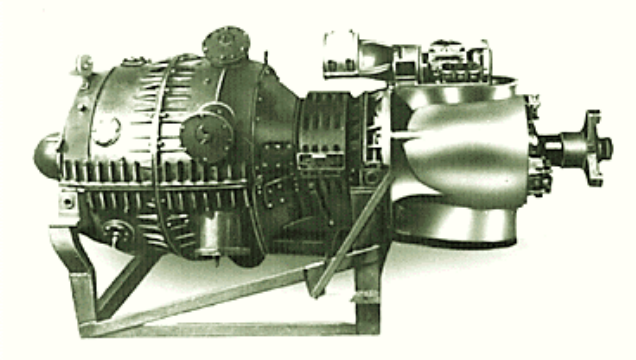
1. táblázat Bf 109 teljesítmény adatai [1]

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. Aerodinamikai összefüggéseket felhasználva könnyen kimutatható, hogy a szükséges teljesítmény és a sebesség között köbös összefüggés van, nem beszélve a többlet fegyverzet tömegnövelő hatásáról, ami szintén többlet teljesítményt igényel. 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 [2]

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



2. ábra Jedrassik tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinája [3]

Ne feledkezzünk meg azonban a magyar Jedrassik Györgyről. Jendrassik már a Ganz-gyár jeles, nagy tekintélyű mérnöke volt, amikor elkezdett a gázturbina-fejlesztéssel foglalkozni. Az első ilyen tárgyú szabadalma 1929. március 12-én datálódott. 1938-ban elkészült közel 75 kW-s teljesítményű gépe volt a legelső gyakorlatban megvalósított gázturbina ilyen kis méretben (2 ábra). Eredményei méltán keltettek feltűnést. A gép 16400 f/min fordulatszámon és 72,5 kW teljesítménynél 21,2% effektív hatásfokot ért el. A turbina előtti maximális gázhőmérséklet 475 °C, kompresszorának nyomásviszonya 2,2 volt. Ilyen alacsony turbina előtti gázhőmérséklettel, illetve ilyen kisméretű géppel mind a mai napig nem értek el ilyen jó hatásfokot. A jó hatásfokot hőcserélő[1] alkalmazása segítette elő. Újszerű volt mind az axiális kompresszor, mind a turbina: mindkettő enyhén ívelt lapátokkal, feles forgással (50% reakciófok)[2]. A kompresszor fokozati hatásfoka 85%, a turbináé 88% volt [3]. Ez a gázturbinás hajtómű tekinthető egyben a címben szereplő tengelyteljesítmény adó gázturbinák ősének is.

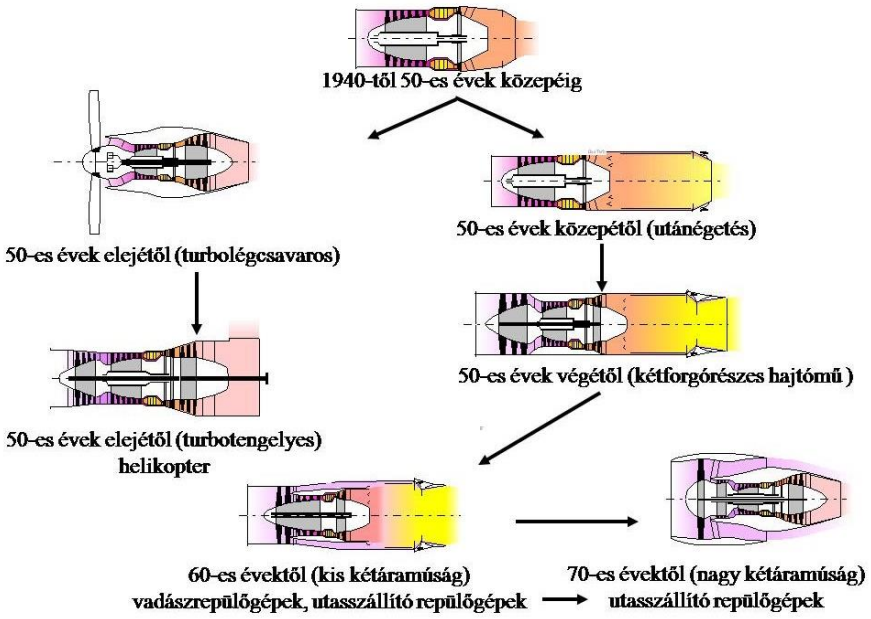
[1] Hőcserélős gázturbina: a munkát végzett magas hőmérsékletű munkaközeg veszteséghőjének egy része hőcserélőn keresztül a kompresszor és az égőtér között visszakerül a folyamatba.

[2] Feles forgás (50%-os reakciófok): a kompresszor fokozatban létrejövő entalpia növekedés 50-50%-ban oszlik meg a forgó és az állórész között.

A 40-es években megjelentek a repülőgépekben 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 GÁZTURBINÁK SPECIALIZÁLÓDÁSA

Az első gyakorlatban alkalmazott gázturbinás hajtóművek estében a tolóerő létrehozásának eszköze a hajtómű utolsó részegysége, az ún. fúvócső volt. Ezzel meg is született a gázturbinás hajtóművek első kategóriája, nevezetesen az egyáramú gázturbinás sugárhajtómű. Hamarosan azonban megindult a további specializálódásuk és három újabb jól elkülöníthető kategória jelent meg. Ezek a turbolégcsavaros hajtóművek (légcsavaros gázturbina), kétáramú sugárhajtóművek és a tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinás hajtóművek. Ezek angol terminológia szerinti elnevezése rendkívül rövid és tömör, nevezetesen az előbbi sorrend szerint turbojet, turboprop, turbofan és turboshaft hajtóművek. A 3. ábrán, fentről jobbra lefelé három, bár némileg modifikálódott, de egyáramú gázturbinás sugárhajtóművet látunk (turbojet). Az alsó kettő kétáramú gázturbinás sugárhajtómű (turbofan), amelyek között a különbséget a kétáramúsági fokuk[3] jelenti. A baloldali kis kétáramásági fokú gázturbinás hajtóművek manapság a harcászati repülőgépek, illetve kiképző-könnyű harcászati repülőgépek jellemző hajtóművei. A jobboldali nagy kétáramúsági fokú hajtóműveket az utasszállító repülőgépeknél alkalmazzák. Mindazonáltal az ábra egyfajta evolúciós folyamatot is jelent, amelynek során az utasszállító repülőgépek eljutottak az egyáramú sugárhajtóművektől a nagy kétáramúsági fokú (6-10) hajtóművekig, jelentősen előrelépve ezzel fajlagos tüzelőanyag fogyasztásuk csökkentésében.

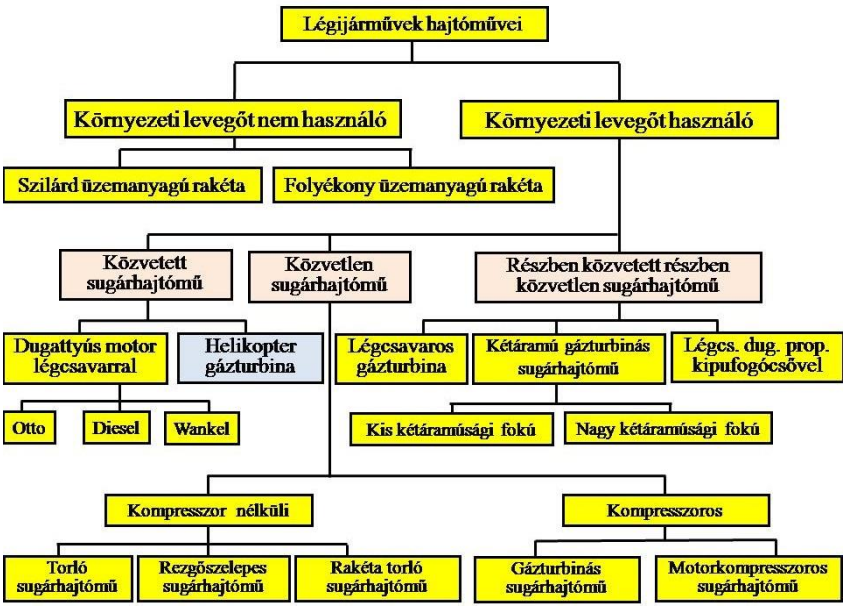


3. ábra Gázturbinás hajtóművek evolúciója

[3] Kétáramúsági fok: kétáramú sugárhajtóművek esetében a külső és belső tömegáramok viszonya [-].

A baloldalon felső turbolégcsavaros gázturbinás hajtóművek (turboprop) a katonai szállítórepülőgépek és a kis hatótávolságú, jellemzően kis és közepesméretű polgári utasszállító repülőgépek hajtóművei. Ez alatt egy tengelyteljesítmény adó gázturbina „(turbo)tengelyes" következik. A magyar szaknyelvben ennek a hajtómű kategóriának a megnevezésénél van a legnagyobb bizonytalanság. Talán ma nincs is erre a magyar terminológiában olyan jellemző megnevezés, mint az angol „turboshaft engine", vagy az orosz „турбовальный двигатель". A 3. ábrán látható „(turbo)tengelyes gázturbina" elnevezés lehet vitatható, bár az előző „turbolégcsavaros hajtómű", „turboprop engine" és „турбовинтовый двигатель" elnevezések analógiájára akár elfogadható is lehet.

A vonó(toló)erő képzés szempontjából is osztályozhatóak a légijárművek hajtóművei, amit a 4. ábrán láthatunk. Természetesen a gázturbinák szerkezeti sajátosságai meghatározzák, hogy ebben az osztályozásban hol a helyük. Itt azt kell figyelembe vennünk, hogy valamennyi propulziós elven működő légijármű hajtómű két alapvető részegységre bontható, úgymint erőgép és munkagép. Az erőgép tulajdonképpen egy hőerőgépet jelent, amely a jól ismert klasszikus körfolyamatokat, Ottó, Diesel, Humphrey (Brayton), valósítja meg. A munkagép a hajtómű azon szerkezeti egysége, amely a toló(vonó)erő létrehozását biztosítja, nevezetesen légcsavar, forgószárny, fúvócső, fan fokozat, vagy ezek kombinációja. Ez praktikusan a propulziós rendszereknél azt jelenti, hogy valamilyen közeget a rendszer felgyorsít, a felgyorsításhoz szükséges erő reakcióereje Newton III. törvénye alapján biztosítja a toló(vonó)erőt.



4. ábra Légijárművek hajtóműveinek felosztása

Ilyen szempontból a légijárművek hajtóművei három kategóriába sorolhatók, lásd a 4. ábra kiemelt sorát.

- közvetett sugárhajtóművek: a felgyorsított közeg ebben a környező levegő;
- közvetlen sugárhajtóművek: a felgyorsított közeg a hőerőgép munkaközege;
- részben közvetett, részben közvetlen sugárhajtóművek: a felgyorsított közeg részben a környező levegő, részben a hőerőgép munkaközege.

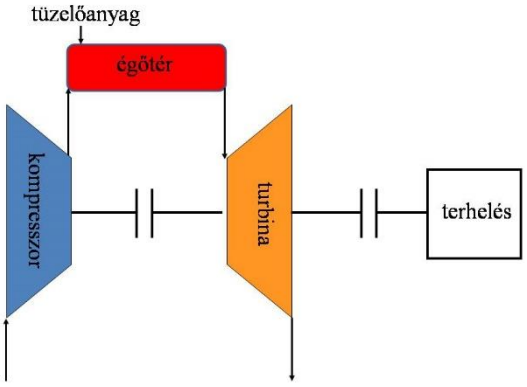
Láthatóan mind a három fenti kategóriában megjelentek a gázturbinás hajtóművek.

TENGELYTELJESÍTMÉNYT ADÓ GÁZTURBINÁK MEGJELENÉSE

Már 1943-ben felmerült a tengelyteljesítményt adó gázturbinák alkalmazásának a lehetősége Németországban az új fejlesztésű páncélozott járművekben, elsősorban harckocsikban. Több egymáshoz többé-kevésbé kapcsolódó hajtómű tervezése és építése 1943 közepétől 1945 elejéig tartott. A tervezett típusok a GT 101-től GT 103-ig jelzést kapták, és Adolf Müller nevéhez kapcsolódtak. A felvetést az indokolta, hogy a tengelyteljesítményt adó gázturbinák teljesítmény tömeg mutatója sokkal jobb volt, mint a hasonló teljesítményű belsőégésű motoroké. Persze voltak hátrányai is a tervnek. Ezek közül a legjelentősebb a várható rossz hatásfok, amit az akkoriban jellemzően kb. 3-as nyomásviszonyú[4] kompresszorok már eredendően meghatároztak, súlyosbítva azzal, hogy a maximálisnál alacsonyabb üzemmódokon ez a gyenge hatásfok még tovább romlott. Ez természetesen magas tüzelőanyag fogyasztással párosult. Ezt némileg ellensúlyozta, hogy a gázturbinákban alkalmazott alacsonyabb minőségű kerozinból több állt rendelkezésre, mint benzinből a háború végén már súlyos üzemanyag gondokkal küzdő Németországban.

A másik jellemző probléma abból adódott, hogy a gázturbinák jellemzően magas fordulatszám tartományban dolgoznak. Kis fordulatszám esetén a nyomatékuk alacsony. Fenntartani egy viszonylag szűk magas fordulatszám tartományt és megfelelő nyomatékot biztosítani a jármű részére csak egy bonyolult közlőmű és tengelykapcsoló rendszerrel lehetséges. A szabadturbinás megoldás már az első tervekben felmerült, azonban a terhelés megszűnte után a szabadturbina túlpörgése kezelhetetlen volt.

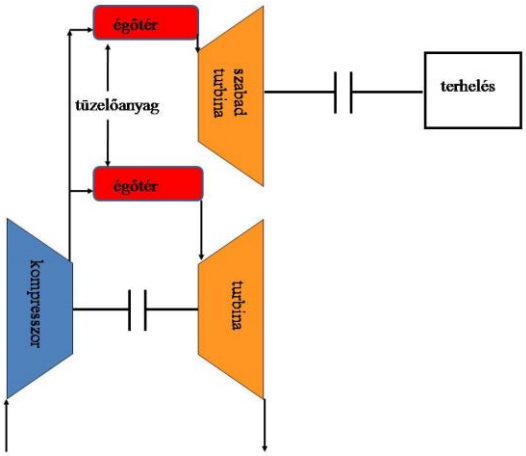
Megoldásként felmerült, hogy a gázturbina egy generátor segítségével villanymotoron keresztül biztosítsa a szükséges tengelyteljesítményt. Később ezt is elvetették és a GT 101 (5. ábra) egy BMW 003-as repülőgép gázturbina modifikált változata lett. Legfontosabb változás, hogy a turbina fokozatok számát háromra növelték, de a plusz fokozatok a gázgenerátor egység[5] tengelyére adtak többlet teljesítményt. Habár gondot okozott az új erőforrás elhelyezése, a szolgáltatott 857 kW a 450 kg tömeg mellett imponáló volt a Maybach HL230 P30 erőforrások 462 kW-s és 1200 kg-os tömegével összehasonlítva. További előnyt jelentett, hogy az egyesített forgórész lendkerékként működve javította a jármű terepjáró képességét terepakadályoknál.



5. ábra A GT 101 szabadturbina nélküli gázturbina elvi vázlata

[4] Kompresszor nyomásviszony: a kompresszor kilépő és belépő keresztmetszetében mérhető nyomások viszonyszáma.
[5] Gázgenerátor egység: a gázturbinás hajtómű magja (kompresszor, égőtér, kompresszorturbina egysége).

A GT 102-es hajtómű (6. ábra) esetében teljesen más koncepciót követtek. A kétfokozatú szabadturbina itt teljesen szeparált volt a gázgenerátor egységtől. Érdekes módon saját égőtérrel rendelkezett, amelynek a levegő ellátását a gázgenerátor egység kompresszorának megcsapolásával (a teljes levegőszállításnak 30%-a) biztosították. A szabadturbina terheletlen állapotban való túlpörgését a levegőáram szabadba történő elengedésével oldották meg.



6. ábra A GT 102 gázturbina elvi vázlata

A GT 103-as típusjelzésű hajtómű tulajdonképpen a GT 102-es hajtómű hőcserélős[6] változatát jelentette. Az elgondolás logikus volt, mivel ezen a hajtóművek kompresszorai nagyon alacsony nyomásviszonnyal, következésképpen alacsony kompresszor utáni hőmérséklettel rendelkeztek. A környezetbe távozó égéstermékek hőmérséklete ennél jóval magasabb volt [4].

Habár a fent felsorolt erőforrások alkalmassá váltak a harcjárművekbe való beépítésre és erre meg is történtek az előkészületek, a hadihelyzet folyamatos romlása lehetetlenné tette a sorozatgyártás beindítását.

TENGELYTELJESÍTMÉNYT ADÓ GÁZTURBINÁK MEGJELENÉSE A REPÜLÉSBEN

A 40-es 50-es évek fordulóján a „turboshaft" hajtóművek is megjelentek a repülésben. Először kis teljesítményű, ún. segédhajtóművek készültek ebben a kategóriában (angol kifejezéssel Auxiliary Power Unit, vagy rövidítve APU), amelyeknek a feladata a repülőgépek fő hajtóműveinek indítása, a fedélzeti elektromos energiarendszer táplálása, a légkondicionáló rendszer levegővel való ellátása.

Az ötvenes évek második felében a helikopterek nagykorúvá válásával, amikor a helikopterek esetében is szorítóvá vált a viszonylag kis teljesítményű és nehéz dugattyús motorok leváltása, a helikopterek és a „turboshaft" hajtóművek gyorsan egymásra találtak. Ez alól csak a könnyű helikopterek egyes típusai (pl. Robinson) kivételek, ahol megmaradtak a dugattyús motornál. A helikopterekben alkalmazott gázturbináknak az első példánya 1950-ben a 7. ábrán látható Turbomeca Artouste hajtómű volt, amely eredetileg segédhajtóműnek készült.

[6] Hőcserélős gázturbina: a turbina utáni forró gáz (veszteség)hője hőcserélőn keresztül visszavezetésre kerül a folyamatba a kompresszor és az égőtér között csökkentve a szükséges tüzelőanyag mennyiségét.

7. ábra Turbomeca Artouste, az első helikopterben alkalmazott tengelyes gázturbina [5]

A hajtómű 210 kW tengelyteljesítményre volt képes és számos helikopterbe került beépítésre, úgymint Aérospatiale Alouette II, Aérospatiale Alouette III, Aerospatiale Lama, Aerotécnica AC-14, Atlas XH-1 Alpha, IAR 317, valamint repülőgépekbe, mint Handley Page Victor, Hawker Siddeley Trident, Vickers VC10 segédhajtóműként [5].

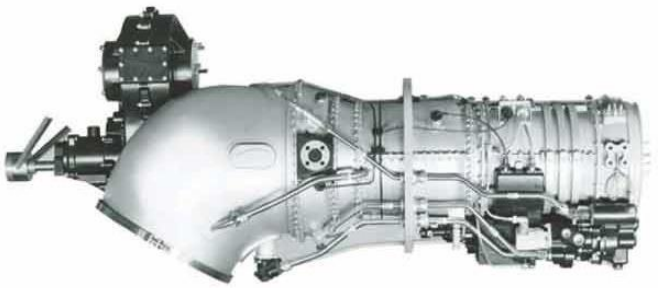
Természetesen a többi nagyhatalom sem várakozott tétlenül és megindultak a fejlesztések. Az Egyesült Államokban Anselm Franz, a Jumo 004 hajtómű megalkotója vezetésével a Lycoming kezdett a Légierő megrendelése alapján egy 373–522 kW közötti légcsavaros gázturbinás hajtómű megépítésébe. Ebből a projektből származott azután a T53 és a T55-ös tengelyes gázturbinás hajtómű család. A T53 olyan helikopterekbe, illetve repülőgépekbe lett beépítve, mint a Bell UH-1 Iroquois és AH-1 Huey Cobra, illetve a Grumman OV-1 Mohawk repülőgép [7].

Megjegyzendő, hogy turbolégcsavaros (turboprop) és a helikopter gázturbinás hajtóművek (turboshaft) között jelentős a szerkezeti hasonlóság. Több gyártónál egy adott típusnak van „turboprop" és „turboshaft" változatai. Két alapvető különbség mégis van a két kategória között. Az egyik az, hogy a légcsavaros gázturbinák esetében általában (kivéve a kisteljesítményű gyakorló repülőgépekbe, pl. a gáz energiájának egy kis része a fúvócsőben hasznosul, biztosítva ezzel a toló(vonó)erő 10-15%-át. A fúvócső helyett egy további turbinafokozat beépítése, vagy a turbina modifikációjával elérhető, hogy a munkaközeg energiájának ez a fennmaradó része is tengelyteljesítményként hasznosuljon. A másik különbség, hogy a légcsavaros gázturbina esetében a légcsavar és a közlőmű szerkezetileg a hajtómű részét képezi, és a légcsavaron keletkező vonóerő a hajtóművön, illetve annak bekötésein adódik át a sárkányszerkezetre. Helikopter gázturbinás hajtóművek esetében a közlőmű szerkezetileg a sárkányhoz kapcsolódik és a vonóerő ezen keresztül nem a hajtóműre, hanem közvetlenül a sárkányra adódik át.

Az 50-es évek elején a General Electric is kapott egy 3 millió dolláros szerződést az Egyesült Államok kormányától egy új, könnyű és megbízható helikoptereken alkalmazható, tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinás hajtómű kifejlesztésére. A titkos program XT-58 elnevezéssel indult és a végeredmény egy 596 kW tengelyteljesítményű gázturbina (8. ábra) lett, amely mindössze 181 kg-ot nyomott.

Tovább fejlesztve ezt a hajtóművet 1957-re a teljesítménye 783 kW-ra növekedett, tömege pedig 114 kg-ra csökkent. Ebben az évben két T58 hajtóművel helyettesítették egy Sikorsky HSS-1F helikopter dugattyús erőforrását és ezzel először emelkedett levegőbe az USA-ban gázturbinás helikopter. Felismerve az új fejlesztés gyakorlati jelentőségét egy sor helikopter-gyártó

(Sikorsky, Kaman) kezdte el alkalmazni az újonnan kifejlesztett T58 gázturbinát a helikoptereikben [9].



8. ábra Az XT-58-as, mely kialakításában a mai hajtóműveket idézi [9]

A szovjet második generációs helikopterek első példánya 1957-ben jelent meg. Ez a MI-6 nehéz szállító és csapatszállító helikopter volt. Az 50-es évek második felében Mikhail Leontyevich Mil, a Mil tervezőiroda vezetője elhatározta egy forradalmian új helikopter tervezését a közepes szállító kategóriában az akkorra már elavuló MI-4-es helikopterek leváltására.

1958. február 20-án a Szovjetunió Minisztertanácsa elfogadta ezt a javaslatot és elrendelte egy 1,5-2 tonna hasznos teher szállítására alkalmas helikopter kifejlesztését V-8 típusjelzéssel, amelynek az erőforrását egy darab Ivchenko AI-24V helikopteren történő alkalmazáshoz igazított turbólégcsavaros hajtómű biztosította. Az egy-hajtóműves V-8 helikopter először 1961. június 24-én emelkedett levegőbe. Felismerve az AI-24V hajtómű hátrányait, az Izotov Hajtóműtervező Iroda utasítást kapott, egy, valóban helikopteres alkalmazásra optimalizált hajtómű kifejlesztésére. A TV-2VM és a D-25V hajtóműveket, amelyeket a MI-6-os esetében alkalmaztak, eredetileg merevszárnyú repülőgépek számára tervezték. Az Izotov Iroda által tervezett új TV2-117A hajtómű (9. ábra) és a VR-8 reduktor 1962 nyarán került leszállításra. A hajtómű felszálló üzemmódon 1118 kW) teljesítményt produkált, viszonylag jó fajlagos mutatók mellett [10].

9. ábra Izotov TV2-117A, az első szovjet, helikopterbe tervezett hajtómű (saját kép)

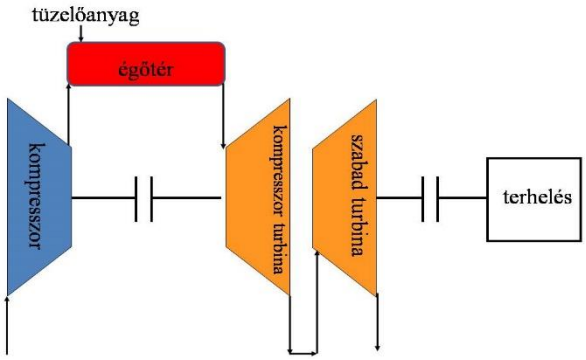
A TV3-117 hajtómű család lett a következő generációs szovjet helikopterek erőforrása. Kialakításában hasonlít a TV2-117A hajtómű szerkezetére, eltekintve a két további kompresszor fokozattól, ami nagyobb kompresszor nyomásviszonyt biztosít, illetve a TV3-117 hajtómű tömegárama[7] némileg magasabb. Ezek a hajtóművek alkalmazásra kerültek majdnem az összes orosz közepes szállító és harci helikopterben: Mi-SMT, Mi-17, Mi-14, Mi-24, Mi-25, Mi-35, Mi-28, Ka-27, Ka-28, Ka-29, Ka-31, Ka-32, Ka-50 és Ka-52, bizonyítva megbízhatóságukat [6].

[7] Gázturbinás hajtómű tömegárama: a hajtómű időegységre vonatkoztatott levegő fogyasztása [kg/s]

Természetesen ezt a területet rövidesen a legtöbb hajtóműgyártó megcélozta és manapság 10-12 gyártó uralja a piacnak ezt a szegmensét. Típusaiknak, illetve ezek modifikációinak száma szinte megszámlálhatatlan. ezek megtalálhatóak a [7] szakirodalomban (1. mellékletként is csatolva), ahol a legfontosabb gyártókat, termékeiket és ezek legfontosabb paramétereit követhetjük nyomon.

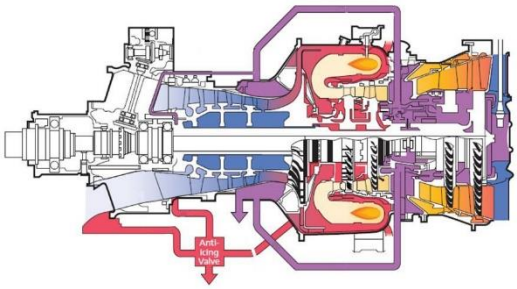
Erre az időszakra kialakult ennek a gázturbina kategóriának a ma is alkalmazott klasszikus elrendezése (10. ábra), amely leginkább a szabadturbina alkalmazásában nyilvánult meg. Az úgynevezett gázgenerátor egység (kompresszor, égőtér, kompresszor turbina) nincs mechanikai kapcsolatban a szabadturbinával, ami lehetővé teszi, hogy a forgószárny fordulatszáma független legyen a gázgenerátor egység fordulatszámától. Ennek megfelelően a szabadturbina csak gázdinamikai kapcsolatban van a gázgenerátor egységgel, vagyis a kompresszor turbinán munkát végző közeg maradék energiája a szabadturbinában hasznosul, biztosítva a szükséges tengelyteljesítményt.

Habár az elv nem változott az 50-es évek óta, a helikopter hajtóművek jelentős fejlődésen mentek keresztül. Az elrendezés annyiban változott, hogy gyakorivá vált a fordított áramú égőtér[8], a turbina fokozatok egy része bekerült az égőtérház alkotta gyűrűbe. Sok esetben front kihajtást alkalmaznak, úgy, hogy az első fordulatszám csökkentő fokozat a hajtómű részét képezi. Ennek hatására a hajtóművek kompaktabbá váltak, tömegük csökkent. Fajlagos mutatóik és termikus hatásfokuk javultak annak ellenére, hogy az előző szerkezeti változtatások sokszor inkább negatív hatással voltak a termikus hatásfokra.



10. ábra A „turboshaftok” ma is alkalmazott kialakításának elvi vázlata

A 11. ábrán látható RTM 322 hajtómű-vázlaton jól szemléltethetőek ezek a szerkezeti jellegzetességek. A kompresszor 3-5 axiális fokozatát egy ugyanazon tengelyre szerelt centrifugál kompresszor fokozat követi. A centrifugál fokozat alkalmazásának oka, hogy kivált 4–5 axiális fokozatot.

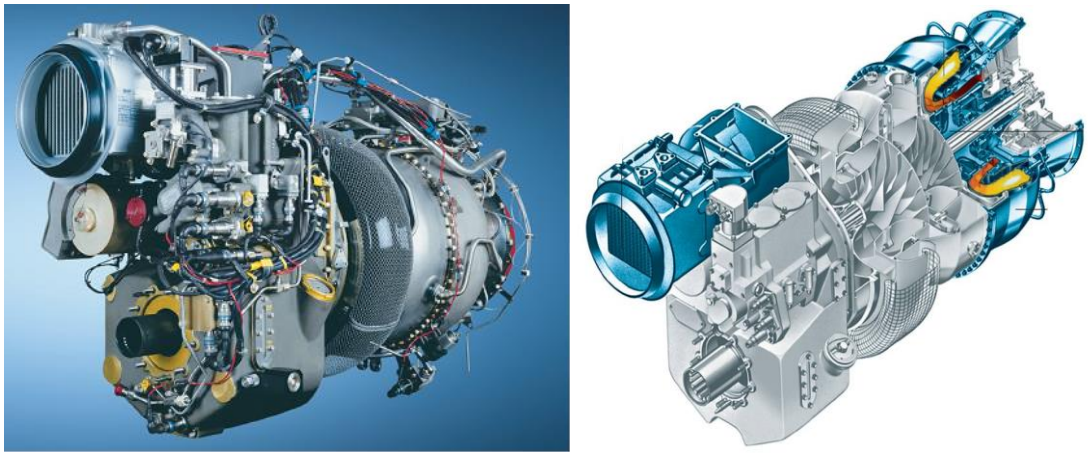


11. ábra Az RTM 322 hajtómű szerkezeti vázlata [11]

[8] Fordított áramú égőtér: az égőtérben az áramlás a hajtómű fő áramlási irányához képest fordított.

Ez egyrészt csökkenti a hajtómű hosszát, másrészt, a centrifugális kompresszoroknak ugyan általában rosszabb a politrópikus hatásfoka, mint az axiális kompresszoroknak, de a kis levegőszállítás miatt az utolsó fokozatok alacsony lapátmagassága axiális kompresszor esetében még a centrifugál kompresszornál is rosszabb politrópikus hatásfokot produkálna. A fordított áramú égőtér szintén csökkenti a hajtómű hosszát, habár ez némileg növeli az égőtérben bekövetkező nyomásveszteséget. A turbinalapátok az első fokozatokban hűtöttek, bár a turbina előtti gázhőmérséklet alacsonyabb, mint általában a többi gázturbina kategória esetében. A szabadturbina-lapátok általában nem, vagy csak minimálisan hűtöttek. A gázelvezető rendszer csak a munkát végzett gáz szabadba vezetésére szolgál.

A 12. ábra is egy korszerű helikopter hajtóművet ábrázol, amely az MTR konzorcium terméke és párosan beépítve az Eurocopter Tiger erőforrását biztosítja.



12. ábra MTR 390 hajtómű az Eurocopter Tiger erőforrása [12]

Ami az előző elrendezéshez képest újdonság, hogy itt az első axiális fokozatokat is felcserélték egy centrifugális fokozatra. Ez rövidebb és kompaktabb elrendezést biztosít, csökkenti a pompázs[9] hajlamot és kis levegőfogyasztás mellett is elfogadható kompresszor és turbina hatásfokot eredményez. A 2. táblázat szemlélteti a hajtómű két változatának teljesítmény, tömeg és méret adatait.

MTR 390-es hajtómű változatok Beépítés előtt, NEL[10] H=0 m	MTR 390-2C	MTR 390E
Felszálló teljesítmény [kW]	958	1094
Vész teljesítmény (30s) [kW]	1160	1322
Maximális folyamatos teljesítmény [kW]	873	1000
Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás (felszálló) [kg/kWh]	0,284	<0,299
Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás (max. foly.) [kg/kWh]	0,280	<0,293
Levegőfogyasztás (felszálló) [kg/s]	3,2	3,6
Kompresszor nyomásviszony (felszálló)	13	14
Szabadturbina tengely fordulatszám 1/perc	8320	8320
Hossz [mm]	1078	1078
Szélesség [mm]	442	442
Magasság [mm]	682	682
Tömeg [kg]	169	<179

2. táblázat Az MTR 390 hajtómű két változatának adatai [12]

[9] Kompresszor pompázs: a kompresszor fokozatokban sebességi háromszögek torzulásából adódó leválási jelenségek.
[10] NEL: Nemzetközi Egyezményes Légkör

Ami az előző elrendezéshez képest újdonság, hogy itt az első axiális fokozatokat is felcserélték egy centrifugális fokozatra. Ez rövidebb és kompaktabb elrendezést biztosít, csökkenti a pompázs[11] hajlamot és kis levegőfogyasztás mellett is elfogadható kompresszor és turbina hatásfokot eredményez. A 2. táblázat szemlélteti a hajtómű két változatának teljesítmény, tömeg és méret adatait.

HELIKOPTER HAJTÓMŰVEK STATISZTIKAI ELEMZÉSE

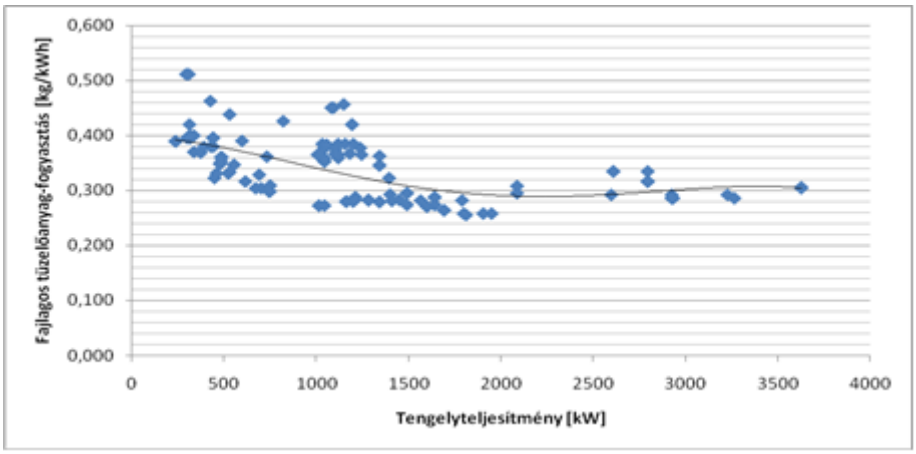
A [7] szakirodalomban (1. mellékletként is csatolva) korántsem teljes, de nagyszámú (145) helikopter hajtómű felsorolását láthatjuk. A táblázatokban szerepelnek a legfontosabb gyártók, a gyártmány, helikopter típusok az adott hajtóművel, felszálló teljesítmény, maximális folyamatos teljesítmény fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás (termikus hatásfok) és hajtómű tömeg adatok.

Amikor a kategória fejlődéséről esik szó, természetesen sok tényezőt kell figyelembe vennünk. Ilyenek a hatásfok és fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás, a fajlagos hasznos munka (tengelyteljesítmény és hajtómű tömegáramának viszonyszáma), fajlagos teljesítmény (tengelyteljesítmény és hajtómű tömegének viszonyszáma), megbízhatóság, üzemeltethetőség, amelyek természetesen kihatással vannak a helikopterek harcászati-technikai jellemzőire.

A 13–16. ábrákon az 1. melléklet statisztikai feldolgozásából kapott diagramokat látjuk, ahol Excel függvénykezelővel a teljesítmény függvényében ábrázoltam a különböző hajtómű jellemzőket. Ami első látásra szembetűnő (13. ábra), hogy teljesítmény szempontjából a helikopter hajtóművek három jól elkülöníthető kategóriára oszthatók fel, amelyek között jól érzékelhető szakadás van. A legkisebb teljesítmény kategória 200–800 kW-os felszálló teljesítményt biztosít. A közepes teljesítmény kategóriába 1000–2200 kW-ot szolgáltató hajtóművek tartoznak, míg a nagy kategóriában 2500–3700 kW-os felszálló teljesítményekkel találkozhatunk. Láthatóan ez utóbbi kategória tartalmazza a legkevesebb példányt. Ez nem jelenti azt, hogy összesen ennyi hajtómű létezne ebben a kategóriában, de mindenképpen a „nehéz” szállító helikopter típusok kis száma és egy-egy típuson belül a viszonylag alacsony gyártási szám miatt koránt sincs az a bőség, mint a kis és közepes kategóriákban.

Természetesen, néhány esetben találhatunk a fenti intervallumból kilógó adatokat. A T64-GE-100-as 3228 kW-os teljesítménye 13,3 kg/s-os levegőfogyasztás mellett magasnak számít, de ez is eltörpül a Mi-26-os helikopter D-136-os hajtóművének 8501 kW-os teljesítményéhez képest. Ez utóbbi hajtóműnek a viszonylag magas levegőfogyasztása miatt a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása is jó (0,266 kg/kWh). Ugyanakkor a gyári adatok alapján manapság az RTM 322-04/08, az RTM 322-01/9 és az RTM 322-01/9A hajtóművek képviselik az élvonalat 0,258 kg/kWh fajlagos tüzelőanyag-fogyasztással, ami kevéssel 30% feletti termikus hatásfokot eredményez.

[11] Kompresszor pompázs: a kompresszor fokozatokban sebességi háromszögek torzulásából adódó leválási jelenségek.



13. ábra A fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás és a teljesítmény statisztikai összefüggése

Viszont a kis teljesítmény kategóriában találkozunk 0,5 kg/kWh körüli fajlagos fogyasztás értékekkel is. Pl. a nálunk jól ismert Mi-2 helikopter GTD 350 hajtóművének 0,489 kg/kWh fajlagos tüzelőanyag-fogyasztása is kiugróan magas. Ez magyarázható a hajtómű korával és kis méretével. Az ismertetőkben legtöbb esetben a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás adják meg, de ez könnyen konvertálható termikus hatásfokká a következő módon:

$$\eta_t = \frac{P[W]}{\dot{Q}_b\left[\frac{J}{s}\right]} = \frac{P[W]}{\dot{m}_{tüza}\left[\frac{kg}{s}\right]\cdot F_{tüza}\left[\frac{J}{kg}\right]} \quad \text{míg a} \quad \bar{c} = \frac{3600\cdot \dot{m}_{tüza}\left[\frac{kg}{s}\right]}{P[kW]}\left[\frac{kg}{kWh}\right] \tag{1}$$

$$\eta_t = \frac{1}{\frac{\bar{c}}{3600}\left[\frac{kg}{kWs}\right]\cdot F_{tüza}\left[\frac{kJ}{kg}\right]} = \frac{3600}{\bar{c}\cdot 43217{,}08}[-] \tag{2}$$

ahol:

- η_t[-] – a hajtómű termikus hatásfoka;
- P[W] – a hajtómű tengely teljesítménye;
- $\dot{Q}_b\left[\frac{J}{s}\right]$ – a hajtómű munkafolyamata során másodpercenként bevitt hő;
- $\dot{m}_{tüza}$[kg/s] – a hajtómű tüzelőanyag fogyasztása;
- $F_{tüza}\left[\frac{J}{kg}\right]$ – a tüzelőanyag fűtőértéke;
- c[kg/kWh] – a hajtómű fajlagos tüzelőanyag fogyasztása.

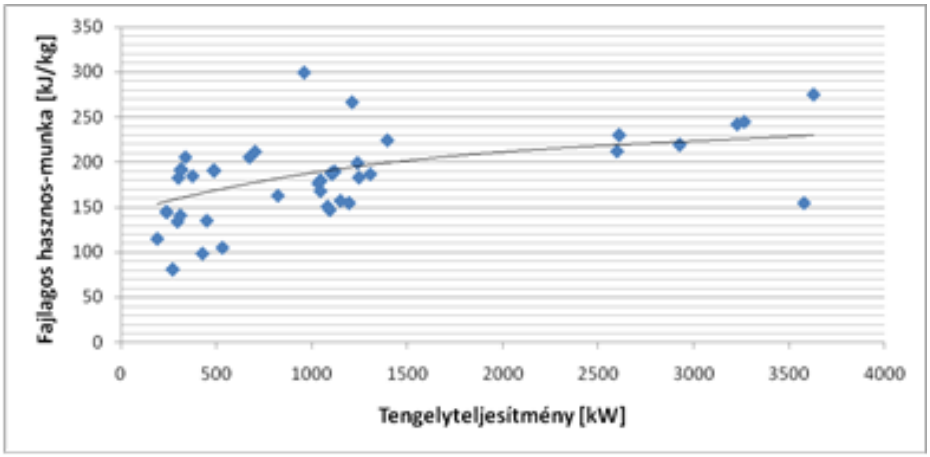
Természetesen a (2) képlet akkor ad helyes eredményt, ha a fajlagos tüzelőanyag fogyasztást, $\bar{c}$ a levezetésnek megfelelően kg/kWh mértékegységgel helyettesítjük be. Az átszámításnál a tüzelőanyag fűtőértéke lehet még kérdéses. Itt a Boeing „Jet Fuel Characteristics" munkaanyagában megadott átlagos 18 580 BTU/lb értéket fogadtam el irányadónak, ami átváltás után 43 217 080 J/kg-nak felel meg [8].

A gázturbinás hajtóművek hatásfokát vizsgálva azt tapasztaljuk, hogy ennek a kategóriának a termikus hatásfokai jelentősen alatta maradnak az egyéb gázturbináknál megszokott értékeknél, ami napjainkban maximális teljesítménynél (felszálló üzemmódon) 40% feletti lehet. Ugyanakkor a helikopter hajtóművek esetében a 30% körüli hatásfok már jónak számít. Ennek megfelelően a termikus hatásfok értéke átlagosan 20–32% között mozog.

Polinommal való közelítésnél a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás trendgörbe (13. ábra) a teljes teljesítmény vertikumban először egy jelentős csökkenést, majd többé, kevésbé állandó

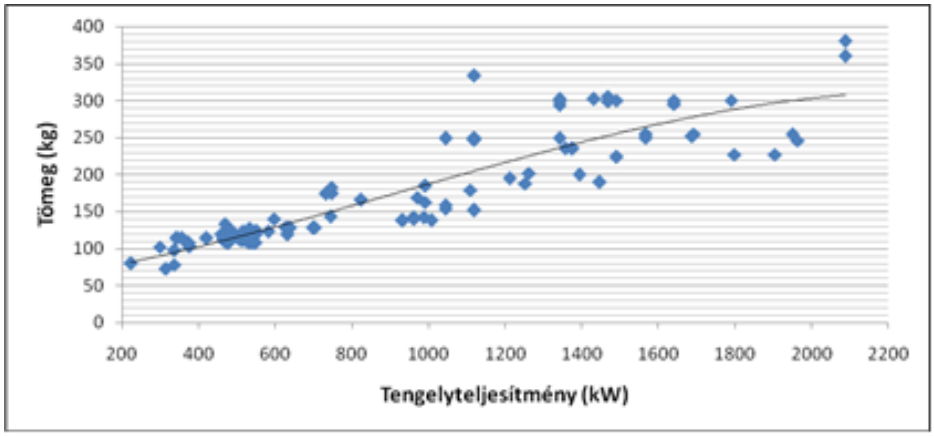
(0,3 kg/kWh, megfelel kb. 27–28%-os termikus hatásfoknak) értéket mutat. Az átlagot tekintve mindenképpen az látható, hogy a nagyobb teljesítmények felé csökken a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás, illetve nő a termikus hatásfok.

Ez persze csak áttételesen kapcsolódik a teljesítményhez. A valós ok az, hogy a nagyobb teljesítményhez nagyobb levegőszállítás tartozik, ami a nagyobb geometriai méretek (kisebb relatív lapátrések) miatt jobb gépegység hatásfokokat eredményez. Ez még inkább igaz, ha a levegőfogyasztás maximuma nem 10 kg/s körül van, hanem mint más kategóriák esetében 30 kg/s, vagy afelett. Visszatérve a helikopter gázturbinákra, ennek megfelelően a rosszabb termikus hatásfokok (nagyobb fajlagos tüzelőanyag-fogyasztások) a kisebb, illetve a korábbi tervezésű hajtóműveknél várhatóak. Természetesen az egyes gyártók közötti technológiai fejlettségbeli különbségek szintén megjelenhetnek hatásfok különbségben, azonban ez a mai globalizálódó világunkban egyre kevésbé jellemző.



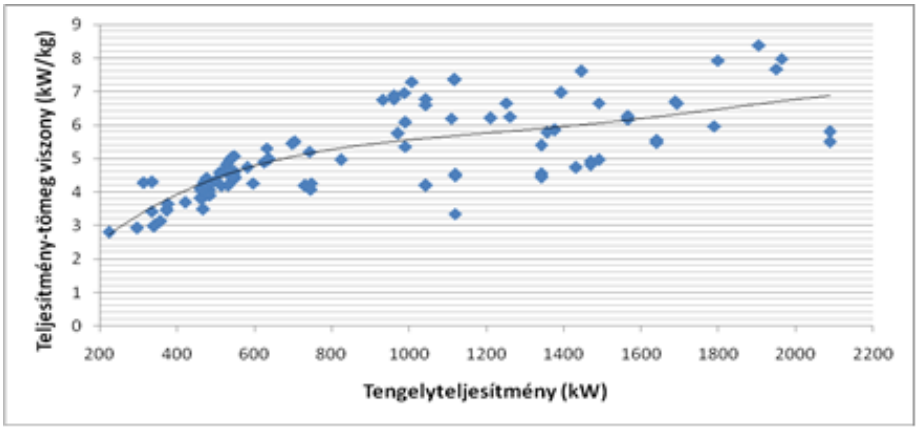
14. ábra A fajlagos hasznos munka és a teljesítmény statisztikai összefüggése

A következő fontos jósági mutató a hajtóművek fajlagos hasznos munkája (14. ábra) Ennek a mutatónak szoros kapcsolata van a hajtómű geometriai méreteivel, illetve tömegével. Minél nagyobb a hajtómű fajlagos hasznos munkája, annál kisebb tömegáram szükséges azonos tengelyteljesítmény létrehozásához, csökkentve ezzel a hajtómű méreteit, illetve esetlegesen tömegét.



15. ábra A hajtómű tömeg és a teljesítmény statisztikai összefüggése

A nagy teljesítmény kategóriában rendelkezésre álló kevesebb példányszám statisztika torzító hatása miatt a továbbiakban csak a kis és közepes kategóriákat vizsgálom. Sajnos még az alsó kategóriákban is csak a hajtóművek töredékénél állt rendelkezésemre a tömegáram is, így trendvonal felvétele meglehetősen kétséges, de jól láthatóan széles a szórás a fajlagos hasznos munka tekintetében. A hajtóművek tömegének és teljesítményének vizsgálatakor azt láthatjuk, hogy míg a tengelyteljesítmény növekedésével értelemszerűen nő a hajtóművek tömege (15. ábra), addig a hajtómű fajlagos teljesítménye (teljesítmény tömeg viszonya) javul a nagyobb teljesítmények irányában (16. ábra).



16. ábra A hajtómű teljesítmény tömeg viszony és teljesítmény statisztikai összefüggése

Érdekes módon a kisebb teljesítmény kategóriában kisebb szóródás (1–2 kW/kg) tapasztalható, mint a közepes kategóriában (3–4 kW/kg). Az is kitűnik, hogy a fajlagos teljesítmény tekintetében főleg a 200–600 kW közötti tartományban nagyon intenzív a javulás a teljesítmény növekedésével. Ez a fent említett szóródás azonos teljesítmények mellett leginkább az adott hajtóművek tervezési idejének eltéréséből adódik.

Összegezve a statisztikából levonható tapasztalatokat, általában a következő hajtómű adatokkal találkozhatunk:

- tengelyteljesítmény: 200–3700 kW
- kompresszor nyomásviszony: 7–16
- levegőfogyasztás: 2–15 kg/s
- turbina előtti gázhőmérséklet: 1100–1500 K
- fajlagos tüzelőanyag fogyasztás: 0,25–0,43 kg/kWh
- hajtómű tömeg: 80–400 kg

ÖSSZEFOGLALÁS

A vezető katonai hatalmaknál a helikopterek alkalmazása az ötvenes években kezdődött. A helyi háborúk tapasztalatai (Korea, Algéria, Vietnam, Közel-kelet stb.) maguktól kínálták az egyre újabb és újabb felhasználási lehetőségeket, a forgószárnyas repülőeszközök specializációját, illetve számuk rohamos növekedését.

A tárgyalt „turboshaft” gázturbinás hajtómű kategória gyors fejlődése az 50-es években kezdődött döntő részben a helikopterek térhódításának következtében. Néhány év alatt az igényelt

egyre nagyobb maximális felszálló-tömeg és hasznos terhelés miatt ezek a repülőeszközök kinőtték a rendelkezésre álló dugattyús motorokat és a váltás egyetlen alternatívája egy könnyű, nagy tengelyteljesítményt szolgáltató erőforrás volt, amire ez a kategória tökéletesen alkalmas. Természetesen az elmúlt 60 év számtalan fejlesztést és újítást hozott jelentősen javítva ezeknek a hajtóműveknek a teljesítményét és hatásfokát, de ugyanúgy előrelépést jelentett az üzemeltethetőségi, karbantartási és javíthatósági mutatókban, vagy magának a helikopternek a légi üzemeltetésében is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] The Messerschmitt Bf 109, e-doc, url: http://www.chuckhawks.com/me-109.htm
[2] url: http://it.wikipedia.org/wiki/File:Whittle_Jet_Engine_W2-700.JPG
[3] Jendrassik György, e-doc, url: http://www.sztnh.gov.hu/feltalalok/jendrass.html
[4] GT 101, e-doc, url: http://en.wikipedia.org/wiki/GT_101, (2013.03.31.)
[5] Turbomeca Artouste, e-doc, url: http://en.wikipedia.org/wiki/Turbomeca_Artouste
[6] Tuboshaft Engine TV3-117: e-doc, url: http://www.vkms.ru/production_en.shtml
[7] Engine Manufacturers, Helicopter Annual, 2009, p. 57–63
[8] LAWICKI Dave: Jet Fuel Characteristics, Boeing, 2002, e-doc, url: http://www.docstoc.com/docs/7654823/JET-FUEL-FACTS
[9] GE Aviation, url: http://www.geaviation.com/engines/military/t58/
[10] Klimov, url: http://en.klimov.ru/production/helicopter/TV2-117/
[11] Rolls-Royce, url: http://www.rolls-royce.com/Images/RTM 322_tcm92-6703.pdfhttp://www.rolls-royce.com/Images/RTM 322_tcm92-6703.pdf
[12] MTU Aero Engines, url: http://www.mtu.de/en/products_services/military_business/programs/mtr390/index.html

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Frank Whittle hajtóműve [2]
2. ábra Jedrassik tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbinája [3]
3. ábra Gázturbinás hajtóművek evolúciója
4. ábra Légijárművek hajtóműveinek felosztása
5. ábra A GT 101 szabadturbina nélküli gázturbina elvi vázlata
6. ábra A GT 102 gázturbina elvi vázlata
7. ábra Turbomeca Artouste, az első helikopterben alkalmazott tengelyes gázturbina [5]
8. ábra Az XT-58-as, mely kialakításában a mai hajtóműveket idézi [9]
9. ábra Izotov TV2-117A, az első szovjet, helikopterbe tervezett hajtómű
10. ábra A „turboshaftok” ma is alkalmazott kialakításának elvi vázlata
11. ábra Az RTM 322 hajtómű szerkezeti vázlata [11]
12. ábra MTR 390 hajtómű az Eurocopter Tiger erőforrása [12]
13. ábra A fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás és a teljesítmény statisztikai összefüggése
14. ábra A fajlagos hasznos munka és a teljesítmény statisztikai összefüggése
15. ábra A hajtómű tömeg és a teljesítmény statisztikai összefüggése
16. ábra A hajtómű teljesítmény tömeg viszony és teljesítmény statisztikai összefüggése

1. melléklet Legfontosabb gyártók, típusok, technikai adatok [7] (N/A: nincs adat)

Gyártó	Típus	Beépítés	Felszálló teljesítmény (kW)	Max folyamatos (kW)	Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás (kg/kWh)	Termikus hatásfok (%)	Tömeg (kg)
General Electric	T58-GE-1	CH-3B/C, SH-3A, S-61A	962	N/A	N/A	N/A	142
General Electric	T58-GE-2	AB204AS	988	N/A	N/A	N/A	142
General Electric	T58-GE-3	TH-1F, UH-1F/P	962	N/A	N/A	N/A	140
General Electric	T58-GE-5	CH-3E, HH-3E/F, SH-3E/F	1118	N/A	0,365	22,8	152
General Electric	T58-GE-6	CH-46A	932	N/A	N/A	N/A	138
General Electric	T58-GE-8B	SH-2F, SH-3G, UH-2A/B/C, CH-113A	932	N/A	N/A	N/A	138
General Electric	T58-GE-8F	SH-2F, SH-3G, UH-2C, CH-124A/B	1007	N/A	0,365	22,8	138
General Electric	T58-GE-10	CH-46D/F, UH-46D/F, HH-2D, HH-3F, SH-3D/G/H, ASH-3A/D/TS, AS-61R	1044	N/A	0,377	22,1	158
General Electric	T58-GE-16	CH-46E	1394	N/A	0,322	25,9	200
General Electric	T58-GE-100	ASH-3H, CH-124A/B Sea King	1118	N/A	N/A	N/A	152
General Electric	T58-GE-402	CH-46D/E, SH-3H, UH-3H	1118	N/A	N/A	N/A	152
General Electric	T64-GE-1	CH-53A	2297	N/A	N/A	N/A	N/A
General Electric	T64-GE-3	HH-53B	2297	N/A	N/A	N/A	N/A
General Electric	T64-GE-6	CH-53A, TH-53A	2125	N/A	N/A	N/A	N/A
General Electric	T64-GE-7	CH-53C, HH-53B/C/H	2926	N/A	N/A	N/A	N/A
Honeywell Defense and Space	HTS900	Bell ARH (1)	744	664	0,320	26,0	143
Honeywell Engines & Systems	AL5512	BV234 & BV234LR (2)	3039	2218	0,330	25,2	354
Honeywell Engines & Systems	LTS101-600A-3A	Eurocopter AS350B (1), Eurocopter AS350D (1), Eurocopter AS350A (1)	485	466	0,347	24,0	120
Honeywell Engines & Systems	LTS101-650B-1	Eurocopter BK-117A (2)	470	418	0,347	24,0	122
Honeywell Engines & Systems	LTS101-750C-1	Bell 222B, UT (2)	510	487	0,353	23,6	111
Honeywell Engines & Systems	LTS101-750B-2	Eurocopter/U.S. Coast Guard HH-65A (2)	515	491	0,347	24,0	123

Gyártó	Típus	Beépítés	Felszálló teljesítmény (kW)	Max folyamatos (kW)	Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás (kg/kWh)	Termikus hatásfok (%)	Tömeg (kg)
Honeywell Engines & Systems	LTS101-750B-1	Eurocopter BK-117B (2)	468	440	0,353	23,6	134
Honeywell Engines & System	LTS101-850B-2	Eurocopter HH-65A (2)	582	556	0,347	24,0	123
Honeywell Engines & Systems	LTS101-700D-2	Eurocopter AS350B2	546	485	0,347	24,0	120
Honeywell Engines & Systems	LTS101-650C-3	Bell 222 (2)	470	446	0,347	24,0	110
Honeywell Engines & Systems	LTS101-600A-2/-3	Eurocopter AS350D(1)	459	440	0,347	24,0	120
Honeywell Engines & Systems	T55-L-712	CH-47D (2)	2796	2237	0,322	25,9	354
Honeywell Engines & Systems	T55-L-712F	HCMK2/2A (2)	3218	2349	0,319	26,1	354
Honeywell Engines & Systems	T55-L-712 S/SB	CH-47D (2)	3262	2349	0,315	26,4	354
Honeywell Engines & Systems	T55-L-712E	CH-47 (2)	2796	2237	0,322	25,9	354
Honeywell Engines & Systems	T55-L-712 S/SC	CH-47D (2)	2796	2237	0,322	25,9	354
Honeywell Engines & Systems	T55-L-714A	CH-47S/D & HCMK3 (2)	3629	3108	0,316	26,4	399
Honeywell Engines & Systems	T55-L-714	MH-47E (2)	3562	3069	0,312	26,7	399
Honeywell Engines & Systems	T55-GA-714A	CH-47D/F (2)	3562	3069	0,312	26,7	399
Honeywell Engines & Systems	T5313B	Bell 205A1, Bell 205B	1044	932	0,365	22,8	249
Honeywell Engines & Systems	T5317B	Bell 205A1, Fuji Bell 205B	1119	1007	0,367	22,6	250
Honeywell Engines & Systems	T5317BCV	B210, Huey II, Bell 205	1342	1119	0,346	24,0	249
Honeywell Engines & Systems	T53-L-13B	Bell UH-1, Agusta AB205	1044	932	0,365	22,8	249
Honeywell Engines & Systems	T53-L-703	Bell AH-1, Bell UH II	1119	1007	0,395	21,0	247
LHTEC	CTS800-4N	AgustaWestland Super lynx (2) AgustaWestland/Turkey T129 (2)	991	920	0,28	29,7	185
LHTEC	CTS800-4K	Shimaywa US2 (1)	991	920	0,28	29,7	163
MTR	MTR 390-2C	Eurocopter Tiger (2)	972	885	0,276	30,1	169
MTRI	MTR 390-E	Eurocopter Tiger (2)	1110	1009	0,288	28.9	179
Pratt & Whitney Canada	PT6B-36A	Sikorsky S-76B (2)	732	661	0,353	23,5	174
Pratt & Whitney Canada	PT6B-36B	Sikorsky S-76B (2)	732	661	0,353	23,5	175
Pratt & Whitney Canada	PT6B-37A	Agusta A119 Koala (1)	747	650	0,361	23,0	175
Pratt & Whitney Canada	PT6C-67A	Bell Agusta BA609 (2)	1447	1249	N/A	N/A	190

Gyártó	Típus	Beépítés	Felszálló teljesítmény (kW)	Max folyamatos (kW)	Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás (kg/kWh)	Termikus hatásfok (%)	Tömeg (kg)
Pratt & Whitney Canada	PT6C-67C	Agusta AW139 (2)	1252	1142	0,308	27,0	188
Pratt & Whitney Canada	PT6C-67D	(UH-1H) DynCorp Global Eagle (1)	1262	1182	0,308	27,0	202
Pratt & Whitney Canada	PT6C-67E	EC175	1324	N/A	N/A	N/A	N/A
Pratt & Whitney Canada	PT6T-3 Twin Pac®	Bell UH-1N, Bell CUH-1N, Bell VH-1N, Bell AH-1J, Bell AH-1T, Bell/Agusta-Bell 212, Sikorsky S-58T	1342	1193	0,362	23,0	294
Pratt & Whitney Canada	PT6T-3B/BF Twin Pac®	Bell/Agusta-Bell 212 Bell/Agusta-Bell 412/412SP(1)	1342	1193	0,365	0,228	299
Pratt & Whitney Canada	PT6T-3BE/BG Twin Pac®	Bell 412 HP, Agusta-Bell 412 Agusta-Bell 412 HP (1)	1342	1193	0,365	22,8	302
Pratt & Whitney Canada	PT6T-3D/DE/ DF Twin Pac®	Bell/Agusta-Bell 412 EP (1)	1432	1268	0,365	22,8	302
Pratt & Whitney Canada	PT6T-6 Twin Pac®	Agusta-Bell 212/412 Sikorsky S-58T (1)	1469	1301	0,36	23,1	299
Pratt & Whitney Canada	PT6T-6B Twin Pac®	Agusta-Bell 412 HP (1)*	1469	1301	0,36	23,1	305
Pratt & Whitney Canada	PW206A	MD Explorer	477	423	N/A	N/A	108
Pratt & Whitney Canada	PW206B	EC135P1	463	419	N/A	N/A	112
Pratt & Whitney Canada	PW206B2	EC135P2	518	457	N/A	N/A	112
Pratt & Whitney Canada	PW206C	Agusta A109 Power (2)	477	423	N/A	N/A	108
Pratt & Whitney Canada	PW206E	MD Explorer	477	423	N/A	N/A	108
Pratt & Whitney Canada	PW207C	Agusta A109 Grand (2)	548	466	N/A	N/A	108
Pratt & Whitney Canada	PW207D	Bell M427 (2)	529	466	N/A	N/A	110
Pratt & Whitney Canada	PW207D1	Bell 429 (2)	536	474	N/A	N/A	108
Pratt & Whitney Canada	PW207E	MD Explorer (2)	529	466	N/A	N/A	109
Pratt & Whitney Canada	PW207K	Kazan Ansat (2)	544	466	N/A	N/A	108
Pratt & Whitney Canada	PW210S	Sikorsky S-76D (2)	802	802	N/A	N/A	N/A
Rolls-Royce	RR 300	Robinson R66 (1)	224	179	0,408	20,4	80
Rolls-Royce	RR 500TP	Fejlesztés alatt	298	283	0,335	24,9	102
Rolls-Royce	Model 250-C20B	Agusta A109A (2), Bell 206B JetRanger (1), Bell 206L LongRanger (1), Eurocopter BO105 (2), Hiller FH1100 (1) MD Helicopters	313	313	0,395	21,1	73
Rolls-Royce	Model 250-C20F	Eurocopter AS355F (2)	313	313	0,395	21,1	73

Gyártó	Típus	Beépítés	Felszálló teljesítmény (kW)	Max folyamatos (kW)	Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás (kg/kWh)	Termikus hatásfok (%)	Tömeg (kg)
Rolls-Royce	Model 250-C20J	Bell 206B JetRanger III (1) Bell TH-57 (1) Bell TH-67 (1)	313	313	0,395	21,1	73
Rolls-Royce	Model 250-C20R	Agusta A109C (2) Bell 206B JetRanger III (1) HeliLynx 355FX (2) Starflex 355F2 (2) Kamov Ka-226 (2) MD Helicopters MD500E (1) MD Helicopters MD520N (1) PZL SW-4 (1) Tridair Gemini ST (2)	336	336	0,370	22,5	78
Rolls-Royce	Model 250-C20W	Enstrom 480B (1) Northrop Grumman Fire-Scout (1) Schweizer 330SP/333 (1)	313	313	0,395	21,1	73
Rolls-Royce	Model 250-C28	Eurocopter BO 105LS (2)	373	373	0,359	23,2	107
Rolls-Royce	Model 250-C28B	Bell 206L-1 LongRanger II (1)	373	373	0,359	23,2	108
Rolls-Royce	Model 250-C30	MD Helicopters MD530F (1)	485	415	0,360	23,1	114
Rolls-Royce	Model 250-C30G	Bell 230 (2)	485	415	0,360	23,1	115
Rolls-Royce	Model 250-C30M	Soloy AS350 AllStar(1)	485	415	0,360	23,1	114
Rolls-Royce	Model 250-C30P	Bell 206L-3 LongRanger III (1) Bell 206L-4 LongRanger IV (1)	485	415	0,360	23,1	114
Rolls-Royce	Model 250-C30R/3	Bell OH-58D (1) Boeing Little Bird ULB (1) MD Helicopters AH/MH-6 (1)	485	415	0,360	23,1	124
Rolls-Royce	Model 250-C30S	Sikorsky S-76A (2)	485	415	0,360	23,1	114
Rolls-Royce	Model 250-C40	Bell 430 (2)	533	457	0,349	23,9	127
Rolls-Royce	Model 250-C47B/M	Bell 407 (1) MD Helicopter MD 600N (1)	485	447	0,355	23,4	124
Rolls-Royce	Gem 42-1	Agusta Westland Lynx (2) Agusta Westland A129 Mangusta (2)	746	664	0,310	26,8	183
Rolls-Royce	Model 250-B17F	Groen Brothers Aviation Hawk 4 (1) O&N Silver Eagle (1) Soloy Cessna 206 'Mark II' (1)	336	336	0,373	22,3	98
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322-01/8	AgustaWestland Merlin HC HM Mk1	1567	1374	0,276	30,2	254
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322-01/12	AgustaWestland Apache AH Mk1 (WAH64)	1567	1374	0,276	30,2	250
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322-02/8	AgustaWestland Merlin HC Mk3	1688	1406	0,276	30,2	252
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322 Mk250	AgustaWestland Merlin HC Mk3	1693	1491	0,276	30,2	255
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322-04/08	AgustaWestland EH101	1950	1555	0,258	32,3	254
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322-01/9	NHI NH90 (2)	1799	1664	0,258	32,3	227
Rolls-Royce Turbomeca	RTM 322-01/9A	NHI NH90 (2)	1905	1805	0,258	32,3	227
Rolls-Royce	AE 1007	Bell-Boeing V22 Osprey (2)	4549	3253	0,259	32,1	440

Gyártó	Típus	Beépítés	Felszálló teljesítmény (kW)	Max folyamatos (kW)	Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás (kg/kWh)	Termikus hatásfok (%)	Tömeg (kg)
Turbomeca	Arrius 1A	Eurocopter AS 355 N (2)	340	296	0,338	24,7	114
Turbomeca	Arrius 1A1	Eurocopter AS 355 NP (2)	343	305	0,338	24,7	114
Turbomeca	Arrius 1M	Eurocopter AS 555 N (2)	357	303	0,338	24,7	114
Turbomeca	Arrius 2F	Eurocopter EC120 (1)	376	336	0,338	24,7	103
Turbomeca	Arrius 2B1	Eurocopter EC135 t1 (2)	421	348	0,320	26,0	114
Turbomeca	Arrius 2B1A-1	Eurocopter EC135 t1 (2)	463	414	0,320	260,	114
Turbomeca	Arrius 2B2	Eurocopter EC135 t2i (2)	485	438	0,328	25,4	114
Turbomeca	Arrius 2K1	Agusta A109 Power (2)	500	425	0,320	26,0	115
Turbomeca	Arrius 2K2	Agusta A109 LUH (2)	534	454	0,321	26,0	115
Turbomeca	Arrius 2G1	Ka 226t (2)	537	427	N/A	N/A	115
Turbomeca	Arriel 1B	Eurocopter AS 350 BA (1)	478	441	0,362	23,0	114
Turbomeca	Arriel 1D	Eurocopter AS 350 B1 (1)	510	450	N/A	N/A	N/A
Turbomeca	Arriel 1D1	Eurocopter AS 350 B2 (1)	546	466	0,352	23,6	122
Turbomeca	Arriel 1C2	Eurocopter AS 365 2 (2)	550	471	0,349	23,9	119
Turbomeca	Arriel 1M1	Eurocopter AS 565 Panther (2)	558	487	N/A	N/A	N/A
Turbomeca	Arriel 1E2	Eurocopter EC 145	550	516	0,349	23,9	125
Turbomeca	Arriel 1K2	Agusta A 109 K	550	471	0,349	23,9	123
Turbomeca	Arriel 1S1	Sikorsky S76 A++	539	466	0,345	24,1	121
Turbomeca	Arriel 2B1	Eurocopter AS350 B3(1)/EC 130B4	632	544	0,333	25,0	119
Turbomeca	Arriel 2C	Eurocopter AS 365 N3	635	597	0,333	25,0	128
Turbomeca	Arriel 2C2CG	Eurocopter HH65C (2)	697	474	N/A	N/A	128
Turbomeca	Arriel 2C1	Eurocopter EC155 B	626	596	0,334	24,9	128
Turbomeca	Arriel 2S1	Sikorsky S76 C+	638	587	0,329	25,4	128
Turbomeca	Arriel 2S2	Sikorsky S76 C++	688	621	N/A	N/A	N/A
Turbomeca	TM 333 2M2	Cheetan(1)/Cheetal (1)	824	735	N/A	N/A	N/A
Turbomeca	TM 333 2B2	DHRUV (2)	824	735	0,315	26,5	166

Gyártó	Típus	Beépítés	Felszálló teljesítmény (kW)	Max folyamatos (kW)	Fajlagos tüzelőanyag fogyasztás (kg/kWh)	Termikus hatásfok (%)	Tömeg (kg)
Turbomeca	Ardiden 1H1	DHRUV (2)	1024	858	0,280	29,8	N/A
Turbomeca	Makila 1A	Eurocopter AS 332	1240	1130	N/A	N/A	N/A
Turbomeca	Makila 1A1	Eurocopter AS 332L1/AS 532	1357	884	0,294	28,3	235
Turbomeca	Makila 1A2	Eurocopter AS 332MK2 (2)/AS532MK2	1376	1236	0,290	28,8	235
Turbomeca	Makila 2A	Eurocopter EC 725/ EC 225 (2)	1564	1411	0,285	29,2	N/A
Turbomeca	Makila 2A1	Eurocopter EC 725/ EC 225 (2)	1567	1418	N/A	N/A	N/A
Turbomeca	Makila 1K2	Denel Roivalk (2)	1376	1236	0,290	28,8	235
Klimov	GTD 350	Mi-2	298	N/A	0,489	17,0	135
Klimov	TV2-117	Mi-8	1119	N/A	0,369	22,6	334
Klimov	TV3-117	Mi-24A	1659	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117M	Mi-14	1659	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117MT	Mi-8MT/Mi-17	1659	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117KM	Ka-27	1659	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117V	Mi-24	1566	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117VK	Ka-27, Ka-29, Ka-32	1641	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117VM	Mi-8MT/Mi-17	1491	N/A	N/A	N/A	N/A
Klimov	TV3-117VMA	Ka-27, Ka-29, Ka-31, Mi-24, Mi-28A/N, Ka-32	1641	N/A	0,288	28,9	295
Klimov	VK-2500 I	8MT/Mi-17, Mi-24, Mi-14, Ka32, Ka-50, Mi-28	1491	N/A	0,295	28,2	300
Klimov	VK-2500 II	8MT/Mi-17, Mi-24, Mi-14, Ka32, Ka-50, Mi-28	1641	N/A	0,287	29,0	300
Klimov	VK-2500 II	8MT/Mi-17, Mi-24, Mi-14, Ka32, Ka-50, Mi-28	1790	N/A	0,282	29,6	300
Klimov	TV7-117V/VM	Mi-38	2088	N/A	0,295	28,2	360
Klimov	TV7-117VK	Mi-28, Ka50, Ka52	2088	N/A	0,308	27,0	380
Klimov	VK-800V	Ansat, Mi-54, Ka-126, Ka-226	597	447	0,390	21,3	140
Ivchenko-Progress	D-136	Mi-26, Mi-26T	8501	N/A	0,266	31,4	1077

ANALYSIS OF HELICOPTER TURBOSHAFT ENGINES

Significant improvement of helicopter engines, which has embodied mainly in power–weight ratio, thermal cycle efficiency, specific fuel consumption, together with reliability and maintainability, of course, has influenced the technical-tactical parameters of helicopters. This fact makes it well worth examining this field. In this paper I introduce the evolution of helicopter turboshaft engines, review the specialities of their operation, the most important producers and types. Through statistical analyses I display, what kind of performance parameters the helicopter turboshaft engines had in the past and have present days.

Keywords: *helicopter gas turbine engines, turboshaft, shaft power, specific fuel consumption, thermal efficiency, specific output net work.*

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

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-01-0442_Varga_Bela.pdf

Kretz András

A REPÜLŐTEREK ZAJTERHELÉSÉNEK VIZSGÁLATA, A KÖRNYEZET ZAJ ELLENI VÉDELMÉNEK LEHETŐSÉGEI

Manapság egyre nagyobb figyelmet kell szentelnünk a fokozódó környezeti zajterhelésnek, amelybe beletartoznak a repülőterek környezetében kialakuló zajhatások is. A polgári repülőterek működését számos előírás és rendelet szabályozza, amelybe többek között beletartoznak a zajterhelés csökkentésére tett intézkedések is. Ezen előírások hatálya azonban a legtöbb esetben nem terjed ki a katonai repülőterekre. A cikkben a szerző vizsgálja a polgári és katonai repülőterek zajterheléssel kapcsolatos jellemzőit, és zajterhelés csökkentését célzó eljárásokat, valamint a lakossági öngondoskodás szerepét ebben a kérdésben.

***Kulcsszavak**: zajterhelés, katonai repülőtér, repülési zaj, zajterhelés csökkentése, lakossági öngondoskodás*

BEVEZETÉS

A hang és a zaj egyidős az emberiséggel, fejlődésünket, civilizációnkat végigkísérte és elmondható, hogy a körülöttünk lévő világ egyre hangosabb lesz. A modern korra jellemző városiasodás a lakosság zajterhelését ugrásszerűen megnövelte, melynek oka a városok forgalmának rohamos emelkedése, a többszintes lakóépületekben kialakult zajszint-növekedés, valamint a magas lakóépületekben, irodaházakban a liftek, a szellőző-berendezések és egyéb gépészeti berendezések megjelenése egyben újabb zajforrásokat is jelentenek.

Számolnunk kell azzal a ténnyel is, hogy a lakosság egyre érzékenyebb a zajhatásokra, amely különösen igaz a repülőterek környezetére. Legtöbb esetben a problémát a repülőterek környékének nagyfokú beépítettsége okozza, az-az a város szinte rátelepül a repülőterekre, mivel a kijelölt biztonsági és zajvédelmi távolságot a város terjeszkedése miatt, a hatóságok nem követelik meg. Emellett gyakran előfordul az is, hogy a szükséges zajvédelmi intézkedések betartása nem megfelelő, amely hosszabb távon, a környéken élők, valamint a repülőtéren dolgozók súlyos egészségromlásához, maradandó halláskárosodásához vezethet.

A polgári repülőterek működését számos előírás és rendelet szabályozza, amelybe többek között beletartoznak a zajterhelés csökkentésére tett intézkedések is. Ezen előírások hatálya azonban a legtöbb esetben nem terjed ki a katonai repülőterekre, ezért is tartom fontosnak annak a vizsgálatát, hogy milyen jogszabályok vonatkoznak a katonai repülőterek kialakítására, üzemeltetésére, az okozott zajterhelés csökkentésére. Alapvető kérdés az is, hogy hazai viszonylatban milyen, zajcsökkentő eljárásokat és módszereket alkalmaznak és milyenek a jogszabályi előírások. Elemezzem továbbá az Európában zajterhelés csökkentésére alkalmazott módszereket és megvizsgálom, hogyan lehetne ezeket alkalmazni a Magyarország területén található katonai repülőtereknél. Mivel a katonai repülőterek kritikus infrastruktúra szempontjából speciális kategóriába tartoznak, ezért fontos annak vizsgálata, hogyan az ilyen létesítmények esetében hogyan valósulnak meg a zajcsökkentő előírások. Felmerül az a kérdés is, hogy a zajvédelemmel kapcsolatban

milyen feladata lehet az állampolgároknak az öngondoskodás területén, mit tehet annak érdekében, hogy a repülőterek környezetében a zaj ellen saját valósítsa meg a zaj elleni védelmet.

REPÜLÉSI ZAJ ÉS A KÖRNYEZETI ZAJTERHELÉS

Napjaink társadalmának egyik legnagyobb problémája a fokozódó környezeti zajterhelés, a környezeti zaj és a zaj elleni védekezés megoldatlansága. Egy ENSZ felmérés szerint a civilizációs zajterhelés évtizedenként 1 dB-lel nő, a növekedés fokozatos, így érzékelése nehéz, viszont élettani hatásai számottevőek. A nagyvárosi zaj kb. harmincszor akkora, mint az 1930-as években [1].

A zajforrások leggyakrabban ipari, közlekedési, építési és szabadidős eredetűek lehetnek [2].Ebben a cikkben a közlekedési eredetű zajok közé sorolható légi közlekedéssel kapcsolatos zajterhelést vizsgálom, hiszen a polgári légi közlekedésből fakadó zajártalmak a környezeti zajvédelem egyik legsúlyosabb problémáját jelentik. Ezek elsősorban a repülőterek mellett élő lakosságot sújtják, de emellett a kis magasságban átrepülő gépek zaja nagyobb területeket is érinthetnek.

Repülési zaj bemutatása

A repülőgépek teljesítménye, és ezzel párhuzamosan a repülőgépek, a repülési útvonalak és ezen belül a járatok száma az 1950-es évektől gyors növekedésnek indultak [3]. Ugyan a mai repülőgépek sokkal csendesebb üzeműek, mint a 30–40 évvel ezelőttiek, ennek ellenére számolnunk kell a repülőterek környezetére nehezedő zajterhelés növekedésével is.

A repülőgépeken fellépő zajterhelést az aerodinamikai zajok mellett, különböző beépített gépek és berendezések okozzák, melynek legfontosabb csoportjai az alábbiak:

- a főhajtóművek és főleg a földön járatott segédhajtómű zaja;
- az aerodinamikai zaj, ami a levegő törzsön, és vezérsíkok mentén való áramlása közben keletkezik;
- a személyzetet érintő zaj, ami az előző kettő csoportba soroltak mellett tartalmazza például a fedélzeti légkondicionáló berendezések zajhatását is [3].

A repülési zaj impulzusos komponenseket is tartalmazó állandó szintű mélyfrekvenciás zaj, mely nem tekinthető pontforrásnak, amennyiben az észlelőtől kis távolságra következik be a repülési zajesemény. Nagy távolság esetén a mély frekvenciájú, állandó komponens hallható, ekkor beszélünk pontforrásról. A repülőgép hajtóműve nyomáshullámokat kelt. Ez az elsődleges zajforrás. A hanghullámok a haladási irány felé eső oldalon sűrűsödnek [5][6]. Minden repülőgéptípusra sajátos zajszint és frekvenciaspektrum jellemző. Az jelenti a problémát, ha a zaj frekvenciája a hallható tartományba esik.

Környezeti zajterhelés

A zajterhelést elsősorban a repülés jellemzői, a repülési irány, repülési útvonal, repülési magasság, a le és felszállások száma, másodsorban az adott légi jármű kategóriája és zajkibocsátása befolyásolja. Továbbá, a zajterheléssel kapcsolatban figyelembe kell venni az alapzajt és a zaj egyéb háttérterhelését, ami jelentős mértékben függ az adott terület földrajzi adottságaitól. Közismert, hogy az éjszakai zaj zavaróbb, mint a nappali, ezért fontos tudni, hogy egy adott napon belül, a napszakok között hogyan oszlanak meg a fel- és leszállási műveletek száma. A légi

járművek hajtóművéből származó zaj jellege és erőssége meglehetősen változó, nagyban függ a hajtómű típusától, illetve attól, hogy a járművel milyen repülési műveletet hajtanak végre. (pl.: le vagy felszállás, műrepülés, földi hajtómű próba stb.) [7].

Repülési zaj esetében a zajforrás és az észlelési pont közötti távolság hatására jelentős zajcsökkenés tapasztalható, ezért is van kiemelt jelentősége a védőtávolságoknak. A hangvisszaverődés megszűntetésével szintén a zajcsökkenést tudjuk elérni, ami szoros összefüggésben van a környezeti adottságokkal. Például magas beépítettség esetén, a burkolt felületek és az épületek hatására hangvisszaverődés tapasztalható, mely a zavaró hanghatás növekedését eredményezi. A hang terjedését, így a zajterhelést is, a távolság és a beépítettségen túl, befolyásolják a köztes akadályok, a domborzati viszonyok, a növényzet sűrűsége, valamint a fák magassága. Zajcsökkentés szempontjából ideális legalább 40–50 m széles, valamint nagy lombozattal és aljnövényzettel rendelkező erdősáv telepítése [9]. Ezért zajcsökkentési célra, gyors növekedésű, sűrű lombozattal rendelkező fafajtákat célszerű alkalmazni, olyat, hogy gondozásuk könnyű legyen, ne igényeljen sok anyagi befektetést és jól alkalmazkodjon a repülőtér sajátos klimatikus viszonyaihoz. Fontos az is, hogy az ilyen célból telepített erdősávokat a madarak élőhelyül ne részesítsék előnyben, mert ez által a légi balesetek veszélye és száma is csökkenthető. Erre a célra kivallóan alkalmasak az örökzöld fajok, mert az ezekből álló 100 m széles erdősávnak a hangcsillapítása elérheti a 25–30 dB-t. Lejtős területen ültetett erdősávval a hangcsillapítás tovább növelhető, mert a lejtő önmagában is jelentős hangszigetelő hatást képes kifejteni [9].

A polgári repülőterek egyre növekvő forgalma, valamint a katonai repülőterek mindennapos használata során számolnunk kell a környezeti zajterhelés emelkedésével, melynek csökkentésére már több módszert is kidolgoztak és a gyakorlatban is alkalmaznak. Az erdősávok mellett ilyen megoldás a repülőterek köré épített zajvédőgátak, amelyek a hang terjedésének csökkentése mellett megszüntetik a hangvisszaverődést, ezáltal a kibocsájtott zaj nem tud felerősödni. A következő fejezetben bemutatom az Európai Unióban elterjedt zajcsökkentő megoldásokat.

ZAJCSÖKKENTÉSRE TETT EURÓPAI ÉS HAZAI INTÉZKEDÉSEK ÁTTEKINTÉSE

Európai áttekintés

A zajcsökkentés megvalósítására számos megoldás létezik, amelyeket az EU-ban is egyre több ország alkalmaz. A kiválasztott és vizsgált országokban található módszereket az 1. táblázatban mutatom be.

Zajövezetek, ahogy az 1. táblázatban is látható, mind a 6 ország esetén kialakításra kerültek, amelyeket a repülőterektől kiindulva meghatározott távolságban jelölik ki. A repülőterekhez legközelebb eső övezetben intézményrendszer nem létesíthető. A távolabbi övezetekben, meghatározott feltételek mellett oktatási, egészségügyi intézmények működhetnek, de csak a legtávolabbi övezetben lehetséges a lakóházak építése. Dániában a zajgátló védőövezetek határainak kijelölésekor zajszint előrejelzést készítenek, melynek során 8 éves időhorizontot vesznek figyelembe. Lengyelországban a zajkontúrok az aktuálisan mért, és az előre jelzett zajszinteken alapulnak, de jelenleg csak a varsói reptér esetében állnak rendelkezésre. Ezek felülvizsgálatára a forgalomváltozást figyelembe véve, 5 évenként kerül sor.

A *szigorú építési előírások* és az *átfogó tervezés* szintén jelen van mindegyik vizsgált országban. Lengyelországban, minden akusztikus térképpel rendelkező repülőtér esetén, a területhasználati tervezés kötelező. Hollandiában és Dániában minden új építésű ház esetén a zajvédő szigetelés használata kötelező, valamint a tilalmi zónákat is ki kell jelölni. Hollandiában a katonai és polgári repülőterek területhasználati tervezése esetén is, a Nemzeti Légiközlekedési Törvény előírásainak betartás kötelező. Svájcban viszont a repülőtéri-fejlesztés környezeti hatástanulmánya (EIA), a tervezés részét képezi.

Intézkedés típusa	Dánia	Hollandia	Lengyel-ország	Ausztria	Spanyol-ország	Svájc
Zajövezetek kialakítása	X	X	X	X	X	X
Átfogó tervezés	X	X	X	X	X	X
Építési előírások	X	X	X	X	X	X
Zajszigetelési programok	X	X	X	X	X	X
Zajvédők	X	X	X			X
Zajmonitoring és járat követő rendszer	X	X		X	X	X
Zajdíj		X			X	X
Parcellázás alapú szabályozás			X			
Területfelvásárlás és áttelepítés		X	X			X
Fontos fejlesztések tervezése			X		X	X
Épületek lebontása		X				

1. táblázat Zajvédelmi intézkedések az egyes európai országokban [10]

A *zajszigetelési programok* szintén fontos részét képezik a repülési zaj elleni védekezésnek, amelyek megvalósítása jellemzően állami (pl.: Hollandia, Dánia), vagy az állam és a repülőtér üzemeltetőjének közös finanszírozásában (pl.: Lengyelország) valósul meg. A programok részeként nem csak a lakóépületek, hanem iskolák, hivatalok, kórházak és üzleti területek is szigetelést kapnak, ez által csökkenthető az épületeken belüli zajterhelés.

Zajmonitoring rendszer működik több európai repülőtéren. A Madrid/Barajas repülőtéren működtetett rendszer 17 mérőállomásból áll, amelyek a fel és leszálló pályák területén és annak közelében helyezkednek el. A kapott adatokat felhasználják a jövőbeni tervezésben is. A varsói rendszer 4 leszállókörzetben 12 földi mérőállomás van elhelyezve, amelyek összeköttetésben vannak a repülőtéri radarral, valamint rendelkezik egy mobil állomással is. Az adatokat az akusztikai térkép elkészítéséhez, és a bírságok kiszabásához is felhasználhatóak. Továbbá, számos reptéren járatkövetési rendszer is üzemel.

Repülésszervezési eljárások, keretében meg lehet határozni a fel-és szállás irányait, a városok feletti repülések paramétereit, a repülések járatszámait stb., és ezek segítségével a lakosságot ért zajszint és zajterhelés csökkenthető, elviselhetőbbé tehető.

Hollandiában, Svájcban és Spanyolországban *Zajdíj* bevezetésére került sor. Hollandiában a befolyt bevételt a zajszigetelési programok finanszírozására használják fel, valamint így akarják az üzemeltetőket alacsonyabb zajkibocsátású gépek üzemeltetésre ösztönözni.

Látható, hogy a repülőgépek által kibocsátott zajterhelés csökkentésére számos példa létezik, amelyek eltérő mechanizmussal és hatékonysággal, de alkalmasak arra, hogy a keletkező zajterhelést csökkenteni lehessen, függetlenül attól, hogy milyen jellegű repülőtérről van szó.

Magyarországi polgári repülőterekre vonatkozó előírások

A külföldi repülőtereken alkalmazott zajvédelmi intézkedésekhez hasonlót magyarországi viszonylatban is találunk. A légiközlekedésről szóló 1995. évi XCVII. törvény rendelkezik a zajgátló védőövezetek kialakításáról. Az európai gyakorlathoz hasonlóan hazánkban is különböző övezeteket hoztak létre, amelyek beépítésére rendkívül szigorú szabályok vonatkoznak [11].

Fontos megjegyezni, hogy a zajgátló védőövezet önmagában csak korlátozottan nyújt védelmet a légi jármű földi működtetésből, a repülőtér üzemeltetéséből, valamint a légi forgalomból származó zajhatás ellen, mert ez nem akadályozza meg teljesen a zaj terjedését. A zajhatás elleni védelembe beletartozik a zajgátló védőövezet kijelölése, az ehhez kapcsolódó követelményértékek előírása, a légi forgalomra vonatkozóan elvárások megadása, valamint a repülőtér üzemeltetőjére háruló zajcsökkentési feladatok összessége. Ezért, a szabályozást tekintve, a 176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet szerinti zajgátló védőövezet kijelölése alapján lehetőség nyílik olyan intézkedések bevezetésére és követelmények meghatározására, melyek a repülőtér működéséből származó légi közlekedési zaj szabályozását, kezelését és a zajterhelés csökkentését eredményezhetik.

A környezeti zaj értékeléséről és kezeléséről szóló *280/2004.(X.20.)* Korm. rendelet a polgári repülőterek esetében előírja a stratégiai zajtérkép elkészítését is, amit általában az önkormányzat készített el [12]. A rendelet előírásainak megfelelően el kell készíteni a zajterhelési övezeteket bemutató zajterhelési térképet, amely bemutatja a zajterhelést és annak értékeit egész napra és éjjelre egyaránt. Továbbá, a konfliktus-térképen ábrázolni kell a stratégiai küszöbértékek túllépésének mértékét a zajszintgörbék megadásával együtt. Mindezek mellett, számba kell venni az érintett lakosság létszámát és az ingatlanok számát, valamint a zajterhelésnek kitett intézményeket (óvoda, iskola, kórház, stb.) is azokon a területeken, ahol a stratégiai küszöbértékeket a zajterhelés meghaladja. Korszerű repülésszervezési és forgalmi eljárások alkalmazásával, a fel- és leszállások megfelelő időbeni koordinációjával, a kevésbé zavaró repülési útvonalak kijelölésével jelentős zajcsökkenés érhető el, amellyel a lakosság komfortérzete javítható. Ezeket a zajcsökkentő módszereket egyre több repülőtér alkalmazza a gyakorlatban, melynek következményeként a légi járművek nagyobb mértékben kerülik el a sűrűn lakott területeket, valamint a repülési időszakok, a repülések számának korlátozásával, továbbá az éjszakai forgalom optimalizálásával, jelentős zajcsökkentési eredményeket értek el. Ezek közül ki kell emelni, hogy az emberek mélyalvási időszakában sok repülőtéren speciális pályahasználati szabályokat vezettek be, amelyeket az üzemeltetők kötelesek betartani.

A hazai polgári repülőtereken megvalósult zajterhelés csökkentési eljárások és megoldások

A zajterhelés csökkentése érdekében számos programot valósítottak meg a hazai repülőterek esetében. A zajszigetelési program keretében, a környező településeken, illetve a repülőterek közvetlen közelében fekvő ingatlanok esetében végezték el a zajszigetelést. Ennek keretében végrehajtották a lakások pihenő helyiségeink hangszigetelését, valamint azoknál az

ingatlanoknál, ahol a zajterhelés miatt nem lehet az ablakokat nyitva hagyni, klíma és szellőző berendezéseket építettek be. A Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér esetében például az üzemeltető a beruházás teljes költségét magára vállalta, ezzel is jelezve az érintett lakossági csoportok iránti felelősségét, annak ellenére, hogy erre a jogszabályi környezet nem kötelezte, mert a zajszigetelésre vonatkozó intézkedéseket a jogszabályok, csak a zajgátló védőövezetek kijelölését követően teszik kötelezővé. 2004-től a repülőtéren zajmonitoring rendszer üzemel, 6 db telepített állomással. Ezek az állomások mérik a légi járművek és egyéb zajforrások tényleges zajterhelést, valamint a háttérzajt. A monitoring rendszert egy zajterhelést számító szoftver egészíti ki, amely a repülési útvonalakat felhasználva képes a megvalósult zajterhelést számolni, azok értékét megadni. Az üzemeltető az állomások adatait, és azok kiértékelését a környezetvédelmi felügyelőség felé továbbítja, és a lakosság számára is elérhetővé teszi, ezáltal is segítve a lakossági panaszok kivizsgálását [25].

A debreceni repülőtér példája jól mutatja, hogy kisebb repülőterek esetében is megoldható a zajmonitoring rendszer kiépítése és üzemeltetése. Debrecenben 2003 óta üzemel egy 3 monitoring pontból álló zajellenőrző rendszer. A telepített multifunkcionális Larson Davis 824 berendezés segítségével meghatározhatóvá vált a zajterhelés [3].

A HAZAI KATONAI REPÜLŐTEREK

Katonai repülőtér fogalma, rendeltetése

A téma vizsgálatának megkezdése előtt szükségesnek tartom a katonai repülőtér fogalmának ismertetését, amely az alábbiak szerint határozható meg:

A katonai repülőtér nem más, mint katonai célra igénybevett repülőgépek, helikopterek és más légi járművek elhelyezésére, kiszolgálására, fel- és leszállására alkalmas és az ehhez szükséges építményekkel, berendezésekkel ellátott terület [1].

Ebből következik, hogy a katonai repülőterek alaprendeltetése, legyen képes biztosítani a különböző típusú, fajtájú és kategóriájú katonai légi járművek fogadására, indítására, karbantartásának, tárolásának, javításának és ismételt feladatra történő felkészítésének feltételeit. Rendelkeznie kell a különböző repülési feladatok ellátásához a légi járművek földi kiszolgálásához, javításához szükséges anyagokkal, technikai eszközökkel, erőforrásokkal, rakéta-, lőszer- és robbanóanyagokkal, valamint ezek elhelyezési, működési és tárolási feltételeivel. Biztosítsa a kiszolgáló és üzemeltető állomány kiképzési, felkészülési, pihenési, valamint élet- és munkakörülményeit. Rendelkezzen a fenti feladatok ellátásához, a biztonságos működéshez szükséges létesítményekkel, leszálló, jelző és irányító berendezésekkel, a repülőtér rendjét, külső és belső védelmét szolgáló technikai rendszerekkel [14].

A hazai katonai repülés fejlődése, és repülőterei napjainkban

A magyar repülés a gyakorlatban a 20. század első évtizedének végén, 1909-ben kezdődött, amikor is a repülés magyar kedvelői Rákos-mezőn megkezdték repülési kísérleteiket. A Monarchia haderejében már a 19. század végén megalakították a Légjáró Csapatokat, amelyek az akkori repülőgépek mellett léghajókkal is rendelkeztek. A magyar katonai repülés 100 éves történetének, sajnos, két pusztító háború is részét képezte.

Köztudott, hogy a repülő csapatok az első világháború kezdeti időszakában, alapvetően légi felderítést hajtottak végre, később aktívan részt vettek a szárazföldi csapatok harcának támogatásában is. A gyors technikai és harcászati eljárásoknak megfelelően létrejöttek a vadász, a bombázó, és a szállító repülő alakulatok, amelyek a második világháború során már alapvető fegyvernemnek számítottak. A második világháború után megjelentek a korszerű, sugárhajtóműves repülőgépek, majd 1947-től beköszöntött a szuperszonikus repülések korszaka. A magyar katonai repülésben 1951-ben jelentek meg a MiG-15-ös vadászgépek, amelyek sebessége megközelítette az 1100 km/h sebességértéket. 1959-ben érkeztek a MiG-19-es repülőgépek, amelyek már a hangsebesség 1,4-szeresével repültek. Két évvel később rendszeresítették a MiG-21-es típus első változatát, amelynek maximális sebessége már 2,05M, vagyis a hangsebesség valamivel több, mint kétszerese volt. E típusnak lokátoros változatai később a légierő alaptípusát képezték [15]. Napjainkban a hazai katonai repülés a magas költségek miatt nem fejlődött olyan mértékben, mint az EU nyugati országaiban, de a rendelkezésre álló gépek és repülőterek jelenleg is hozzájárulnak a környezeti zajterhelés előidézéséhez.

Hazánk katonai repülőterei

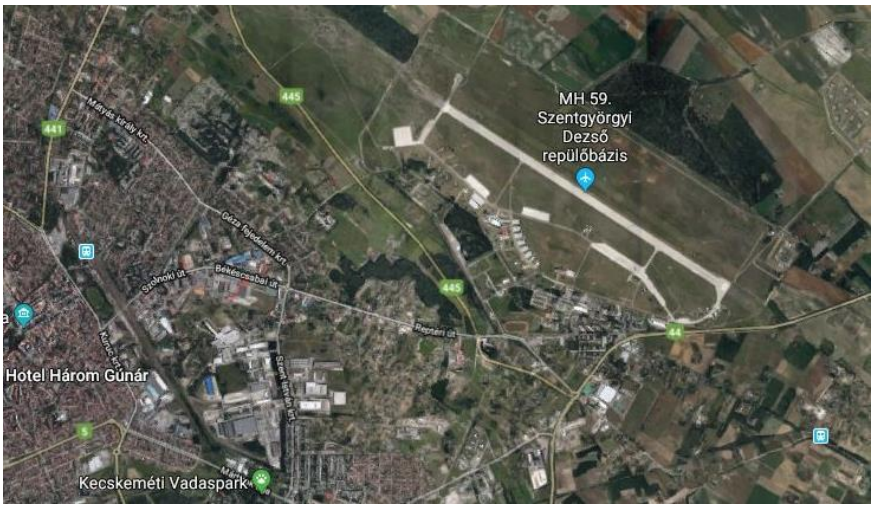
Magyarországon az 1930-as években kezdték meg kifejezetten a katonai célú repterek kiépítését, jellemzően a nagyvárosoktól viszonylag távol, ezzel is biztosítva, hogy a repülőterek elleni támadás ne okozzon kárt a lakott településeken. Ezt a távolságot a gazdasági fejlődés, a városok területigényének növekedése fokozatosan felszámolta, ezáltal a települések sok helyen körbenőtték a hazai katonai repülőtereket [7]. Magyarországon 3 katonai (nem nyilvános, állami célú repüléseket kiszolgáló) repülőtér működik, amelyek burkolt felszálló pályákkal rendelkeznek. Ezek az alábbiak:

- Kecskeméti MH 59. Szentgyörgyi Dezső repülőbázis;
- Szolnoki MH 86. Szolnok Helikopterbázis;
- Pápai MH Pápa Bázisrepülőtér.

Kecskeméti MH 59. Szentgyörgyi Dezső repülőbázis

Kecskeméti MH 59. Szentgyörgyi Dezső repülőbázis az Alföldön Bács-Kiskun megyében található, Kecskemét város közvetlen közelében. Az alakulat 2000. október 1-től viseli a Magyar Honvédség 59. Szentgyörgyi Dezső repülőbázis nevet. Hazánk NATO-hoz történő csatlakozásával a kecskeméti repülőbázis jelentősége felértékelődött. NATO támogatásból beruházások indultak, melyek során számos korszerűsítés történt a repülőtéren. Ennek köszönhetően egy 3000 m hosszú, modern fénytechnikával ellátott leszálló pályával rendelkezik és nagyméretű katonai szállítógépek fogadására is alkalmassá vált. A biztonságos repülést az alakulat saját meteorológiai szolgálata segíti. A zajszennyezés szempontjából elmondható, hogy Kecskemét városa a repülőtér 1937-es átadásakor még nem volt közvetlen kapcsolatban, de az idők folyamán a város határai kitolódtak és ahogy az 1. képen is látszik, a város gyakorlatilag elérte a repülőtér szélét [16].

A repülőtér üzemeltetésével összefüggő, valamint a repülés okozta zajterhelés miatt, a lakosság védelme érdekében zajgátló védőterület lett kijelölve. Ennek jelentőségét, illetve a kialakítás módját a későbbiekben fogom ismertetni [17].



1. kép Kecskeméti repülőtér madártávlatból (forrás: Google Maps)

MH Pápa bázisrepülőtér

A Pápai bázisrepülőtér a Nyugat-Dunántúlon, Veszprém megyében Pápától 4 km-re található. A repülőteret az 1930-as években nyitották meg és már a II. világháború alatt is üzemelt, mint katonai reptér. A Pápai Bázisrepülőtér alapvető feladata a készenlét fokozása és a feltöltési készség fenntartása, továbbá a készenléti szolgálatot ellátó és a Magyar Honvédségnél rendszeresített repülőeszközök fogadását, valamint a nyugati régió Légi Kutató-mentő Készenléti Szolgálat feladatait is ellátja. Továbbá, biztosítja az ehhez szükséges szolgáltatásokat, a megfelelő személyi állományt és annak kiképzését is [19]. A zajteher csökkentése érdekében az előírásoknak megfelelően szabályozták a repülésirány változtatást és zajvédősávot jelöltek ki.

MH 86. Szolnok helikopter bázis

Az alakulat Szolnok mellett, a Tiszától keletre fekvő nagy múltú repülőtéren települ. A 2000 méteres fel-leszálló pályával rendelkező repülőtéren az 1940-es évek elejétől folyamatosan állomásoznak, katonai repülőcsapatok. A bázis közvetlen elődjének történetét 2004. augusztus 1-jétől számítjuk. Ekkor jött létre a megszűnő MH 87. Bakony Harci Helikopter Ezred és az MH 89. Szolnok Vegyes Szállítórepülő Ezred személyi és technikai bázisán az MH 86. Szolnok Helikopter Ezred, a 2007. március 1-jei szervezeti váltást követően pedig megalakult az MH 86. Szolnok Helikopter Bázis. A bázis fő fejlődési irányvonala az alapfeladatok végrehajtása mellett a NATO-követelmények teljesítése, amely az újonnan megalakított szervezet felépítésében és a kiképzési feladatok végrehajtásában realizálódik. A bázis alapfeladatait egy szállítóhelikopter-zászlóaljjal, egy harcihelikopter-zászlóaljjal, egy vegyes kiképzőrepülő-századdal, valamint a szervezetébe tartozó kiszolgáló- biztosító-támogató alegységekkel látja el. Feladatait az alapító okiratban rögzített alaptevékenységeknek megfelelően hajtja végre, melyek az alábbiak [21]:

- a katonai erő alkalmazását igénylő esemény, nemzeti, illetve nemzetközi válsághelyzet kezelésére bevetett csapatok manővereinek és harctevékenységeinek biztosításával összefüggő feladatok végrehajtása;
- a hajózó és repülő-műszaki oktatás biztosítása, hadműveleti és gyakorló repülések, bel- és külföldi katonai és gazdasági célú légi szállítások végrehajtása;
- a katonai és katonairepülő-hagyományok ápolása.

Magyarországi katonai repülőterekre vonatkozó zajvédelmi előírások

A katonai repülőterek lakossági zajterhelése eltér a polgári gépekétől, mivel a vadászgépek gyors le és felszállása miatt a lakosságot rövidebb idejű zajterhelés éri, mint a lassú utasszállító gépek esetén. Fontos megemlíteni, hogy a polgári repülőtereknél bemutatott zajcsökkentő eljárások nem vonatkoznak teljes mértékben a katonai repülőterekre, mert a 280/2004.(X.20.) Korm. rendelet hatálya nem terjed ki a Magyar Honvédség területén végzett katonai tevékenységek közben keletkező zaj értékelésére és kezelésére, valamint az ezzel kapcsolatos adatszolgáltatásra. Viszont léteznek olyan jogszabályok is, amelyek előírásai már vonatkoznak a katonai repülőterekre is. Ezek közül csak a legfontosabbakat emelem ki és mutatom be.

A *176/1997. (X. 11.) kormányrendelet* a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének szabályairól szól [23]. A rendelet hatálya kiterjed minden olyan repülőtérre, amelyet motoros repülőgépek és helikopterek rendszeresen használnak. A rendelet alkalmazásában zajgátló védőövezetnek nevezzük a repülőtér környezetének azon a részét, amelyen a repülőtér üzemeltetéséből számított mértékadó zajterhelés meghaladja a közlekedésből származó környezeti zajnak külön jogszabályban (8/2002. KöM-EüM együttes rendelet 3. számú mellékletében) meghatározott zajterhelési határértékeit. Nem tartozik a zajgátló védőövezetbe a repülőtér telekhatárán belül lévő terület. A zajgátló védőövezetnek az a része, amelyen a környezeti zaj szempontjából védendő objektumok vagy védett természeti területek találhatók, fokozottan zajos területnek, illetve övezetnek minősül. A kormányrendelet előírása szerint a Magyar Honvédség által üzemben tartott repülőtereken minden olyan esetben felül kell vizsgálni a zajgátló védőövezeteket, amikor új futópályát létesítenek, vagy a meglevő futópálya akár csak egyik végén a forgalom 50%-kal megnövekszik. Pontos és hosszú távú kalkuláció szükséges a várható légi forgalom viszonylatában, hiszen 10 éves távlatban kell azt előre jelezni. Az elkészült, védőövezeteket ábrázoló térképeket és dokumentumokat az érintett önkormányzatoknak el kell juttatni.

Jogszabály szerint a zajgátló védőövezeteket négy (A–D) kategóriákra kell osztani, de a védőövezetekbe eső ingatlanok típusánál a jogszabályi rendelkezések csak a különböző intézményeket említik, a lakóépületekre nem térnek ki. Ezen jogszabályi előírásokat a jövően mindenképpen pontosítás kell. A jogszabályi előírások végrehajtásának anyagi fedezetét a rendelet szerint a központi költségvetésből kell biztosítani.

A *27/2001. (XI. 23.) HM rendelet* a katonai repülőterek üzemeltetésének feltételeit szögezi le, amelybe többek között beletartozik a zajgátló övezetek kijelölése és a repülőtéri rend előírásai is.[24] Amennyiben valamely katonai repülőtér besorolása a használat szempontjából megváltozna, a légügyi hatóság szemle keretében fogja vizsgálná annak üzemben tarthatóságát és ennek eredménye alapján fogja kiadni a további engedélyt. A repülőtéri rendet a repülőtér üzemeltetője készíti el, és a hatóság hagyja jóvá.

26/2007. (III. 1.) GKM-HM-KvVM együttes rendelete a magyar légtér légiközlekedés céljára történő kijelöléséről, szabályozza Magyarországon belül azon területek koordinátáit, ahol nem végezhető repülés. Ezek természetvédelmi területek és a korlátozás az év egészére vonatkozik.

A KATONAI REPÜLŐTEREK ÁLTAL ELÉRT EREDMÉNYEK

Annak ellenére, hogy a katonai repülőterek működése és zajterhelése számos ponton eltér a polgári repülőterekétől, itt is számolnunk kell a repülőgépek által keltett környezeti zajhatással, amely miatt a katonai repülőterek esetén is számos eljárást kellett megvalósítottak a zajterhelés csökkentése érdekében.

A katonai repülőtereken a legnagyobb zajterhelést a guruló úton való közlekedés, a fel-és leszállás, valamint a nagyszámú földi hajtóműpróbák okozzák. A guruló úton történő zajhatás csökkentése érdekében az előírásoknak megfelelően a repülőterek környezetében zajvédő sávokat alakítottak ki. Ennek fejlesztése és bővítése, valamint a zajmonitoring rendszer kiépítésével további zajszint csökkenést érhető el. A katonai feladatok végrehajtása érdekében a repülőgépek le-és felszállásának száma, valamint a kiképző repülések óraszáma nem csökkenthető, ezért az ebből adódó zajterheléssel továbbra is számolni kell. Adott esetben az éjszakai korlátozás sem mindig járható út. Addig, amíg az éjszakai gyakorló repülések időintervallumai megváltoztathatók, az éles bevetésekkel, és a harci készültséggel kapcsolatos repüléseket nem lehet korlátozni. A megoldást a felszállási irány megváltoztatása, a repülési idő napszak (időszak) helyes megválasztása, valamint a környező lakóházak zajszigetelése jelentheti. Mind a polgári, mind a katonai célú repülőterek esetében fontos a megfelelő hajtóműpróbázó hely kialakítása, melyet megfelelő zajvédelemmel kell ellátni. Külföldön már bevált módszer a zárt térben történő hajtóművek tesztelése, ami az épület szigetelése és kialakítása miatt jelentősen csökkenne a nagy számban elvégzett tesztelések során keletkező zajterhelés. Új repülőterek létesítésénél alapvető követelmény, hogy a helyszínt (területet) úgy kell megválasztani, hogy az ott megjelenő tényezők ne növeljék a zajterhelést, ne lépjen fel dominóhatás. (például közlekedési csomópontok, üzemek stb.)

A LAKOSSÁGI ÖNGONDOSKODÁS NÖVELÉSE

A fentiekből következik, hogy a védelmi tevékenység specialitásaiból adódóan nem zárható ki teljes mértékben a környezet zajterhelése, így a katonai repülőterek okozta zajhatás sem, ami hatással van a környezet és a lakosság életére egyaránt [23]. Az ellene való védelem elsősorban az üzemeltetők és a fenntartók feladata, de ennek alapfeltétele, hogy a lakosság ne építkezzen a biztonsági sávban és az építési hatóságok ne adjanak ki erre a területre építési engedélyt. Ezen kívül, ebben a feladatban a lakosságnak is szerepet kellene vállalni, az-az életbe kellene lépnie az öngondoskodás szabályainak és követelményeinek. Napjainkban az öngondoskodás a katasztrófák elleni védekezés során egyre nagyobb szerepet kap és a lakosság motiválására új megoldások születnek [24]. A zajterhelés elleni védelem egyik fontos lépése lehetne a lakosság tudatformálása az építési szokások és megoldások területén. Fontos lenne megérteni, hogy az ilyen területekre való építkezés mit von maga után és csak zajszigetelt épületekre kellene az engedélyeket kiadni. A lakosság motiválást adókedvezménnyel, vagy a házak zaj elleni szigetelésének támogatásával, esetleg a területről történő elköltözés segítésével kellene végrehajtani.

ÖSSZEGZÉS

Napjaink egyik fontos kérdése a növekvő környezeti zajszennyezés, amelybe beletartozik a repülőterek ős a repülés okozta zaj is. A cikkben hazai és európai példákon keresztül bemutattam a repülőtéri zaj csökkentésének lehetséges módszereit, megoldásait. Rávilágítottam, hogy a légiközlekedésben a zajcsökkentés több területen végezhető el. Legfontosabb a megfelelő zajövezetek kialakítása és a hozzátartozó zaj határértékek megállapítása, valamint a zajvédelmi térképek elkészítése. Ez azért fontos, mert ezek szolgálhatnának a későbbi zajvédelmi intézkedések alapjául. Jó megoldást hozhat a járatszámok átgondolása, az éjszakai járatok korlátozása, a repülésirány változtatása, valamint a környező lakóházak zajszigetelése is.

Magyarországon található, burkolt felszállópályával rendelkező katonai repülőterekről és az ezekhez tartozó zajterhelésről megállapítható, hogy a repülőterek üzemeltetői az előírásoknak megfelelően törekedtek a zajterhelés csökkentésére, melynek során zajvédő sávokat alakítottak ki, szabályozták a fel-és leszállások irányát, a kiképző repülések számát, valamint időbeni végrehajtását. A katonai repülőterek funkcionalitását tekintve eltérnek a polgári repülőterektől, de itt is számolnunk kell a környezetei zajterheléssel, amely a katonai feladatok ellátása miatt nehezen csökkenthető. Összességében elmondható, hogy a hazai katonai reptereink minden lehetséges módon csökkenteni próbálják a zajt, de a hatóságoknak és a lakosságnak is nagy szerepe van ebben a kérdésben.

A repülőterek életünk részévé váltak, szükség van rájuk, együtt kell élnünk a velük járó zajjal, de törekedni kell a zajterhelés csökkentésére, amelyben szerepe van a fenntartóknak a hatóságoknak és az állampolgároknak egyaránt. Az állampolgárokat motiválni kell, hogy ezen a téren is fejlesszék az öngondoskodásukat. Törekedni kell a lakosság lakóhely választási szokásainak megváltoztatása, az öngondoskodás fejlesztésére és annak tudatosítására, hogy önmaguknak is tenniük kell az életminőségük javítása érdekében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Tulipánt Gergely: A közúti és vasúti áruszállítás zajkibocsátásának elemzése és a zajterhelés csökkentési lehetőségeinek vizsgálata. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2007. Doktori disszertáció.231.o.

[2] Póta Györgyné: Zajosak vagyunk. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest. 2006. 24.o.

[3] Virág László: A Debreceni Nemzetközi Repülőtér zajmonitoring rendszere, zajvédő zónák kijelölésének szükségessége, tekintettel a növekvő légi forgalomra. Agrártudományi közlemények, 2013/51. pp.191-194.

[4] Munkácsi Zsuzsa - Muntag András és mtai.: A légiközlekedési zaj tulajdonságai és terjedésének vizsgálata a Budapest-Ferihegy nemzetközi repülőtér környezetében. Repüléstudományi Közlemények Különszám, 2010. április 16. 24.o.

[5] Czelnai Rudolf: Bevezetés a meteorológiába I. Budapest, ELTE Eötvös Kiadó, 1995.

[6] Robert D. Behr- Eugene M. Reindel: Helicopter Joise Analysis for University of California San Francisco Mission Bay Hospital Site. HMMH Report No. 302300, 2008.

[7] Bera József: Repülőtér- használat és zajterhelés összefüggései a repülőképzésben. Repüléstudományi közlemények, XXII. évf. 2. különszám, 2010., pp. 1-12.

[8] Bera József: Légiközlekedés környezetbiztonsági kérdéseinek komplex modellezése a repülési zaj tükrében. Doktori (PhD) értekezés, Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, 2015.

[9] Csermely Ildikó (2015): Területfelhasználás és környezetvédelmi szabályozás a légiközlekedésben. Repüléstudományi Közlemények. XXVII. évf. 1. szám, 2015, pp. 161-166.

[10] Csermely Ildikó, Sobor Ákos: Európai repülőterek terület felhasználással összefüggő zajvédelmi intézkedései. Repüléstudományi Közlemények, XXIII. évf. 2. sz., pp. 2011, 1-11.

[11] 1995. évi XCVII. törvény a légiközlekedésről
[12] 280/2004. (X.20.) Korm. rendelet a környezeti zaj értékeléséről és kezeléséről
[13] Hadtudományi lexikon: Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 1995, ISBN 963 04 5226 X, 1191. oldal.
[14] Tóth Rudolf: „Repülőtér karbantartás" c. tantárgy, (tantárgy kód: FTZNEBK 414956) I. tárgykör 1. téma, előadás, 1–60 dia.
[15] Szabó József: A magyar katonai repülés centenáriuma. Hadtudomány- A Magyar Hadtudományi Társaság Folyóirata. 2010. http://mhtt.eu/hadtudomany/2010/2010_elektronikus/2010_e_11.pdf (2018.01.21.)
[16] Kecskeméti MH 59. Szentgyörgyi Dezső repülőbázis bemutatása:
[17] http://www.mh59.hu/rovatok/hu/bazis/tortenelem/ (2017.05.20.)
[18] Bándi Gyula: Környezetvédelmi kézikönyv. KJK-KERSZÖV Jogi és Üzleti Kiadó, Budapest, 1999. 358.o.
[19] Pápai Repülőtér bemutatása:
[20] https://honvedelem.hu/szervezet/mh_papa (2017.05.20.)
[21] MH 86. Szolnok helikopterbázis bemutatása:
[22] http://lhsn.hu/mh-86-szolnok-helikopter-bazis/ (2017.05.20.)
[23] 176/1997. (X. 11.) Kormányrendelet a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének szabályairól
[24] 27/2001. (XI. 23.) HM rendelet az állami repülések céljára szolgáló repülőtér és a katonai repülés céljára földön telepített léginavigációs berendezés üzemben tartásának feltételeiről
[25] Bite Pál, Bite Pálné: Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér Stratégiai Zajvédelmi Intézkedési Terve 2013-2022. Budapest 2013. május Vibrocomp Kft. 42 o.
[26] Hornyacsek Júlia, László Erika: A hulladéklerakás környezetterhelő hatásai és az ellene való védekezés lehetőségei a településeken és a védelmi szférában. Bolyai Szemle, 2015. 2. sz. pp.153-173.
[27] Antal Örs: Az árvizek és földrengések okozta katasztrófák káros hatásai elleni hatékony védekezés megvalósításának elméleti és műszaki kérdései a megelőzés időszakában. Doktori értekezés, NKE, 2018

EXAMINING THE NOISE LOAD OF MILITARY AIRPORTS AND EXPLORING SOLUTIONS AND OPPORTUNITIES FOR PROTECTION TO NOISE

Nowadays, we must pay more attention to the increasing environmental noise load, which also includes noise effects in the vicinity of airports. The operation of civil airports is governed by a number of prescripts and regulations, including inter alia measures to reduce noise pollution. In most cases, these provisions do not cover military airports. In this paper, the author examines the noise-related characteristics of civil and military airports , and noise reduction procedures, as well as the role of the population self-care on this issue.

Keywords: *noise pollution, military airports, flight noise, reduce noise pollution, population self-care*

Kretz András
doktorandusz hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola
andras.kretz@gmail.com
orcid.org/0000-0002-5096-6298

András Kretz
PhD student
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Military Technical Doctoral School
andras.kretz@gmail.com
orcid.org/0000-0002-5096-6298

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-02-0487_Kretz_Andras.pdf

Wantuch Ferenc, Krekk Patrik

SZONDÁZÁSI ADATOKON ALAPULÓ SZÉLNYÍRÁS FŐBB SAJÁTOSSÁGAI A LISZT FERENC NEMZETKÖZI REPÜLŐTÉREN

Kutatásunk fő vizsgálata a budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtérre kigyűjtött rádiószondás mérésekre vonatkozik, még rendelkezésünkre állt a HungaroControl Zrt. által működtetett SODAR/RASS azon néhány mérési adatai, amikor alacsonyszintű jet jelenléte feltételezhető, melynek egyik kísérő jelensége lehet a szélnyírás. A magas légköri megfigyelésekből számított maximális szélnyírás értékeket 2012 és 2016 között végeztük el. A számításhoz C nyelvű programot írtunk, melynek segítségével az öt éves rádiószondás mérésekből álló adatbázisunkban reprezentálva, a maximális szélnyírási értékek és a hozzájuk tartozó azon rétegmagasság kezdete és vége szerepelt, ahol a szélnyírási értékek a legnagyobbak voltak a vizsgált magasságig. A vizsgálatunk befejezése után képet kaptunk a szélnyírás sajátosságairól, azaz mely magassági tartományban fordul elő a leggyakrabban, az erősségének intenzitásáról és éves menetének alakulásáról.

Kulcsszavak: *rádiószonda, szondázási adatok, szélnyírás, alacsonyszintű jet, szinoptikus klimatológiai leírás*

BEVEZETÉS

Alapvetően az mondható el, hogy a szélnyírás előrejelzése igen nehéz. Az előrejelzést nagy mértékbe nehezíti a területi és időbeli kiterjedésének kaotikussága, hiszen a korábbi kutatásokból, mérésekből az mondható el, hogy maga a jelenség kiterjedése kicsi, rövid ideig tartó mezo- vagy mikroléptékű folyamat [1]. A repülésmeteorológiában a veszélyes paraméterek közé tartozik. A hasonló témájú kutatások eredményeiből kiderült, hogy a nyíróerő nagysága hatással van a légi járművek fel- és leszállásaira, hiszen a hirtelen megváltozott szélirány és sebesség miatt megváltoznak az emelőerők és a repülőgép mozgási iránya is [3]. Vizsgálatunk fontosságát és maga a jelenség megismerését erősítette, hogy a légi járművek fokozottan érzékenyek a szél hatására, főképpen a magassággal történő sebesség és irány hirtelen megváltozására. Valamint a folyamatosan elterjedő hobbi vagy későbbiekben robbanásszerű kereskedelemi és ipari felhasználású drónok megjelenése is igényelni fogja a pontosabb meteorológiai paraméterek előrejelzését.

A SZÉLNYÍRÁS ÁLTALÁNOS JELLEMZÉSE

Tulajdonképpen a szélnyírás mindig jelen van a légkörben, ez vizuálisan is tapasztalható, mikor a különböző magassági szinteken lévő felhők alapjainak mozgási irányai eltérnek egymástól. Szélnyírásról akkor beszélünk, ha a szél sebessége és/vagy iránya hirtelen megváltozik a magassággal [4].

A szélnyírás kialakulása sok folyamat révén is ki alakulhat, mint például alacsonyszintű jet, front, erős hőmérsékleti inverzió, de a leggyakoribb előfordulása a konvektív viharok esetében jellemző.

Szélnyírás csoportosítása

Ha a szélnyírást akarjuk csoportosítani, akkor alapvetően háromféle szélnyírást tudunk megkülönböztetni:

- függőleges szélnyírás: a szélvektorok magassággal történő megváltozása;
- vízszintes szélnyírás: a szélvektorok vízszintes irányú megváltozása
- le- és feláramlási szélnyírás: amikor a szélvektor függőleges komponensében történik változás

A légi járművekre gyakorolt megközelítésből is lehet osztályozni a szélnyírást, ez esetben így néz ki:

- szembeszél-szélnyírás: ekkor a jármű levegőhöz viszonyított sebessége nő, így emelkedni fog;
- hátszél-szélnyírás: ekkor a jármű levegőhöz viszonyított sebessége csökken, így süllyedni fog;
- oldalszélnyírás: ilyenkor a gép az oldal iránytól függően jobbra vagy balra fog sodródni
- le- és feláramlási: ekkor emelkedik vagy süllyed, attól függően, hogy az áramlásban lévő nyírás milyen irányú [1].

Szélnyírás nagyságának csoportosítása

Az általunk kapott értékeket a WMO, valamint az ICAO által előírt erősségi határok szerint csoportosítottuk. Ezen belül is a méterenkénti változás alapján.

A szélnyírás nagysága	
m/sec/30 m	m/sec/1 m
0–2	0–0,067
2–4	0,068–0,138
4–6	0,139–0,206
>6	>0,206

1. ábra Szélnyírás nagyságának csoportosítása [2]

Mértékegysége

Gyakorlatban a mértékegységét nehéz értelmezni és a személyzetnek is nehezen értelmezhető. A mértékegységét ms^{-1}/m-ben szokták megadni, viszont ennek egyszerűsített formájával is lehet találkozni, mikor egyszerűsítik s^{-1}-re, de nem szokták célszerűnek tartani használatát [1].

Előrejelzésének fontossága

Mint minden veszélyes meteorológia paraméternek, köztük a szélnyírásnak is nagyon fontos az előrejelzése. Mivel egy igen nehezen előre jelezhető paraméterről beszélünk, így bármilyen információ fontos lehet róla. Másrészt, ha megnézzük a repülőbaleseteket, akkor láthatjuk, hogy nagy része le, illetve felszálláskor történt. Valamint a napjainkban elterjedő drónok használata is egyre gyakoribb. A drónok méretét nézve találkozhatunk, igen nagyméretű és súlyú típusúakkal is, melyek lezuhanása szintén nagy veszélyt jelenthetnek. Így a drónt használó személyek számára is fontos lehet e veszélyes időjárási paraméterre vonatkozó információk. Kutatásunk további részeiben ismertetjük részletesebb eredményeink, de előjáróban annyit, hogy a legnagyobb szélnyírási értékek a néhány száz méteres tartományban történtek, és az előzőekben említett le- és felszállások, valamint a drónok tekintetében is, igen meghatározó ez a magassági tartomány.

FELHASZNÁLT ADATOK

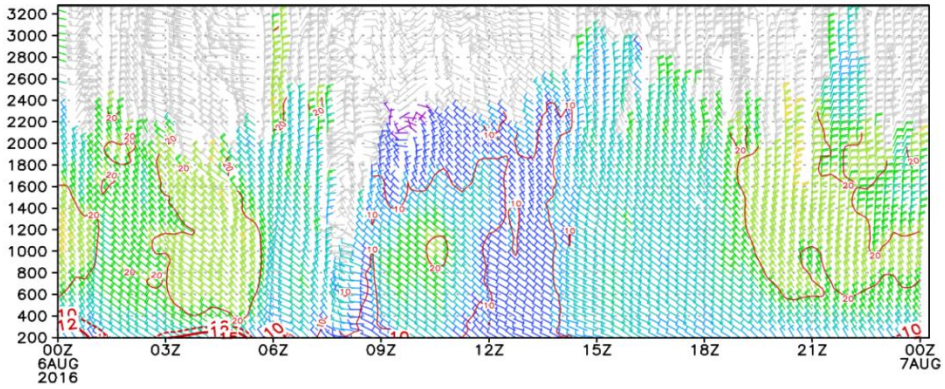
Rádiószondás adatok

Kutatásunk főképpen a rádiószondák által mért adatokra alapul, melyeket a Wyomingi Egyetemen publikusan közzétett pestszentlőrinci (állomás száma: 12843) méréseket használtuk fel.

Számításunkban mind a 00 UTC és a 12 UTC időpontokban felengedett szondázási adatokat felhasználtuk 2012 és 2016 között.

SODAR/RASS adatok

A HungaroControl Zrt. által hozzájutottunk olyan napi összefoglaló adatokhoz (lásd 2. ábra), ahol jelentkezett Low-Level-Jet hajlam, melynek hatására alacsony szinten lévő szélnyírás feltételezhető.



2. ábra SODAR/RASS napi összefoglalója 2016. augusztus 6-án

A szondázási adatokból felhasznált paraméterek ismertetése a létrejött adatbázisban

Számunkra az amerikai Wyomingi Egyetem által közzétett szondázási adatokból a különböző magasságokban uralkodó szélsebesség és annak iránya volt a fontos, valamint a magasságok közötti különbség, azaz a rétegvastagság. Tehát az általunk készített program ezen felhasznált paraméterekből számította a maximum szélnyírást a vizsgált magasságig. Esetünkben a vizsgálati magasság 4000 méterig történt, de a magasságot külső paraméterként adtuk meg, mely bármikor változtatható. A program lefutása után a következőképpen nézett ki adatbázisunk:

Budapest 2016 január 14 12Z 0.03 599 634 35

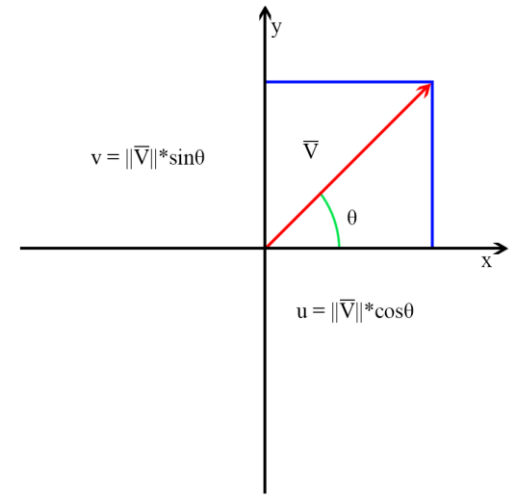
- állomásnév: Budapest;
- év: 2016;
- hónap: január;
- nap: 14;
- idő: 12Z;
- maximum szélnyírás: 0,03;
- kezdete: 599 méter;
- vége: 634 méter;
- rétegvastagság: 35 méter.

A SZÁMÍTÁS ISMERTETÉSE

A nyírás kiszámítására a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet által publikált alacsony szintű szélnyírás kézikönyvében két számítási módszert mutat be, melyeket ennek alapján szeretnénk röviden ismertetni [4]. A programunk megírása során a komponensekből meghatározott nyíróerő számítási módszert használtuk fel.

Komponensekből

Ennél a módszernél a szelet matematikailag egy vektornak vehetjük, melyet felbontunk **u** és **v** komponensekre. (lásd 3. ábra)



3. ábra Szélvektor u és v komponensekre való bontása

Ahogyan a 3. ábrán is látható az u komponens párhuzamos az x tengellyel a v komponens pedig az y tengellyel. Komponens vektorokat akkor tudjuk megadni, ha van szélsebességünk és szélirányunk. Így ezt a következőképpen tudjuk kiszámolni:

$$u = ws * \cos(\theta) \quad (1)\ [4]$$

$$v = ws * \sin(\theta) \quad (2)\ [4]$$

Ahol théta (θ) a szél iránya, a ws pedig a szélsebességét jelenti.

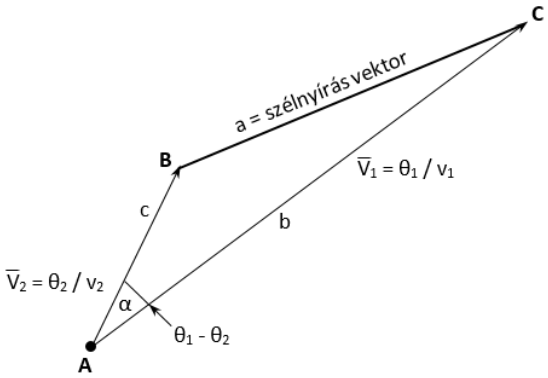
Tehát vesszük mindkét magassági pont szélvektorának kelet/nyugat és észak/dél komponenseit, majd ezután vesszük a magassági pontok kelet/nyugat és észak/dél komponenseinek vektor különbségeit. A kapott két vektor különbségből tudjuk megadni a különbség nagyságát a következőképpen:

$$V_2 - V_1 = \sqrt{(x_1)^2 + (x_2)^2} \quad (3)\ [4]$$

Ahol ''x_1'' a kelet/nyugat komponensek vektor különbsége ''x_2'' pedig az észak/déli komponensek különbsége. A komponensek -/+ előjelei a következőképpen értelmezhetőek a meteorológiában; ha az u értéke pozitív, akkor a szél nyugatról fúj, ha pedig értéke negatív, akkor keletről és ugyan ez elmondható a v komponensről is, ha v értéke pozitív, akkor dél irányból, ha negatív, akkor északi irányból fúj.

Trigonometria által

A trigonometriai egyenlet, az ábránk esetében, a következő:



4. ábra Szélnyírás vektor kiszámítása [4]

$$a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \times \cos\alpha} \qquad (4)\ [4]$$

Ahol az ''a" a vektorkülönbség nagysága, azaz a nyíróerő, ''b'' az egyik magassági pontban ismert szélvektor nagysága, ''c'' a másik pont ismert szélvektor, ''α'' pedig a két ismert vektor által bezárt szög. Ahhoz, hogy a két vektor nagyságát ki tudjuk számítani, ismernünk kell a két magassági pontban lévő szélsebességet és annak irányát. Az ismert szöget pedig a két magassági pontban lévő szögek különbsége adja meg.

EREDMÉNYEK

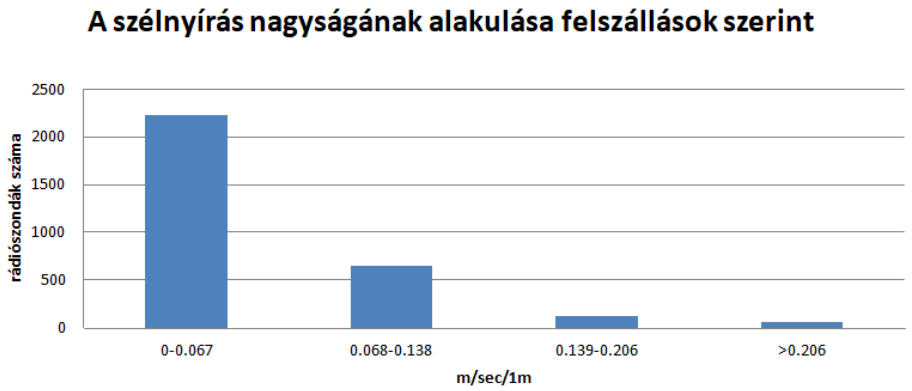
Eredményeinkből kimatatható, hogy a legtöbb szélnyírás a gyenge és a mérsékelt kategóriába estek. Az nagyon erős szélnyírások kizárólag az alsó légrétegben fordultak elő. Kimutathatóvá vált, hogy az erős és a nagyon erős nyírások a minél kisebb rétegvastagságban a legnagyobbak. A szélnyírások átlagos erőssége a gyenge kategória alsó határának felel meg. Többnyire a legnagyobb szélnyírások pedig a 00 UTC rádiószondás méréseknél jelentek meg.

A kiszámított szélnyírási értékek alakulása 2012 és 2016 között

Célunk az volt, hogy minél többet megtudjuk az általunk vizsgált több mint 3000 magas légköri mérésből számított maximális szélnyírási értékekről. A következő ábra világosan mutatja, hogy a vizsgált szélnyírások döntő hányada az elfogadott és Bodolai (1983) által is felhasznált csoportosítás szerint történt.

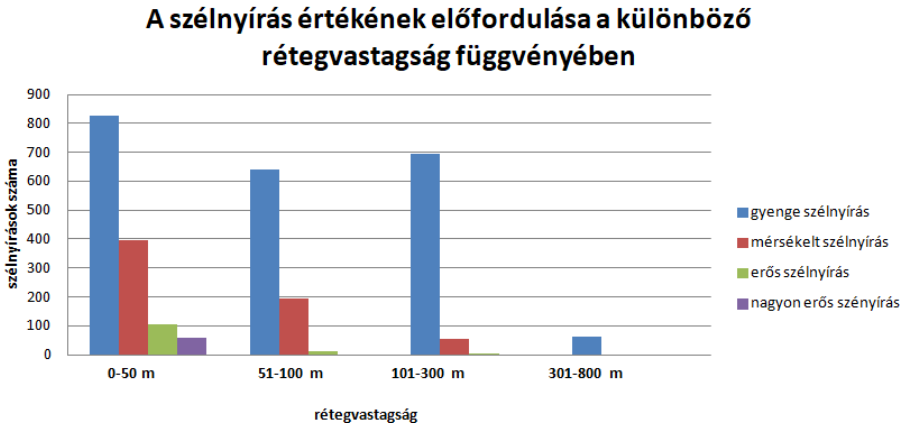
Megjegyzésként annyit, hogy a legnagyobb szélnyírási érték alatt, azt az értéket értjük, amely a vizsgált 4000 méteres tartományban a legmagasabb volt.

Teljes mértékben elmondható az 5. ábráról, hogy a vizsgált magas légköri mérésekből számított szélnyírások döntő hányada a gyenge és a mérsékelt kategóriában található, alig fordult elő erős vagy nagyon erős nyírási érték.



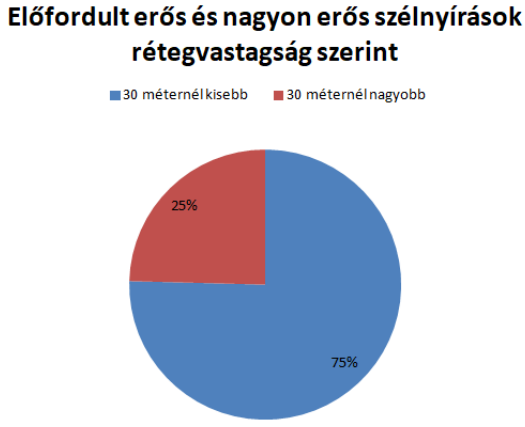
5. ábra Szélnyírás nagyságának előfordulása számszerűsítve

Hasonlóan ehhez a kontextushoz vizsgáltuk, hogy az eltérő nagyságú szélnyírások értékeit, hogyan befolyásolja a rétegvastagság változása. Számunkra az erős és a nagyon erős kategóriájúak változása volt valamelyest érdekes, hiszen látni fogjuk, hogy minél kisebb a rétegvastagság, annál gyakoribb az erős és nagyon erős nyírások száma (lásd 6. ábra).



6. ábra Szélnyírás értékének előfordulása a különböző rétegvastagságok szerint

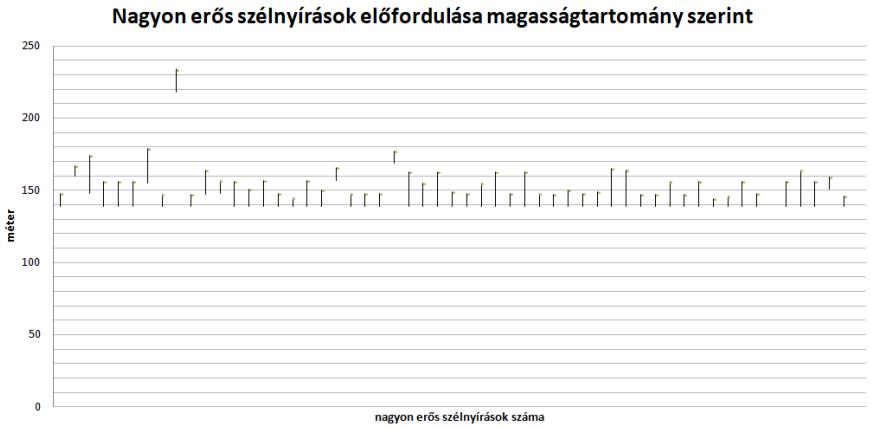
A 6. ábrán kirajzolódik, hogy az előfordult gyenge (kék) és mérsékelt (piros) nyírási értékek szinte minden rétegvastagságban előfordulnak. Ugyanez már nem mondható el a következő két kategóriáról. Az erős (zöld) szélnyírások előfordulása szinte az 50 m-nél kisebb rétegvastagságban fordul elő, a nagyon erősek (lila) pedig kizárólag jóval 50 m-nél kisebb rétegvastagságban.



7. ábra Előfordult erős és nagyon erős szélnyírások százalékos gyakorisága rétegvastagság szerint

Tovább szűkítve a rétegvastagságot 30 m-re, akkor a kördiagram (7. ábra) alapján láthatjuk, hogy az erős és nagyon erős értékek 75% ebben a vastagsági tartományba esik bele. A 30 m-es rétegvastagság választását az indokolta, hogy az ICAO közléseiben ez a kritikus vastagságot említik. Így a légi járművekre ebben a vastagsági intervallumban történő változás jelenti a legnagyobb veszélyt [1]. A kördiagram megerősíti azt, hogy valóban az erős és nagyon erős szélnyírások is inkább a 30 m-nél kevesebb rétegvastagságban alakulnak ki.

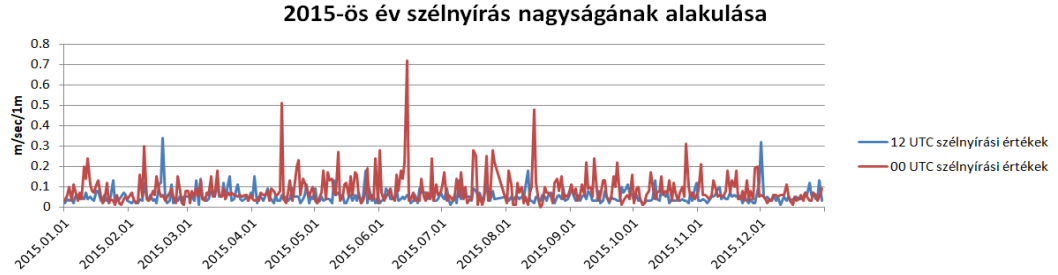
Megvizsgáltuk a nagyon erős szélnyírások előfordulásának a helyét a magasság függvényében, melyből kiderült, hogy egy-két eset kivételével szinte csak az alsó pár száz méteres rétegben fordultak elő (lásd 9. ábra).



Előző ábrákon láthattuk, hogy az erős szélnyírások 30 m-es vastagságon belül történnek, melyet a 9. ábra is megerősíti.

Mivel számításainkat a 00 UTC és a 12 UTC időpontban is elvégeztük, így rálátást kaptunk arról, hogy a szélnyírás éves menete miképpen alakul és mennyiben tér el egymástól a két időpontban kiszámolt értékek alakulása.

8. ábra 2016-os 00 UTC (piros) és 12 UTC (kék) szélnyírások nagyságának alakulása



9. ábra 2015-ös év 00 UTC (piros) és 12 UTC (kék) szélnyírások nagyságának alakulása

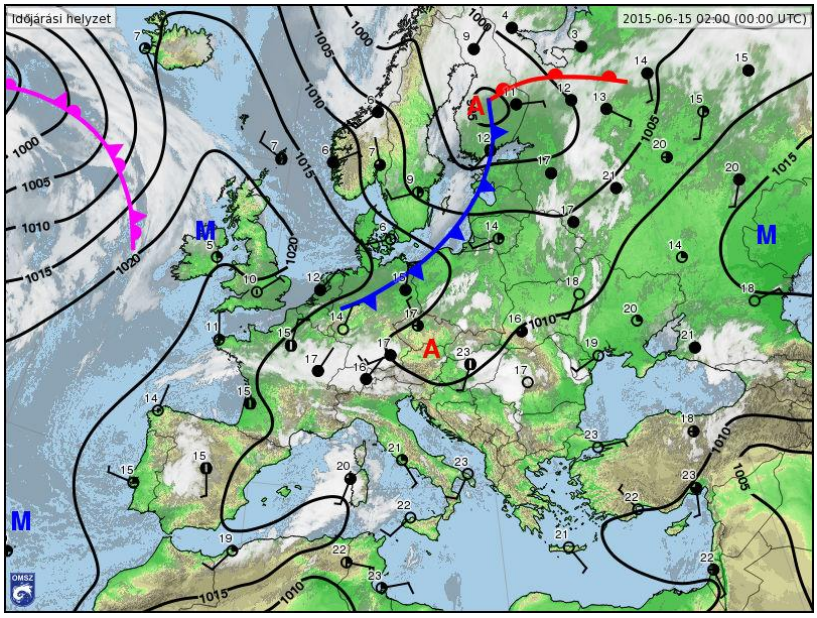
Mindkét évnek a menetéről azt lehet mondani, hogy a 00 UTC szondázási adatokból számított nyírási erősségek értékei az esetek többségében gyakrabban fordul elő a 12 UTC adataival szemben. Mind két évben, mint ahogy az előző ábrákon is látszik (8. és 9. ábra), hogy az év nagy részében a gyenge és a mérésékelt kategória között mozog.

ESETTANULMÁNY

2015.06.15 00 UTC

Tekintsük meg a 2015-ös év menetét (9. ábra). Látható néhány kiugróan magas érték a program számításából adódóan. Látjuk, hogy a maximum érték 2015. június 15-én 00 UTC-kor történt, melynek értéke 0,72 m/sec/1m.

Szinoptikus helyzet



10. ábra Időjárási helyzet Európában, 2015.06.15 00 UTC [5]

Időjárási helyzet Európában

A skandináv-félsziget időjárását meghatározza az örvénylő ciklon Finnország felett, valamint a kontinens középső területeinek egészét. A térség nagy részén borult az időjárás, több helyen csapadék a jellemző, illetve záporok, zivatarok alakulnak ki. A hőmérséklet a június közepén megszokottak közelében Finnországban 13, 18 fok között, Stockholm környékén 20 fok körül, míg Németország északi felén 15 és 20 fok között alakul. A ciklon előoldalán Görögországtól egészen Szentpétervárig meleg, nedves szállítószalag húzódik, így Európa keleti felén nyáriasan meleg az idő, ugyanakkor délutánonként az erőteljesebb nappali gomolyfelhő-képződésből mind több helyen alakul ki konvektív csapadék. A Kárpát-medence fölött hidegfront vonul át kedd estig, valamint megszűnik a hőség keleten és több helyen várható zápor és zivatar [5].

Magyarország időjárása

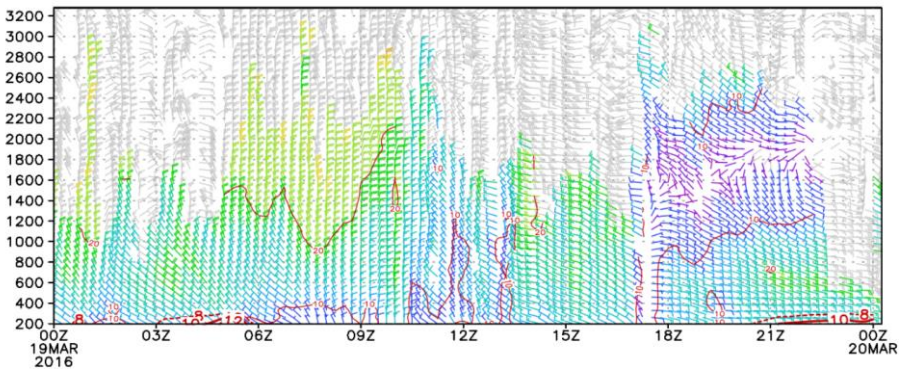
A gomolyfelhőzet ellenére sok napsütés várható vasárnap, és északkeleten szórványosan alakulhatnak ki záporok, zivatarok is. Másutt csak néhol fordult elő gyenge zápor, egy-egy zivatar.

A hőmérséklet csúcsértéke 29 és 35 fok között változott. Éjszaka délnyugat felől több hullámban zivatarrendszerek vonultak északkelet felé [5].

Tehát a labilis rétegződés és a konvektív folyamatoknál tapasztalható szélnyírás feltételezhető, mely ebben az esetben igen magas értéket produkált. Sajnos a SODAR/RASS adatokkal nem tudtuk összehasonlítani a szonda mérését, mert ezek az adatok 2015.december 1-től állnak rendelkezésre. A szonda felszállásból kivehető a szélerősödés, hiszen 13 csomós szélerősödés történt alig 10 méteren belül.

2016.03.19 00 UTC

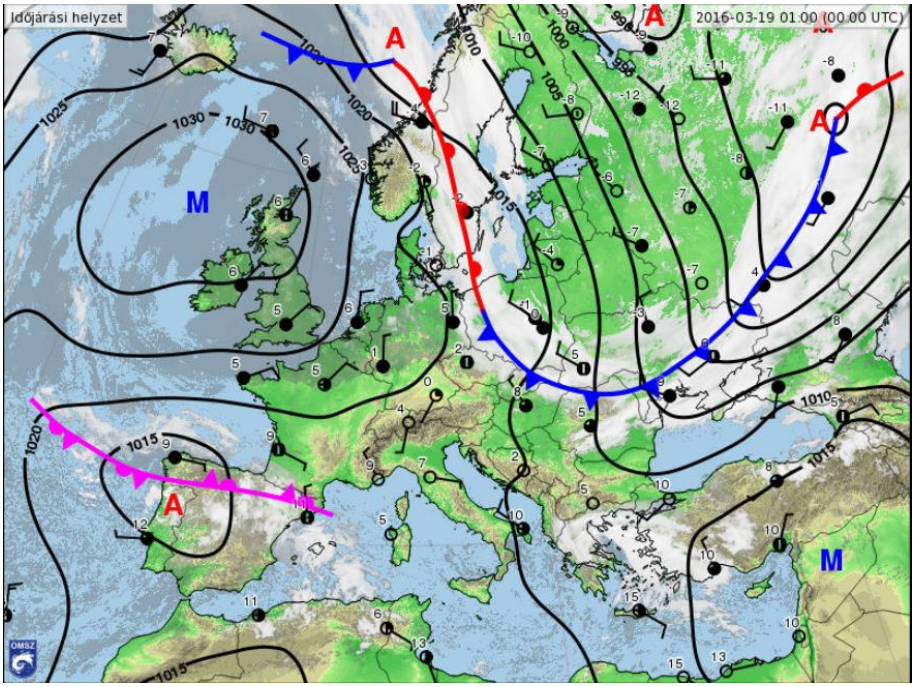
A következő esett a SODAR/RASS mérési eredményei miatt lett megvizsgálva. Az 11. ábra alapján feltételezhető az alacsony szintű jet hajlam.



11. ábra 2016. március 19 SODAR/RASS napi összefoglaló

Mivel az alacsony szintű jet kísérő jelensége lehet a szélnyírás, így kíváncsiak voltunk, hogy a feltételezhető szélnyírás milyen erősséggel jelenik meg ebben az esetben.

Szinoptikus helyzet



12. ábra Időjárási helyzet Európában, 2016.03.19 00 UTC [5]

Az időjárási helyzet Európában

Magasnyomású képződmény alakítja az időjárást a Brit-szigetektől teljesen az Appennini-félszigetig. Az anticiklon területén az északi tájakon több, délen kevesebb a felhő, így több a napsütés és számottevő csapadék szinte sehol nem fordul elő. Valamint Északkelet-Európa fölött több középpontú ciklonrendszer helyezkedik el, ezáltal erősen felhős az és, arrafelé gyakran erősen felhős az ég, a hozzá tartozó frontok mentén záporok, északabbra hózáporok alakulnak ki. Sekély ciklon található a Pireneusi-félsziget fölött, emiatt ott is sok a felhő, több helyen esik az eső, és az ilyenkor megszokottnál több fokkal hűvösebb van. A legmagasabb nappali hőmérséklet szárazföldünk északi, északkeleti részén többnyire 0, -6, középső tájakon 3, 12 fok között változik. A 47. szélességi körtől délre enyhébb az idő, itt a kora délutáni órákra általában 10 és 18 fok közé melegszik fel a levegő, sőt Gibraltár térségében néhol 20 fokot is mérnek. Vasárnap estig a Kárpát-medence fölé az elvonuló hidegfront mögött átmenetileg enyhébb, kissé szárazabb léghullámok érkeznek [5].

Magyarország időjárása

Pénteken országszerte napos idő volt, csak délután növekedett meg északkeleten a fátyolfelhőzet. Csapadék sehol sem fordult elő. Megélénkült, helyenként meg is erősödött a nyugati szél. A hőmérséklet csúcsértéke 12 és 16 fok között alakult. Éjszaka főként északon, északkeleten növekedett meg a fátyolfelhőzet, csapadékról nem érkezett jelentés. Hajnalra általában –2 és +6 fok közé hűlt le a levegő. Délelőtt az ország délnyugati harmadában sütött a nap, másutt felhős volt az ég. A hőmérséklet 11 órára 3 és 14 fok közé emelkedett, északkeleten mérték a hidegebbet [5].

A rádiószondák méréseiből készített adatbázisunkban, ebben az esetben a szélnyírás a gyenge kategóriába esett. Ennek okát a rádiószonda mérési sűrűségében találtuk. A következő 13. ábra a szonda méréseit mutatja.

12843 Budapest Observations at 00Z 19 Mar 2016

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	109									
996.0	139	8.4	-0.6	53	3.69	340	4	281.9	292.4	282.5
970.0	359	8.8	-2.2	46	3.37	345	19	284.4	294.2	285.0
925.0	753	6.6	-2.4	53	3.48	350	21	286.1	296.2	286.6
899.0	985	4.7	-4.0	53	3.19	355	27	286.4	295.8	287.0
850.0	1440	1.0	-7.0	55	2.67	340	23	287.2	295.1	287.6
842.0	1515	0.4	-7.3	56	2.63	340	21	287.3	295.2	287.8
780.0	2123	-4.6	-9.8	67	2.33	325	35	288.3	295.3	288.7
774.0	2184	-5.1	-10.1	68	2.30	319	33	288.4	295.4	288.8
770.0	2225	-3.4	-21.7	23	0.88	315	31	290.7	293.6	290.9
768.0	2246	-2.5	-27.5	13	0.52	316	31	291.9	293.6	291.9
762.0	2308	-2.1	-35.1	6	0.26	319	30	292.9	293.8	293.0

13. ábra Szonda mérési adatai, 2016. március 19 00 UTC [6]

Tehát mind két mérési eszközből kirajzolódik a markáns szélsebesség változás. Viszont annak oka, hogy a szélnyírás a gyenge kategóriába esett, az a rádiószonda mérési sűrűségében keresendő, hiszen látjuk a 13. ábrán, hogy az első adatunk 139 m-ről a második pedig 359 m-ről jött, miközben a SODAR/RASS adataiból látható, hogy a 20 csomós sebesség már alacsonyabb vastagságon bekövetkezett. Viszont, ha tényleg csak a szonda adataival számolunk, ahol a 220 méteres rétegvastagsággal számolva valóban a gyenge kategóriát kapjuk meg. Ezért a

SODAR/RASS méréseivel kiegészítve az adatokat, szintén számoltunk egy szélnyírás erősséget és a nyírás erőssége a mérsékelt kategóriába esett. Így ebben az esetben is látható, hogy mennyire befolyásolja a rétegvastagság a nyíró erő nagyságát.

KONKLÚZIÓ

Összességében a vizsgálatunkból elmondható, hogy a szélnyírás fontosabb tulajdonságait összefoglaltuk. Ismertettük a szélnyírás főbb sajátosságait. Kiderült, hogy a legerősebb nyírások az alsó néhány százméteres tartományban fordulnak elő, mely erősíti pontosabb előrejelzésének fontosságát. Láthattunk, hogy minél kisebb rétegvastagságon belül történik markáns változás, annál nagyobb az erős és nagyon erős szélnyírások előfordulási valószínűsége. 2012 és 2016 között történő mérési eredményeinkből láthatóvá vált, hogy döntő részben a gyenge szélnyírások előfordulása a leggyakoribb. Eredményeinkkel szeretnénk támogatni szélnyírás pontosabb előrejelzésének fontosságát, és repülésmeteorológiai szempontból is fontosnak tartjuk kapott eredményeinket.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] SÁNDOR Valéria, WANTUCH Ferenc: Repülésmeteorológia, Budapest, 2005, pp 154-155, pp 160.

[2] BODOLAI István: A planetáris Határréteg főbb sajátosságai. Országos Meteorológiai Szolgálat kisebb kiadványai 52. szám, Budapest, 1983.

[3] International Civil Aviation Organization (ICAO): Manual on LowLevel Wind Shear,2005 url: https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/2194.pdf

[4] George Mason University, Virginia Weather and Climate Data Development Web Site, url: http://colaweb.gmu.edu/dev/clim301/lectures/wind/wind-uv

[5] Országos Meteorológiai Szolgálat, Napijelentés kiadvány, url: http://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/

[6] University of Wyoming, Department of Atmospheric Science, url: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

MAIN CHARACTERISTICS OF WINDSHEAR BASED ON ATMOSPHERIC SOUNDINGS DATA AT LISZT FERENC INTERNATIONAL AIRPORT

The main point of our research concerns the measurement details of the radiosonde found in Liszt Ferenc National Airport, Budapest. We also had some data from SODAR/RASS (operated by HungaroControl Zrt.), that assume the presence of low-level-jet, to which windshear can be a concomitant phenomenon. Between 2012 and 2016 we calculated the maximal amount of windshear with the help of our observation regarding high atmosphere. To this calculation we created a C-language program in which we produced a database of 5 years' radisonde measurements. It contains the maximal amount of windshear with the belonging layer height from the starting point to the end, where the windshear was the highest till the height we examined. After finishing the study we got a description of the windshear; in which height range it occurs the most often, how strong it is and when it appears during the year.

Keywords: *radiosonde, sounding data, low-level jet, synoptical climatological description*

Krekk Patrik egyetemi hallgató Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék krekk.patrik@gmail.com orcid.org/0000-0002-1878-5745	Krekk Patrik Student National University of Debrecen Faculty of Meteorology krekk.patrik@gmail.com orcid.org/0000-0002-1878-5745
Dr. Wantuch Ferenc (PhD) meteorológus Nemzeti Fejlesztési Minisztérium Közlekedési Hatósági Ügyekért Felelős Helyettes Államtitkárság Légiforgalmi és Repülőtéri Hatósági Főosztály wantuch.ferenc@nfm.gov.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527	Dr. Wantuch Ferenc (PhD) meteorologist Ministry of National Development Deputy State Secretariat for Transport wantuch.ferenc@nfm.gov.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_ENVIRON" nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-03-0462_Krekk_Patrik-Wantuch_Ferenc.pdf

Ondrék József

NEMZETKÖZÖSSÉGI LÉGI SZEREPVÁLLALÁS A MALÁJFÖLDI FELKELÉS LEVERÉSÉBEN

A malájföldi kommunista felkelés és annak leverése napjainkban már nem része a köztudatnak és ha valaki a téma iránt érdeklődik, akkor is elsősorban Nagy Britannia szerepével és a brit Királyi Légierő légi hadműveleteivel találkozhat. Kevéssé ismert, hogy a Nemzetközösség másik két állama, Ausztrália és Új-Zéland is aktívan részt vett a sikeres felkeléselleni háború megvívásában, és ebben a harcban fontos szerepet töltöttek be az adott államok légierői. Tanulmányomban, egy rövid történelmi háttér felvázolása mellett, bemutatom azokat a biztonságpolitikai tényezőket, amelyek a két nemzetközösségi államot a malájföldi beavatkozásra késztették, majd ismertetem az Ausztrál Királyi Légierő és az Új-Zélandi Királyi Légierő szerepvállalását a felkeléselleni műveletekben 1948 és 1960 között.

Kulcsszavak: *malájföld, felkelés, hidegháború, aszimmetrikus hadviselés, Ausztrál, Új-Zélandi Királyi Légierő, Firedog hadművelet*

BEVEZETÉS

A történelem folyamán mindig is különös fontossággal bírt Ausztrália és Új-Zéland számára is a délkelet-ázsiai régió. A nagy földrajzi felfedezések és a gyarmatosítás idején ez a régió szolgált „ugródeszkaként" a *Terra Australis Incognita*, azaz az ismeretlen déli földrész eléréséhez. Később, az Első Flotta Ausztráliába érkezését és a Délkelet-Ázsia gyarmatosítását követően ez a kapcsolat még szorosabb és összetettebb lett. Egyrészt Ausztrália és Új-Zéland is jó kétoldalú kereskedelmi kapcsolatokat alakított ki ezzel a nyersanyagban gazdag régióval, másrészt pedig mindkét állam védelmi biztosítékként tekintett a brit korona délkelet-ázsiai gyarmataira. Mivel a brit uralkodók a világ túlsó végén, Londonban uralkodtak, ezért őfelsége előretolt katonai bázisai, különösen Malájföldön és Szingapúrban voltak a brit érdekek képviselői Földünk ezen részén, és ezek működtek biztosítékként Ausztrália és Új-Zéland számára is egy külső invázió ellenében. Az iparosodás tovább mélyítette ezeket a gazdasági kapcsolatokat, és különösen Ausztrália esetében vált kulcsfontosságú partnerré Malájföld, hiszen az ausztrál ipar igényelte az olcsó maláj ón és gumi nyersanyagokat.

Ezt a szoros és kölcsönösen gyümölcsöző kapcsolatot szakította meg a második világháború kitörése Ázsiában. Malájföld és Szingapúr – valamint Holland Kelet-India – eleste nagyságrendekkel csökkente az európai befolyás mértékét ebben a régióban. Ez egy teljesen új biztonsági környezetet eredményezett mindkét domínium számára. Ausztrália, mint önálló államapparátussal rendelkező ország még csak 41 éves múltra tekinthetett vissza 1941-ben, míg Új-Zéland csupán 1907-ben vált koronagyarmatból domíniummá.

A jelen tanulmány célja, hogy megvizsgálja az ausztrál és az új-zélandi légierők szerepvállalását egy olyan konfliktusban, amely meghatározó szerepet töltött be az adott országok második világháborút követő biztonságpolitikájában. Különösen kettőjük közül, a nagyobb szigetország szerepe értékelődött fel a hidegháborús időszakban, mint a nyugati értékek fenntartója és

közvetítője Délkelet-Ázsiában. Ausztrália és Új-Zéland szerepvállalása a malájföldi felkelés elleni hadműveletekben – majd később a vietnami háborúban is – mind alátámasztja ezt, így a malájföldi szerepük különösen fontos. Egyrészt, ez volt az első nagyszabású tengerentúli elkötelezettsége mindkét nemzetnek a második világháborút követően. Másrészt pedig, ez volt az első alkalom, hogy a két ország közül bármelyiknek korlátozott, felkelés elleni (Counterinsurgency Operation - COIN) műveletekben kellett részt vennie, beleértve légierejük ilyen célú alkalmazását is. Végül pedig, azért is fontos a malájföldi események vizsgálata, mert ez a konfliktus alapozta meg a domíniumok vietnámi háborúban betöltött szerepét, a maláj tapasztalatokból mindkét ország levonta a következtetéseket.

A malájföldi felkelés esetében azt is fontos kiemelni, hogy COIN szakértők általában ezt a konfliktust sikerként értékelik. Azon kevés eset közé tartozik, amikor egy politikai indíttatású – jelen esetben kommunista eszméktől fűtött – felkelést sikerrel győztek le a kormánypárti fegyveres erők, és sikerült megnyerniük a lakosság „elméjét és szívét" is. Mind az Ausztrál Államszövetség, mind Új-Zéland viszonylag kevés erőforrást alkalmazott, mégis sok, felbecsülhetetlen értékű tapasztalatot szereztek a COIN műveletek terén, amelyet nemcsak Vietnamban, hanem napjaink bármely aszimmetrikus konfliktusában hasznosítani tudtak. A tanulmány szorosan beleillik a hazai hadtudomány kutatási feladatai közé is, hiszen a magyar hadtudományi kutatásban, oktatásban és alkalmazásban vezető szerepet betöltő munkacsoport többek között a multidiszciplináris kutatási szemléletet hangsúlyozza, és az aszimmetrikus konfliktusok kutatását kiemelt fontosságúnak tartja [1].

AUSZTRÁL ÉS ÚJ-ZÉLANDI BIZTONSÁG- ÉS VÉDELEMPOLITIKA VÁLTOZÁSA A MÁSODIK VILÁGHÁBORÚBAN

Az óceániai nemzetközösségi államok biztonság- és védelempolitikája egy óriási változáson ment keresztül a második világháborúban. Ahogy a bevezetőben már utalva lett rá, Malájföld és Szingapúr eleste – beleértve Brit Királyi Haditengerészet *HMS Prince of Wales* V. György király osztályú csatahajójának, valamint *HMS Repulse* Renown osztályú csatacirkálójának elvesztését, amelyeket nem mellesleg a Japán Császári Légierő bomba- és torpedóvetői süllyesztettek el – eltörölték azt a képzetet, hogy Nagy-Britannia minden körülmények közt képes lesz a Nemzetközösség tagjait megvédeni. Ez már elegendő lett volna, hogy alapjaiban megváltoztassa a két domínium addigi biztonság- és védelempolitikáját, de a japán hadműveletek még egy fokkal jobban nyomatékosították ezt. Az ausztrál döntéshozókat az észak-ausztráliai „Darwin és Broome 1942-es Japán általi bombázása ébresztette rá a (…) Ausztrália sebezhetőségére, és ez kérdőjelezte meg a britek uralmát (…) Ausztrálázsia felett" [2]. Ez az eseménysorozat késztette a politikai vezetőket az 1931-es westminsteri statútum elfogadására, a westminsteri statútum elfogadásáról szóló 1942. évi 56. törvényben [3]. A statútum lehetővé tette a domíniumoknak, hogy a brit parlamenttől függetlenül hozzanak külpolitikai döntéseket, és ez a szimbolikus folyamat jelezte azt, hogy Ausztrália külpolitikájában megkezdte függetlenedését Londontól, és egyre jobban az Egyesült Államokra tekintett, mint elsőszámú katonai szövetséges. Ez egy jelentős, és sok tekintetben váratlan lépés volt, különösen azért mert, amikor John Curtin munkáspárti kormánya hivatalba lépett 1941. október 7-én, akkor Dr. Herbert Vere Evatt külügyminiszter az első parlamenti felszólalásában kihangsúlyozta, hogy nem lesz alapvető változás országa külpolitikájában

[4]. Azonban néhány hónapon belül a külső tényezők hatására, teljesen megváltozott Ausztrália külpolitikája és ezzel együtt részben védelempolitikája is.

Védelempolitika tekintetében viszont azt is meg kell állapítani, hogy bár Nagy-Britanniától az Egyesült Államok felé fordultak az ausztrálok, de koncepció terén megmaradtak a két hivatalosan a világháború között kialakított – de a gyakorlatban már korábban is alkalmazott – kettős védelmi berendezkedésnél. Ez a politika legjobban egy biztosítási szerződésre hasonlított. A hazai szinteken, a Védelmi Erőknek a kontinensnyi ország területének védelmét kellett biztosítania. Ez magába foglalt némi önállóságot és szervezettséget, hogy az esetleges kis létszámú, az ország területére betörő ellenséggel fel tudják venni a küzdelmet [5]. Az 1942-es események azt mutatták, hogy erre a Védelmi Erők csak részben voltak képesek.

A kvázi „biztosítási szerződés" részeként, a hazai Védelmi Erők mellett, fenntartottak egy expedíciós haderőt is, amelynek feladata a Brit Birodalom érdekeinek, vagy adott esetben magának a birodalomnak a védelme egy nagyobb háború esetén [5]. Ugyan hivatalosan csak a két világháború között dolgozták ki ezt a duális védelmi politikát, de gyakorlatilag az ANZAC (Australian and New Zealand Army Corps, Ausztrál-Új-Zélandi hadtest) erők első világháborús alkalmazása (például Gallipolinál) már előfutára volt ennek. Szingapúr és a maláj területek 1942-es eleste ugyanakkor azt mutatta, hogy ez a berendezkedés sem volt megfelelő, az expedíciós haderő nem volt képes megállítani a császári japán csapatokat.

A hibák ellenére mégis kitartottak ezen elgondolás mellett a második világháború alatt, valamint azt követően is, és a kérdések, mint látható, a biztosítékot jelentő szövetséges személye, valamint az expedíciós erők felhasználási helye voltak.

A kisebbik domínium esetében a külső körülmények szinte azonosak voltak, és a védelmi berendezkedés is hasonló volt a Tasmán-tenger túloldalán található testvérállamához. Földrajzi elhelyezkedése miatt, azonban a tengelyhatalmi erők is kevésbé tudták elérni Új-Zélandot, kisebb intenzitással támadták. Ami az ausztráloknál Darwin és az Északi terület bombázása volt, az Új-Zélandon a felszíni és tengeralattjáró hajók támadásai, valamint a szimbolikus jelentőségű átrepülése a Japán Császári Haditengerészet egy gépének Wellington, a főváros, valamint Auckland, a szigetország legnépesebb városa felett. Ennek a bátor, ugyanakkor csekély katonai jelentőségű tettnek név szerint is ismert az elkövetője. Fudzsita Nobu tiszthelyettes, az I–25 jelzésű tengeralattjáró mellől felszállva, Yokosuka E14Y (szövetséges kódnéven *Glen*) típusú felderítő gépével hajtotta ezt végre 1942 márciusában [6]. Az Új-Zélandi Királyi Légierő felkészületlenségét illusztrálja, hogy az egyébként csupán 246 km/órás végsebességű felderítő hidroplánt nem voltak képesek megakadályozni a főváros feletti repülésben [7].

Az 1931-es westminsteri statútumot, Ausztráliával ellentétben, Új-Zéland csak a második világháborút követően ratifikálta, a westminsteri statútum elfogadásáról szóló 1947. évi 38. törvényben [8]. Védelmi politikája így elviekben közelebb állt az anyaországhoz, de a világégés eseményei természetesen őket is az Egyesült Államokkal történő szorosabb együttműködésre késztették.

AUSZTRÁL ÉS ÚJ-ZÉLANDI BIZTONSÁG- ÉS VÉDELEMPOLITIKA 1945-TŐL

A második világháború vége megint alapjaiban változtatta meg a térség biztonság- és védelempolitikáját. Olyan külső tényezők, mint a hidegháborús megosztottság, az első indokínai háború, és különösen a kínai polgárháború biztonságpolitikai veszélyként jelentek meg Délkelet-Ázsiában. Már az első indokínai háború kitörése – amelynek vezetői Ho Si Minh és Vo Nguyen Giap tábornok a felszabadító forradalmi harc maoista elméletét tökéletesen alkalmazták – már hatalmas fejfájást okozott a nyugati hatalmaknak. Azonban a kínai polgárháború elvesztése, és az ország kommunistává válása volt a fő indok a védelmi szövetségek kialakítására Ázsiában. Emellett úgy tűnt, hogy Ausztrália is szerepet szeretne váltani, nagyobb részt vállalni az ausztrál és európai érdekek ázsiai képviseletében, hiszen „a háború előtti elszigetelődés párti gondolkodás (…) szinte teljesen eltűnt. A háború utáni munkáspárti idealizmus, és Ausztrália jövőbeli biztonságával törődés határozta meg a közvetlen a háborút követő külpolitikát” [4].

Bár az 1949-es választások sok mindent megváltoztattak, és a Munkáspártot hosszú időre a Robert Gordon Menzies vezette Liberális párt váltotta fel az ország élén, de a főbb külpolitikai irányvonalak ugyanazok maradtak. Az ausztrál döntéshozók úgy vélték eben az időben, hogy „az Egyesült Államok és Nagy Britannia sem alakított ki pontos Ázsia-politikát. (…) Ezért Délkelet-Ázsia biztonságának súlya, sokkal jobban Ausztráliára fog nehezedni” [4]. Ilyen körülmények között jól látható, hogy az ország miért hagyott fel a korábbi izolacionista politikájával, és kereste a biztonsági szervezetekhez való csatlakozás lehetőségét.

Új-Zéland esetében is az ország védelempolitikájának egyik sarokköve a Délkelet-Ázsia biztonsága iránti elköteleződés [9]. Azonban a részben önálló szerepre törő nyugati szomszéd helyett, a wellingtoni kormányzat a régió biztonságát a Nemzetközösség keretein belül képzelte el biztosítani, és nem akart jobban elfordulni a brit koronától. A háborút követő első Nemzetközösségi Miniszterelnökök Konferenciája 1946-ban meghatározó volt Új-Zéland számára, amely ugyan elvetette a korábbi centralizált védelmi berendezkedés, és sokkal nagyobb hangsúlyt helyezett a tagállamok együttműködésére, de mégis csak nemzetközösségi kereteken belül igyekezett a biztonság szavatolására [10].

Ilyen körülmények közt alakult meg a régió első védelmi szövetsége az ANZAM, amely Ausztrália, Új-Zéland és a maláj területek angol elnevezéséből állt össze. Az 1948-ban létrehozott szervezet fő célja a délkelet-ázsiai kereskedelmi tengeri útvonalak biztosítása volt, „de maga az ANZAM nem egy szerződés volt, hanem a résztvevő államok haditengerészetei közötti egyezmény arról, hogy tengeri kereskedelem biztonságának garantálására vezetési kérdésekben együttműködnek” [11]. Bár a névben maláj területek szerepelnek, 1948-ban a melakai és pinengi gyarmati területek kivételével, a többi tartomány is brit protektorátus alatt állt, így ez egy multilaterális egyezmény volt Nagy Britannia részvételével [12]. A korábbi ANZAC országok tehát nehezen szakadtak el a birodalomtól, de Ausztrália ANZAM szerepvállalása segítette az országot a saját geopolitikai helyének megtalálásában, és abban, hogy a közvetlen környezetében nagyobb részt vállaljon a biztonság fenntartásában [13].

A következő évben a NATO alapítása elindította a nagy regionális, formális védelmi szerződések megkötésének hullámát. Ennek a közvetett délkelet-ázsiai hatása az ANZUS (Australia, New

Zealand, United States) szerződés aláírása lett 1951-ben, Ausztrália, Új-Zéland és az Egyesült Államok között. Ebben a három aláíró fél vállalta, hogy „fenntartja és fejleszti a saját, valamint a közösség védelmi képességeit is" [14]. A későbbi hadműveletek és katonai szerepvállalások mögött húzódó katonapolitikai folyamatok megértéséhez érdemes megjegyezni, hogy az Egyesült Államok még jóval antikoloniálisabb külpolitikát folytatott, mint csupán 3 évvel később, így Nagy Britanniát nem hívták meg ebbe a szervezetbe, a két nemzetközösségi állam nélküle lépett szövetségre az USA-val. Mindennek a hozzáállásnak két alapvető oka volt. Egyrészt, Nagy Britannia meghívása megnyitotta volna az utat olyan nyugat-európai gyarmattartó államok felé is, amelyeknek még érdekeltségeik voltak a térségben (elsősorban Franciaország, másodsorban Hollandia előtt). Másrészt pedig az Egyesült Királyság 1951-ben még igencsak le volt ragadva egy gyarmati aszimmetrikus háborúban Malájföldön, és az Egyesült Államok – a koreai háború mellett – egyáltalán nem akart ebbe a konfliktusba is belefolyni.

Ugyan az ANZUS szerződést nem terjesztették ki, hogy magába foglalhassa a briteket is, de egy másik védelmi szövetséget is létrehoztak, ahol ők is hozzájárulhattak Ázsia ezen részének a biztonságához. Az 1950-es évek közepére, a védelmi szövetségi rendszerek kialakítása gőzerővel működött a Föld minden régiójában. Egy év leforgása alatt megalakult a Közel-keleti Szerződés Szervezete (Middle East Treaty Organization − METO), vagy más néven a Bagdadi Paktum, majd pedig a NATO-ra mintegy válaszlépésként a Varsói Szerződés is [15]. A délkelet-ázsiai romló biztonsági légkör megkövetelte egy komoly, regionális védelmi szövetség létrehozását ebben a régióban is, így „1954-ben megalakult a Délkelet-ázsiai Szerződés Szervezete (Southeast Asia Treaty Organization − SEATO), amely megpróbálta azt véghezvinni Ázsiában, amit a NATO Európában" [16]. Új-Zéland és Ausztrália is alapító tagja volt ennek a szervezetnek, és azok is maradtak egészen a SEATO 1977-es megszűnéséig. Mindkét nemzetközösségi állam nagyobb szerepet vállalt a régió biztonságának fenntartásában a SEATO keretein belül, mint korábban, azonban a szervezet már a kezdetektől több okból is problémás volt, és végül ezek a súlyosbodó problémák vezettek az 1977-es megszűnéséhez is. A problémák miatt, a Malájföldön érdekelt országok felismerték, hogy a SEATO nem lesz képes ezt a területet megvédeni. Anthony Head, brit hadügyminiszter például 1954. november 14-én kelt *Trends of Events in SE Asia* című jelentésében sürgette Anthony Eden brit miniszterelnököt abban, hogy „mielőbb hozzanak létre egy közös ausztrál, új-zélandi, amerikai és brit szervezetet, amely a teljes képet figyelembe veheti és, amely meg tudja erősíteni Malájföld védelmét a felforgató erők, stb. ellen a hidegháborús környezetben" [12]. A tinta gyakorlatilag alig száradt meg a Manilában szeptember 8-án aláírt SEATO egyezményen, de az egyik alapító tag hadügyminisztere máris egy új szervezet alapításán dolgozott, hogy a maláj helyzetet megfelelően lehessen kezelni. Ez a folyamat jutott el végül oda, hogy megalakult a Távol-keleti Stratégiai Tartalék (Far East Strategic Reserve - FESR, amelyet szoktak még Commonwealth Far East Strategic Reserve azaz, Nemzetközösségi Távol-keleti Stratégiai Tartalékként is említeni). A FESR keretein belül még jobban bekapcsolódott a két nemzetközösségi állam a Malájföldön folyó harcokba.

A SEATO megalapítás egybevágott a John Foster Dulles, az Egyesült Államok külügyminisztere által ebben az időben kialakított, ún. „dominó teória" térnyerésével. Ez az elmélet nagyban meghatározta Ausztrália és Új-Zéland viszonyát is Ázsiával az elkövetkező két évtizedben. Azonban a malájföldi szükségállapot szempontjából ez nem sok változást hozott, hiszen mindkét légierő, az Ausztrál Királyi Légierő (Royal Australian Air Force − RAAF) és az Új-Zélandi

Királyi Légierő (Royal New Zealand Air Force − RNZAF) is több éve aktívan részt vett a britek által vezetett légi hadműveletben. Viszont az tény, hogy a légierők egységei mellé, a szárazföldi haderők reguláris alakulatai tényleg csak 1954 után, a SEATO és a FESR megalakítása után kapcsolódtak be a maláj eseményekbe (különleges erők alkalmazása és kiképzés már korábban is folyt). Tehát a „dominó teória" nem csak később Vietnamba rántotta bele az ausztrál és újzélandi erőket, hanem részben már Malájföldön is.

Az ANZUS és SEATO megállapodásokkal jól lehet érzékelni azt, ahogy mindkét állam – de legfőképpen Ausztrália – biztonság- és védelempolitikája hogyan távolodott el Nagy Britanniától, és fordult az Egyesült Államok felé a második világháborút követően. Őfelsége helyett inkább „Sam nagybácsi" felé fordultak védelemért. Új-Zéland később eltávolodott ettől a hármas szövetségtől, de az Ausztrál Államszövetség számára azóta is az Egyesült Államok a szövetséges, és elsők közt csatlakoztak az USA által vezetett terrorizmus elleni harchoz.

A MALÁJ FELKELÉS KITÖRÉSE

Mielőtt a maláj égen tevékenykedő nemzetközösségi légierők eszközeire és szerepére kitérnék, néhány rövid gondolatban meg kell vizsgálni a felkelés kitörését is, azt, hogy gyakorlatilag miért is volt szükség az RAAF, az RNZAF és természetesen a Királyi Légierő (Royal Air Force - RAF) bevetésére. A felkelés kirobbanásához vezető társadalmi és gazdasági folyamatok leírása rendkívül bonyolult, és korábban már több átfogó nagyszerű mű is született ebben a témában. Sok tekintetben, a maláj helyzet nagyban hasonlít a térben és időben azonos indokínai konfliktushoz, bár alapvető különbségek is vannak köztük. Mindkét területen már az 1920-as évektől aktívan működött a kommunista párt, szegény, elmaradott és nehéz helyzetükkel elégedetlen népesség élt nyugati gyarmatosítók elnyomása alatt, és mindkét területen karizmatikus kommunista vezetők irányították a felkelést. Chin Peng Malájföldön, míg Ho Si Minh Indokínában. Az is közös volt bennük, hogy a második világháború alatt mindketten a szövetségesekkel együtt harcoltak a japán csapatok ellen. Chin Peng, brit támogatással a Maláj Japánellenes Néphadsereg (Malayan People's Anti-Japanese Army - MPAJA) vezetője volt.

A második világháború vége Délkelet-Ázsiában azért is fontos változásokat hozott, mert ugyan a japán császárt nukleáris és hagyományos bombákkal kapitulációra bírták, de sok japán megszálló erő ebben a régióban legyőzetlenül tette le a fegyvert. A helyi lakosság előtt nem voltak győztesként bevonuló, technikai fölényüket kimutató európai hadseregek. Ez, valamint azok a megalázó katonai vereségek, amiket az európai nagyhatalmak – különösen Nagy Britannia és Franciaország – a háború elején elszenvedtek, megváltoztatták az ázsiai népek gondolkodásmódját, és a legyőzhetetlen európai erő mítosza a múlté lett. Az MPAJA és a *Viet Minh* is a dzsungelban élt és harcolt évekig, így felbecsülhetetlen értékű harci tapasztalatokat szereztek a kis, jól szervezett egységekben végrehajtott gerilla harcmodorban ezen a terepen. A világháború végét követően, 1945 decemberében MPAJA lerakta és átadta a britektől kapott fegyvereit, de jelentős számú fegyvert, lőszert és egyéb ellátmányt, amelyet a japánoktól zsákmányoltak jól álcázva elrejtettek a dzsungel mélyén [17].

A gerillaharcos életmódról a békés politikai szereplővé válás nagy kihívást jelentett a Maláj Kommunista Párt (Malayan Communist Party − MPC) tagjai, és egyben az MPAJA veteránjai számára. A békés átmenetet tovább nehezítette, hogy Loi Takról, az MPC főtitkáráról kiderült, hogy

kettős vagy akár az is lehet, hogy hármas ügynök volt, és a brit rendőrség hírszerzéssel foglalkozó különleges ügyosztálya (Special Branch) beszivárgott a párt legfelsőbb vezetésébe [17]. Egy ilyen csapás után vette át a párt vezetését a fiatal Chin Peng, aki kiváló gerillaharcos volt, és második világháborús szerepéért megkapta a Brit Birodalom Rendje kitűntetést is. Ugyan próbálta a pártot megreformálni, valamint felvenni a kapcsolatot szomszédos és nemzetközi kommunista szervezetekkel is, de 1947 végére, az MPC vezetőségének nagy része az erőszakos lépéseket részesítette előnyben a politikai célok mielőbbi elérésének érdekében. Ebből a célból megalapították a Maláj Nép Felszabadító Hadsereget (Malayan Races Liberation Army - MRLA, vagy más források szerint Malayan National Liberation Army - MNLA), amely az MPC katonai szárnya lett [17]. A britek is próbálkoztak reformokkal a helyzet enyhítésére, de a próbálkozások nem hoztak eredményeket, így Edward Gent, aki a Maláj Föderációt 1948. február 1-óta vezette, mit brit főmegbízott előtte pedig a mindössze két évig fennálló Maláj Unió kormányzója volt, 1948. június 16-án, miután kommunista gerillák megöltek 3 európai telepest és azok kínai asszisztenseik, kihirdette a teljes Föderációra kiterjedő szükségállapotot. Ezzel kezdődött el a 12 évig húzódó véres felkelés, amelynek hivatalosan csak 1960-ban lett vége.

AUSZTRÁL ÉS ÚJ-ZÉLANDI LÉGI SZEREPVÁLLALÁS A MALÁJ FELKELÉS LEVERÉSÉBEN

Az általános geopolitikai helyzet rövid megadását követően lehetségessé válik az RAAF és az RNZAF tényleges szerepvállalásának ismertetése és ennek a részletes elemzése. Egy rövid szervezeti bemutatót követően feladatkör szerint mutatom be a két légierő eszközeit és ezek harci felhasználását.

Az 1945-től 1949-ig terjedő időszak a világon mindenhol általános leszerelést hozott, és nem volt ez másként az RAAF és az RNZAF esetében sem. A második világháborúban mindkét haderő inkább csak kiegészítő szerepet kapott az Egyesült Államok hadigépezete mellett, de így is ütőképes és jól felszerelt légierők voltak, amelyek a rájuk bízott feladatot, a tengeri hajózás biztosítását, és a hátrahagyott japán ellenállási gócok felszámolását sikerrel végre tudták hajtani.

A japán leszerelést ellenőrző Brit Nemzetközösségi Megszálló Erők (British Commonwealth Occupation Force - BCOF) részeként természetesen mindkét légierő kivette a részét a háború utáni stabilitás megteremtésében, azonban ezen kívül csak a képességek leépítését hajtották végre. Új-Zélandon ez 1949-ig tartott, amikor is egy népszavazást követően, újra bevezették a sorkötelezettséget egy időre. Ausztráliában viszont kissé más volt a helyzet. Már 1945-ben elkezdtek az RAAF átszervezésén dolgozni, és a már korábban bemutatott nagyobb szerepvállalás kívánalmainak megfelelően igyekeztek egy hatékony és fenntartható haderőnemet kialakítani. Az A, B, C és D betűkkel jelölt tervezetek mind különböző méretű és erejű RAAF-et határoztak meg és javasoltak a döntéshozóknak. Az A-terv szerint, amely a legoptimistább volt, az összesen 60 darab századból, amelyet a második világháborúban feltöltöttek 35 maradt volna meg. Bár a hidegháborús nyomás már érződhetett ekkor is, de egy ekkora, költséges haderőt élből elutasított Joseph Benedict Chifley munkáspárti miniszterelnök. A kompromisszum kész B- és C-tervek is így jártak, és végül a D-terv nyerte el a döntéshozók tetszését 1947 júliusában [5]. Ez a 16 századot előirányzó terv kevésbé volt ambiciózus, mint a korábbiak, de részletesen kidolgozott volt, és a teljesen támogatta biztonság- és védelempolitikai célkitűzéseit Ausztráliának. Egy úgynevezett

„mobil elkülönített harci köteléket" is létrehoztak, amelynek az volt a feladata, hogy „képes legyen gyorsan áttelepülni a Brit Nemzetközösség bármely veszélyben lévő területére" [5]. Ennek a mobil, bárhol bevethető egységnek a századai és repülőgépei lettek azok, amelyek végül Malájföldön is kivették a részüket a harcból.

„A malájföldi szükségállapot során bevetett légierők legfőbb jellemzője, az alkalmazott típusok sokszínűsége volt", írja Malcolm Postgate, a téma jeles szakértője a brit Védelmi Minisztérium megbízásából készített átfogó művében [18]. A malájföldi égen, 3 légierő is részt vett az RAF, RAAF és az RNZAF személyében, ahol ugyan a géptípusok közt volt némi átfedés, de mindegyik ország a saját rendszeresített gépeit használta, fronthasználatra nem kaptak eszközöket egymástól. Szintén jellemzője volt a maláj szükségállapot elleni légi fellépésnek – egyszerűen a háború hossza, és az 1950-es években, a repülőiparban bekövetkezett ugrásszerű fejlődés következtében –, hogy egy egész sor elavulttá váló típust fokozatosan modernebbekre cseréltek, ahogy a századokat új gépekkel szerelték fel. Ez mind a három légierő szintjén igaz volt.

A szállító haderő

A legelső nemzetközösségi szerepvállalás a felkelés elleni műveletekben a szállítógépekre hárult. Érdekes, hogy a kisebbik állam, Új-Zéland biztosított először segítséget az RAF hiányzó légi szállítási kapacitásának pótlására. „Új-Zéland először 1949-ben keveredett bele a szükségállapottal kapcsolatos műveletekbe, amikor is az RNZAF 41. századának Dakota szállító repülőgépeit a gerillaellenes haderők légi utánpótlásának biztosítására használták. Mire ezt a repülőrajt 1951 decemberében visszahívták a szolgálatból, addigra összesen 211 bevetést hajtottak végre, amelynek során 284000 kg utánpótlást dobtak le a dzsungelban" [19]. Az első ausztrál eszközök, amelyek részt vettek a malájföldi harcokban szintén a Douglas DC-3 Dakota típusú közepes szállítógépek voltak. Ezek az RAAF 38. századába tartoztak és az Új-Dél-Wales államban található Richmondból települtek át a Szingapúr főszigetére, Changiba 1950. június 19-én [20]. A világháborút követő leépítési hullám miatt, a Maláj-félszigeten található katonai repülőterek száma is limitált volt. Az RAF fő légitámaszpontjai – azok, amelyeket az RAAF és az RNZAF is használtak – RAF Tengah, Seletar, Changi, és Sembawang bázisok voltak, melyek közül az utóbbi az RAF státusza mellett RNAS azaz Királyi Haditengerészeti Repülőtérként is funkcionált. Ezek mind a szingapúri főszigeten voltak megtalálhatók. Ezeken felül még RAF Kuala Lumpur légi bázis állt rendelkezésre Selangor államban, a Maláj-félsziget nyugati részén, és RAF Butterworth, Perak államban, a félsziget észak-nyugati részén, közel a thai határhoz. Ezek voltak azok a repülőterek, amelyek ellátni és fogadni tudtak nagyobb szállítógépeket, bombázókat és sugárhajtású vadászbombázókat is. Ahogy a szükségállapot évei múltak, egyre több kisegítő repteret, felszállópályát, és helikopter leszállóhelyet alakítottak ki a dzsungelban, de sem az RAAF sem az RNZAF nem használta ezeket normál körülmények között, az általuk használt nagyobb géptípusokból adódóan, hiszen ezek nem voltak alkalmasak az ilyen kisegítő repülőterekről üzemelésre. Szervezeti szinten hivatalosan minden RAAF és RNZAF egységet a Távol-keleti Légierő (Far East Air Force − FEAF) irányítása alá helyeztek, de az ausztrál egységeket a 9. (Kompozit) Repülőezredbe tagolták, hogy megakadályozzák, azt, hogy az egyes önálló századok brit parancsnokság alá kerüljenek, ausztrál helyett [20].

A háború fő hadviselő fele az RAF a létező szinte összes feladattípusban tevékenykedett, de az RAAF és RNZAF eszközök Malájföldön támadó légi műveletben, közvetlen légi

támogatásban, közepes távú szállításban, és végül pszichológiai hadviselésben is szerepet vállaltak (valamint természetesen hosszú távú szállításban is, a harcoló szárazföldi alakulatok eszközeinek szállítására és egyéb logisztikai igények kielégítésére, de ezek a hadszíntéren kívül estek, így most nem kerülnek bemutatásra).

Ahogy már említettem, az RAAF a közepes távú szállítófeladatokra a Douglas Dakota kétmotoros szállítógépeit használta a 38. századnak. Ezek a második világháborús veterán gépek egészen 1952 decemberéig maradtak Malájföldön. Mielőtt visszavonták őket Ausztráliába összesen 1829 t utánpótlást szállítottak le, 805 t jutott célba ejtőernyős teher deszant eljárással és összesen több mint 17000 utast szállítottak [20]. Mindemellett 84%-os hadrafoghatósági rátával rendelkeztek az 1951−1952-es években, amely egyrészt bizonyítja a tiszteletreméltó, öreg Dakoták megbízhatóságát, másrészt pedig az ausztrál földi személyzet professzionalizmusát, hiszen az ideálistól nagyban eltérő körülmények közt kellett a repülőgépeket hadra fogható állapotban tartaniuk [18].

A teljes malájföldi konfliktus légi szállítási igényeit természetesen nem az RAAF-nek, vagy az RNZAF-nek kellett fedeznie, hiszen a fő hadviselő fél az RAF a Firedog Hadművelet égisze alatt 3 teljes szállítószázadot üzemeltetett az országban, és a nemzetközösségi szállítógépek csak ezt a kapacitást egészítették ki, valamint látták el a saját egységeiket. Érdekes megjegyezni, hogy a századok átfegyverzése, a típusok modernizálása miatt, a légi szállítási kapacitás lecsökkent 1951 év végén. A korábban említette RNZAF 41. századot és annak öreg Dakotáit hazavezényelték, hogy a század megkaphassa az új Bristol Freighter teherszállítóit, míg a RAF szállítószázadok hadrafoghatósági és javítási gondokkal küszködtek az új Vickers Valetta C.1 típusukkal, így az ausztrál Dakotáknak, a maguk kiváló hadrafoghatósági arányaival kellett kompenzálniuk a kieső kapacitást [18].

A szállítási képességekre azért is volt hatalmas szükség, mert dzsungel mélyén tevékenykedő szakaszok ellátásában kulcsfontosságúak voltak. „Az egyes, önállóan működő szakaszoknak eljuttatott ejtőernyős teher deszant utánpótlás teljesen hétköznapi dolog volt, és óramű pontossággal működött”, írja Francis H. Brooke dandártábornok 1954-ben, aki később az első vezérkari főnöke lesz az újonnan megalakuló Maláj Föderációs Hadseregnek [21]. Majd a tábornok azt is hozzáteszi, hogy „az egész folyamat olyan jól működött, hogy a gyalogos katona magától értetődőnek vette. Csakugyan, ez a teljes ráhagyatkozás a légi utánpótlásra lehet a legnagyobb, ámbár néma tisztelgés a légierők előtt” [21].

A modern Bristol Freighterekkel felszerelt RNZAF 14. század is visszatért még malájföldre a FEAF részeként 1955-ben, és végül a szükségállapot vége után még 1972-ig itt is állomásoztak. Ez az egység szenvedte el az Új-Zélandi Légierő egyetlen halálos veszteségét, amikor Tie repülőőrnagy egy utánpótlást ledobó bevetésen 1956. december 10-én hősi halált halt [22].

A támadó haderő

Támadó légi műveletekre és közvetlen légi támogatásra összesen 2 db RNZAF és 4 db RAAF századot vetettek be a konfliktus 12 éve alatt. Az Új-Zélandi légierő részéről két század, kezdetben a 14. majd pedig a 75. vett részt bevetésekben. Az első éles malájföldi RNZAF támadó bevetést, amely mellesleg az első éles harci bevetése volt az Új-Zélandi Légierőnek a második világháború vége óta, és egyben az első olyan bevetés is, amelyet sugárhajtású géppel hajtottak

végre, a 14. század De Havilland Vampire gépei teljesítették 1955. május 1-én [19]. Az egység 1955 áprilisában érkezett az RAF Tengah légi bázisra és egészen 1958 márciusáig vették ki részüket a harcokból. Eredetileg a 14. század a Vampire FB.52-es altípusával volt felszerelve, amely a brit gépekhez képest egy butított exportváltozat volt, de ugyanakkor a De Havilland Goblin 3 típusú, nagyobb teljesítményű hajtóművel volt felszerelve a korai Vampire változatokhoz képest [23]. Ezeket a gépeket végül átadták a testvérszázaduknak, a 75-nek, és még a malájföldi áttelepülés előtt a Királyi Légierőtől kölcsönbe kapott Vampire FB.9-ekkel szerelték fel őket, amelyek kifejezetten a trópusi üzemeltetéshez voltak fejlesztve és optimalizálva. A század ezeket az FB.9-eket 1955 novemberéig használta, amikor is megkapták a még nagyobb teljesítményű De Havilland Venom FB.1 vadászbombázókat [24]. Összesen a két típussal 115 éles harci bevetést repültek, és ez a viszonylag alacsony szám annak tudható be, hogy 1955 végére már a kormányerők álltak győzelemre a szárazföldi harcban [19].

Ugyan Malájföld hivatalosan megkapta a függetlenségét 1957-ben, de a szükségállapotnak nem volt még vége, és ez nem jelentette az RNZAF szerepvállalásának végét sem. „Új-Zéland hallgatólagosan elfogadta, hogy felelősséggel rendelkezik az Angol-Maláj Védelmi Egyezményben (Anglo-Malayan Defence Agreement - AMDA) foglalt területek biztonságáért” [9]. Ennek részeként, a 14. századot az RNZAF másik támadó alakulata a 75. század váltotta le 1958-ban English Electric Canberra bombázókat repülve. Hasonlóan a 14. századhoz, ők is kölcsöngépeket használtak egy ideig a Firedog Hadművelet során. Végül az RNZAF 1959-ben kapta meg a saját Canberra B(I).12 gépeit, amelyekkel a 14. alakulatot szerelték fel, a 75. század pedig végül 1961-ben hagyta maga mögött az RAF-tól kölcsönbe vett Canberrákat és települt haza az RAF Tengah bázisról [25]. Ezzel a támadóerőket képviselő RNZAF egységek mind hazatértek, de a későbbiekben új-zélandi századok még többször áttelepültek maláj bázisokra különböző védelmi megfontolásból, és hadgyakorlatok céljából.

Az RAAF méreténél és felszereltségénél fogva lényegesen több erőforrást tudott a maláj hadműveletekre fordítani, mint kisebb testvére. Ennek megfelelően 4 század vett részt a harcokban, az 1. a 2. a 3. és végül a 77., de a településük hosszát és a ledobott bombák mennyiségét tekintve az 1. század magasan kitűnik a többi közül. Az RAAF 1. százada 1950 júliusában csatlakozott az RAF Firedog Hadműveletéhez, csupán néhány héttel azután, hogy az első ausztrál Dakoták megérkeztek [26]. Ez az egység egyike volt annak a háromnak, amelyet a második világháborúban rengeteget használt és bizonyított Avro Lancasterből 1944-ben kifejlesztett, Avro Lincoln négymotoros nehézbombázókkal szereltek fel. A nehézbombázó besorolását a típusnak megváltoztatták közepes bombázóvá 1945 után, de ennek ellenére ez volt mind az RAF, mind az RAAF legnagyobb támadó repülőgépe a konfliktus kitörésekor. Összesen 6800 kg bombát tudott célba juttatni, és egy olyan alacsony veszélyességi fokú környezetben, mint a malájföldi volt, ahol sem nagy kaliberű légvédelemtől, sem ellenséges légierőtől nem kellett tartani, a Lincoln kora és viszonylagos lomhasága nem számított. Az RAAF Lincolnjait imádta a személyzete és a támadógépek közül magasan ennek volt a legjobb a hadrafoghatósági aránya, „70% felett, amely sokkal jobb, mint a váltótípusának, a Canberrának” [18].

A harci alkalmazásuk során általában szokványos eljárást alkalmaztak, és vízszintes bombavetést hajtottak végre a dzsungelban rejtőző feltételezett lázadók felett a brit standardnak számító 500 és 1000 font (~ 227 és 454 kg) tömegű bombákkal. Néha azonban „4000 font (~ 1815 kg) tömegű rombolóbombákat is ledobtak az ausztrál Lincolnok, azzal a céllal, hogy ezzel helikoptereknek

alkalmas leszállóhelyet alakítsanak ki a dzsungelben" [26]. Ez az eljárásmód, mint 'oly sok Malájföldön kitapasztalt harceljárás, később az Egyesült Államok által is alkalmazva volt Vietnamban. A célmegjelölés is nagyon hasonlóképpen zajlott a maláj dzsungelban, mint később az indokínaiban. A bombázószemélyzetek többfajta célmegjelöléssel is próbálkoztak, de „a leghatékonyabbnak a nappali bevetéseknél az bizonyult, ha füstjelzővel jelölte meg egy alacsonyan repülő Auster [Taylorcraft Auster megfigyelő repülőgép] a célpontot. Ez rendkívül speciális feladat volt, és a pilótáknak a legnehezebb körülmények közt kellett helytállniuk" [26]. Ezeket a pilótákat lehet a későbbi legendás vietnami előretolt repülésirányítók (FAC – Forward Air Controller) előfutárainak tekinteni, hiszen az eljárás alapelvei azonosak voltak. Ami a tényleges bombavetési eljárást illeti, ez is szokványosnak volt mondható a Lincolnok esetében. A gépek V alakban, szoros kötelékben repültek, és a 10 darab, egyenként 1000 fontos általános célú rombolóbombákból álló bombaterhet egy másodperces időközökkel, vagy néha egyszerre oldották ki [26]. A szokványos bombavetés és az ellenséges légierő hiányának ellenére sem lehet sétagaloppoknak tartani a bombázóbevetéseket a maláj égen. A gépeknek szoros formációt kellett tartaniuk a sokszor több mint 4 órás bevetéseken, amelyeket éjjel-nappal hajtottak végre, a trópusi időjárás viszontagságainak kitéve.

A földrajzi adottságokra való tekintettel, amelyek 3 lombkoronaszinttel rendelkező, sokszor hegyvidéki őserdőt jelentenek, egy kijelölt kisebb célterület gyakorlatilag szőnyegbombázása elsőre az erőforrások pazarlásának tűnhet, de az eredmények mást mutattak. Az elfogott felkelők szerint a Lincolnok folyamatos zavaró bombázása, és általában a légierő tevékenysége rendkívül hatásos volt. Még maga Chin Peng, az MPC vezetője is majdnem életét vesztette egy ilyen bombatámadásban 1953-ban [27]. A konfliktus során a területbombázás többször is bebizonyította hatékonyságát. Például az 1956. február 21-én végrehajtott Kingly Pile Hadműveletben, amely egy közös akciója volt az RAF Canberra és az RAAF Lincoln bombázóinak Johore tartományban, teljesen megsemmisítették az MRLA 7. Független Szakaszának főhadiszállását, megölve 22 felkelőt, köztük az egység vezetőjét Goh Peng Tuant [28]. Már a malájföldi alkalmazásuk első évében körülbelül 2500 t bombát dobtak le az RAAF 1. századának Lincolnjai, és tették mindezt éjjel-nappal repülve, 774 bevetést és 3303 repült órát teljesítve mindenféle időjárási körülmények között [26]. A közel 8 évig tartó folyamatos alkalmazásuk során végül az ausztrál Lincolnok közel 17 500 t bombát juttattak célba, amely a Firedog Hadművelet során ledobott összes tonnának a 85%-át teszi ki [26].

A szokványos bombavetés mellett az RAAF Lincolnjai részt vettek még kiképzési feladatokban, röplapok szórásában a pszichológiai hadviselés keretein belül, és természetesen SEATO hadgyakorlatokon is. Köszönhetően az alacsony veszélyességi fokú környezetnek, a hagyományos bombavetési eljárásoknak és gépek nagyszerű megbízhatóságának, csupán kettő ausztrál Lincoln semmisült meg az évek során, és ezek sem ellenséges tűz miatt [20].

A támadó légi műveleti egység szerepkörét az RAAF 2. százada vette át az 1-től 1958 júniusában. A 2. század volt az első RAAF egység, amely megkapta az új English Electric Canberra B.20-as típust 1954 év elejéig, és ez volt az egyetlen ausztrál század, amelyik ténylegesen, harci körülmények közt is alkalmazta a gépeit. A Canberrák részei voltak a FESR-nek és RAF Butterworth bázison üzemeltek, a félsziget észak-nyugati részén [29]. A Canberrák első éles bevetése 1958. szeptember 3-án egy új fejezetet nyitott az RAAF történelemkönyvében, mert ez volt az első alkalom, hogy sugárhajtású ausztrál gép bombavetést hajtson végre élesben [20]. Azonban,

mire a Canberrák megérkeztek, a felkelés már egy alacsonyabb intenzitású szakaszában járt, hiszen a Briggs-terv működött Sir Gerald Templer, brit főmegbízott irányítása alatt 1952 és 1954 között, így 1958 végére, a felkelők nagy részét északra, a thai határvidékre szorították vissza. Így az elődeikhez, a Lincolnokhoz képest a Canberrák csak mérsékelten voltak bevetve [18]. Malájföldön 1959 januárjában repülték a 2. század Canberrái az utolsó bombázóbevetésük, de nem is gondolhatták még akkor, hogy a következő évtizedben, újra délkelet-ázsiai célpontokat fognak majd bombázni, csak akkor az Egyesült Államok oldalán Vietnamban. A század a Butterworth légi bázison maradt, mint a Stratégiai Tartalék része egészen 1967-ig, amikor áthelyezték őket a Phan Rang légi bázisa, Dél-Vietnámba [28].

Az öreg, de megbízható Lincolnokhoz képest a csúcstechnológiát képviselő Canberrák, a bonyolultságuk okán, jóval alacsonyabb hadrafoghatósági rátát tudhattak magukénak. Ami a bombavetési eljárásukat illeti, a Canberrák is bevethetők voltak éjjel is, de a szoros kötelékben és V alakban repülést felváltotta az egymás mögött, sorban repülés, és éjszaka megnövelték az egyes gépek közötti távolságot, biztonsági okokból [18].

Az RAAF támadóerejét további két század, a 3. és a 77. képviselte még a maláj égen. Mindkettő a Commonwealth Aircraft Corporation (CAC) Sabre sugárhajtású vadászbombázót repülte, amely a koreai háborúban jó eredménnyel alkalmazott North American F-86 Sabre ausztrál licensz változata volt. Mindkét egységet szintén a butterworth-i bázisra helyezték el a Canberrákkal együtt, de ugyanazon okból kifolyólag, mint a bombázók, ők sem tudták már sok bevetésben kivenni a részük. A 3. század 1958. július 1-én érkezett meg, míg a 77. század 1959. február 1-én [18]. Néhány bevetés azért még ezeknek az egységeknek is jutott, és az első ilyet 1959. augusztus 13-án repülték [20]. Szintén a Canberrákhoz hasonlóan, a Sabre egységek is részei voltak Ausztrália SEATO szerepvállalásának és a FESR-nek is. Ez a szerepük a későbbiekben értékelődött fel, amikor az ausztrál gépek biztosították a maláj légtér egy részét az Indonéziával kirobbant *Konfrontasi* során. ezek a gépek végül ajándékként átkerültek az újonnan megalapított Maláj Királyi Légierőhöz 1969 és 1972 között [30]. A FESR védernyője alatt RAAF egységek egészen 1988-ig, a 79. század feloszlatásáig állomásoztak Butterworth területén.

A támadó és szállító jellegű műveletek mellett, az ausztrál gépek a pszichológiai hadviselésben is kivették a részüket. Azonban, ezeknek a pszichológiai bevetéseknek – amelyek magukba foglalták a röplapok szórását és az alacsonyan repülő, hangszórókkal felszerelt gépekről továbbított propagandaüzeneteket is – a túlnyomó többségét az RAF eszközei hajtották végre. Néha ezekbe a bevetésekbe besegítettek az RAAF Dakotái és Lincolnjai is, mint például 1950. augusztus 3-án, amikor a 38. század Dakotái, több RAF gép kíséretében összesen 103000 röplapot dobtak le a kommunisták által megszállt területek felett [31]. A Dakoták néha sebesültek evakuálásában és meteorológiai felderítésben is részt vettek, de ezeket a feladatokat is többnyire RAF gépek látták el, ahogy az összes többi olyan feladatot is, amelyeket az ausztrál és új-zélandi légierők nem végeztek, mint például a helikopteres támadás, a kutató-mentő tevékenység, a tengerészeti és hadászati felderítés, stb.

ÖSSZEGZÉS

Összegzésként megállapítható, hogy az RAAF és az RNZAF szerepvállalása a malájföldi felkelés leverésében jelentős és fontos volt. Ugyan a légierők lehetséges feladatai közül nem

mindet a nemzetközösségi országok hajtottak végre, de amiben szerepük volt, azokban nagyban segítették a brit érdekeket, sokat tettek a brit győzelemért. A malájföldi felkelés elleni hadműveletek sora azon kevés példa közé tartozik, ahol a kormányzati erők le tudták győzni a politikai céllal fűtött lázadókat. Ebben a győzelemben a légierőknek kulcsszerepe volt, a légierőkön belül pedig az ausztrál és új-zélandi egységeknek is. Az ausztrál és új-zélandi részvétel, azt is jól illusztrálja, hogy miként lehetett korlátozott pénzügyi és egyéb erőforrások mellett is hatékonyan egy szövetségi rendszer része lenni, és a szövetség által megkívánt feladatokat végrehajtani. A korlátozott, aszimmetrikus háborúban, a nemzetközösségi államok is korlátozottan folytak bele, mégis a brit részvétellel együtt pozitív eredménnyel zárult a konfliktus, szemben például a vietnami háborúval, ahol – bár több tényező is hátrányosan befolyásolta az események menetét – de a szinte végtelen légi erőforrás sem volt elegendő a győzelemhez. Napjaink aszimmetrikus háborúiban, ahol a légierő alkalmazását sokszor politikai és humanitárius szempontok is korlátozzák, újra fontos tényező korlátozott erővel megpróbálni sikert elérni, és a malájföldi események további tanulmányozás ebből a szempontból is iránymutató lehet. A jelen dolgozatban felvázolt bemutatás csak a képzeletbeli jéghegy csúcsát jelenti, és még további kutatási lehetőséget rejt a téma.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BODA J. et al.: Fókusz és együttműködés. A hadtudomány kutatási feladatai. Honvédségi Szemle, 2006/3, pp. 3-19.
[2] PAUL, E.C.: Little America: Australia, the 51st state. Pluto Press, London, 2006.
[3] MUSEUM OF AUSTRALIAN DEMOCRACY: Statute of Westminster Adoption Act 1942 (Cth). url: https://www.foundingdocs.gov.au/item-did-25-aid-2-pid-23.html
[4] ALCORN, R. F.: Australian Foreign Policy: WWII And Post War. Defence Force Journal, Kensington Park, 1987/63. pp. 39, 41.
[5] STEPHEN, A.: RAAF Policy, Plans And Doctrine 1946-1971. Air Power Studies Centre, Canberra, 1995. pp. 1-3, 80.
[6] WATERS, Sydney David: The Royal New Zealand Navy. Historical Publications Branch, Wellington, 1956. pp. 214-215.
[7] FRANCILLON, R. J.: Japanese Aircraft Of The Pacific War. Putnam & Company Ltd., London, 1979. p. 453.
[8] NEW ZEALAND LEGAL INFORMATION INSTITUTE: Statute Of Westminster Adoption Act 1947 (11 GEO VI 1947 No 38). Url: Http://Www.Nzlii.Org/Nz/Legis/Hist_Act/Sowaa194711gv1947n38459/
[9] SINCLAIR, P.: Five Power Defence Arrangements: A New Zealand Perspective. CSS Strategic Background Paper, Centre For Strategic Studies, Wellington, 2013/09.
[10] ROLFE, J.: New Zealand's Security: Alliances And Other Military Relationships. Centre For Strategic Studies, Wellington, 1997.
[11] The History of the Radford-Collins Agreement. Sea Power Centre - Australia, 2007/Nov.
[12] STOCKWELL, A J.: Malaya: Part III, The Alliance Route to Independence 1953-1957. British Documents on the End of Empire, HMSO, 1995. p. LXIII.
[13] WOOD, S. P.: 60 Years Australia In Malaysia 1955-2015. Australian Government, Department Of Foreign Affairs And Trade, 2015. p. 46.
[14] The ANZUS Alliance. Defense Institute of Security Cooperation Studies, Wright-Patterson Air Force Base, 1987/4.
[15] Treaty Of Friendship, Co-Operation And Mutual Assistance. United Nations Treaty Collection, Warsaw, 1955. url: https://Treaties.Un.Org/Doc/Publication/UNTS/Volume 219/Volume-219-I-2962-Other.Pdf
[16] Winston Churchill And The Cold War. National Churchill Museum. url: www.Nationalchurchillmuseum.Org/Winston-Churchill-And-The-Cold-War.Html
[17] SHORT, A.: The Communist Insurrection In Malaya 1948-1960. Frederick Muller Ltd., London, 1975. pp. 35-36, 38-41, 60.
[18] POSTGATE, M.: Operation Firedog: Air Support In The Malayan Emergency, 1948-1960. HMSO, 1992. pp. 31, 47-48, 59, 76-77.
[19] Post War Malaya. url: Http://Mch.Govt.Nz/Sites/Default/Files/Pukeahu%20Post-War-Malaya-Malaysia-Operations-National-Commemoration-2017%20%28D-0756686%29.PDF

[20] PITTAWAY, N.: RAAF In The 1950s. Wings Of Fame, Aerospace Publishing Ltd., London, 2000/20. pp. 152-154.
[21] BROOKE, F.H.: Infantry And Air Power In Malaya. Australian Army Journal, Commonwealth of Australia, 1954/64. pp. 15-17.
[22] History Of New Zealand's Involvement In Malaya/Malaysia. url: http://www.malayavets.co.nz/index.php?pag=cms&id=82&p=history-of-defence.html
[23] MASON, F.K.: Aircraft Profile No. 48: The de Havilland Vampire Mk. 5 & 9. Profile Publications Ltd., Leatherhead, 1965.
[24] HARRISON, W.A.: Warpaint Series No. 27: de Havilland Vampire, Warpaint Books Ltd., Bletchley, 2004.
[25] The Post War Years. url: http://www.airforce.mil.nz/About-Us/Who-We-Are/History/The-Post-War-Years.Htm
[26] GARBETT, M., GOULDING, B.: Lincoln At War: 1944-1966. Ian Allan Publishing, Shepperton, 2001. pp. 83-85, 87.
[27] EDWARDS, P.: Public Enemy Number One. Wartime: Official Magazine Of The Australian War Memorial, 1999/Aug. pp. 50-52.
[28] JACKSON, R.: The Malayan Emergency & Indonesian Confrontation: The Commonwealth's War 1948-1966. Pen & Sword, Barnsley, 2008. p. 78.
[29] CAMERON, D.G.: The English Electric A.1 Canberra – Its Australian Connections. url: https://qam.com.au/download/research_papers/canberra-dgc.pdf p. 8.
[30] FARQUHAR, R.: The Avon Sabre. ADF-SERIALS Australian & New Zealand Military Aircraft Serials & History, url: www.adf-serials.com.au
[31] HUGONNET, P.: Malayan Emergency. Voluntary Guides Backgrounder, Australian War Memorial 2013/3. p.30.

COMMONWEALTH AERIAL OPERATIONS IN THE MALAYAN EMERGENCY

The Malayan Communist Insurgency and its defeat is not public knowledge anymore, but even if one is interested in this topic, mostly the role of Great Britain and of the Royal Air Force is to be encountered. It is lesser known that two Commonwealth nations, Australia and New Zealand also actively took part in this successful counterinsurgency war, and their respective air arms played an important role. In my work, next to a short historical scene-setting, I aim to present those defence policy factors, which compelled these two Commonwealth nations to intervene Malaya, and then the role of the Royal Australian Air Force, and the Royal New Zealand Air Force in counterinsurgency operations between 1948 and 1960.

Key words: *Malaya, insurgency, asymmetric warfare, cold war, Royal Australian Air Force, Royal New Zealand Air Force, Operation Firedog*

Ondrék József	Ondrék József
Nemzeti Közszolgálati Egyetem	National University of Public Service
Nemzetközi Kapcsolatok Iroda	International Relations Office
Nemzetközi referens	International officer
jozsef.ondrek.89@gmail.com	jozsef.ondrek.89@gmail.com
orcid.org/0000-0002-1831-5479	orcid.org/0000-0002-1831-5479

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-04-0461_Ondrek_Jozsef.pdf

Szabó József Zoltán, Dömötör Ferenc

VILLANYMOTOROK MŰSZAKI ÁLLAPOTÁNAK MEGHATÁROZÁSA MOTORÁRAM-, ÉS REZGÉSELEMZÉS SEGÍTSÉGÉVEL

Forgógépek diagnosztikai vizsgálata során az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer a rezgésdiagnosztika, amelynek során a csapágyazási helyeken fölvett időjel effektív rezgéserősségét a nemzetközi szabványokban megadott határértékekkel összehasonlítva mondanak véleményt a gép állapotáról. A módszer továbbfejlesztett változata az időjel FFT elemzése révén állapítja meg a rezgés lehetséges okát, és az időközben bekövetkezett károsodás hozzávetőleges mértékét. Munkánk során ezt, a Magyarországon is széles körben alkalmazott eljárást alkalmaztuk elektromotorok vizsgálatára, illetve egészítettük ki a motor áramának vizsgálatával. Megállapítottuk, hogy a két eljárás részben kiegészíti egymást, részben megerősíti a másik módszer felhasználása által kialakított véleményt.

***Kulcsszavak**: elektromotor, rezgéselemzés, motoráram elemzés*

Az ipari berendezések költséghatékony felhasználása csak akkor eredményes, ha azokat a lehető legkevesebb időre kell kivonni a termelésből javítás, állapotfelmérés, vagy karbantartás céljából. A rendszeres időközönként (off-line) vagy folyamatosan (on-line) végzett, diagnosztikai célú állapotfelmérés révén a javítási ciklusok előre tervezhetők. Az idejekorán felfedezett, kisebb hibák megszüntetésével elkerülhető a váratlan meghibásodásból fakadó termelés kiesés. A tervezés révén a javítási költségek is jelentősen csökkenthetők. Az ipari termelésben alkalmazott berendezések hajtására széles körben alkalmazzák az elektromotorokat, és ezen belül elsősorban az aszinkron motorokat. Egyszerű felépítésük, kedvező áruk üzembiztonságuk miatt ez a típus alkotja a felhasznált összes motor 90%-át. A cikk egy olyan munkáról szól, amelynek során a villanymotorok rezgésdiagnosztikai vizsgálatát motoráram elemzéssel egészítettük ki.

KÍSÉRLETI BERENDEZÉSEK

A motoráram analízis célja a forgórész rudak állapotának meghatározása. Ennek során egy, a műszaki köznyelvben lakatfogónak nevezett szondát helyezünk a betápláló vezetékek egyikére. A kapott jelet FFT analizátorban dolgozzuk fel. Sérült rúd esetén a motor forgatónyomatéka minden alkalommal lecsökken, amikor a forgó mágneses tér egyik pólusa elhalad mellette. Ez a forgatónyomaték-csökkenés megjelenik a betápláló áramvezetékben is. A motoráram analízist a motor terhelt állapotában kell végezni, mert terheletlen illetve kis terhelés esetén a szlip frekvencia nagyon kicsi, így az effektus nem vagy csak nehezen kimutatható. A motoráram analízis egy gyors, egyszerűen kiértékelhető vizsgálat, mely kizárólag a forgórész rudak állapotának meghatározására alkalmazható, egyéb hibák kimutatására a rezgésmérés sokkal biztosabb eredményt adhat, bár ennek mérés tervezése, végrehajtása és kiértékelése több időt, nagyobb szaktudást és így több költséget jelent.

1. ábra Microlog CMVA 60 rezgésmérő és tartozékai

Az 1. ábrán a Microlog CMVA 60 típusú hordozható adatgyűjtő/ FFT analizátor (1), és tartozékai láthatók. Ezek a következők: CMSS6187 váltó- és egyenáramú árammérő szonda (2), CMSS 31707500-CE Csatlakozó kábel (3), CMSS2200 típusú gyorsulás érzékelővel (4) és mérőcsúccsal (5). A mérések során ezt részben közvetlenül (rezgésmérésre), részben közvetve, azaz lakatfogóval kombinálva, a motoráram elemzése céljából alkalmaztuk.

A mért jelszint különbség	Szóbeli értékelés
54–60 dB	kiváló
48–54 dB	jó
42–48 dB	mérsékelt
36–42 dB	forgórész rudak repedés kifejlődőben, vagy nagy ellenállású kapcsolatok
30–36 dB	forgórész rudak több helyen előforduló repedése
< 30 dB	repedt forgórész rudak, repedt véggyűrűk; mindenütt komoly problémák

1. táblázat Az SKF gyártmányú, CMVA60 Microlog motoráram analízis kiértékelő táblázata

A diagnosztikai célú motoráram elemzés alkalmazási korlátai:

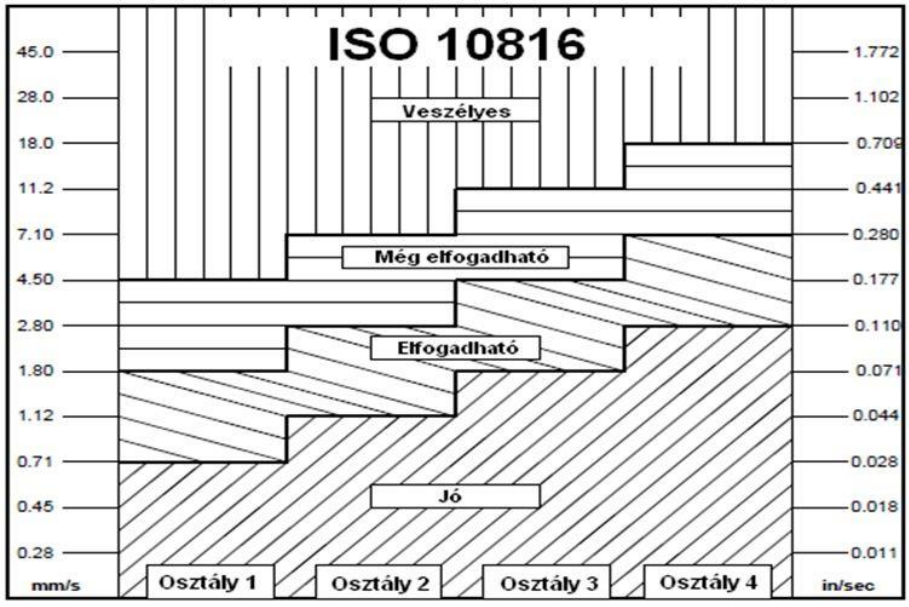
Ez az eljárás alkalmas repedt vagy törött forgórész rudak detektálására, vagy véggyűrűk repedéseinek észlelésére, vagy pedig indukciós motorok nagy ellenállású csatlakozásainak diagnosztizálására, ha a következő feltételek teljesülnek:

1. a motor terhelése eléri a névleges terhelés legalább 75%-át;
2. a motor névleges teljesítménye legalább 10 LE (7,5 kW);
3. a vizsgálat előtt pontosan meg van határozva a pólus elhaladási frekvencia (és a fordulatszám).

További korlátozások: mechanikai hatások ugyancsak okozhatnak a rotorhibák hatásához hasonló jeleket, ha a terhelés során a fordulatszám kisebb, mint 75/perc. Ez az eljárás nem képes más, olyan hibák detektálására, mint a dinamikus vagy a statikus excentricitás.

2. ábra Adash VA4 Pro mérőműszer

A rezgésméréseket általában a 3. ábrán látható Adash VA4 Pro mérőműszerrel végeztük. A megengedhető rezgésértékeket az ISO 10816 szabvány rögzíti.



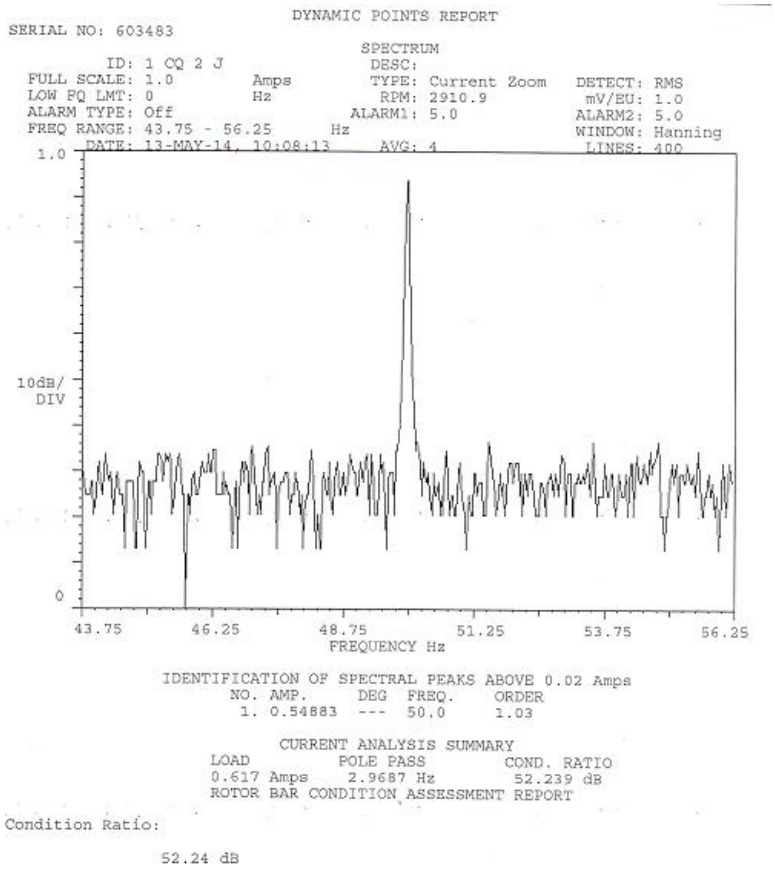
3. ábra A megengedhető rezgésértékek ISO 10816 szabvány szerint

A laborkísérletek során vizsgált motorok (< 15 kW) az 1. osztályba tartoznak, míg az ipari körülmények között végzett mérések a 2. osztályba tartoznak.

VIZSGÁLATOK ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZETBEN

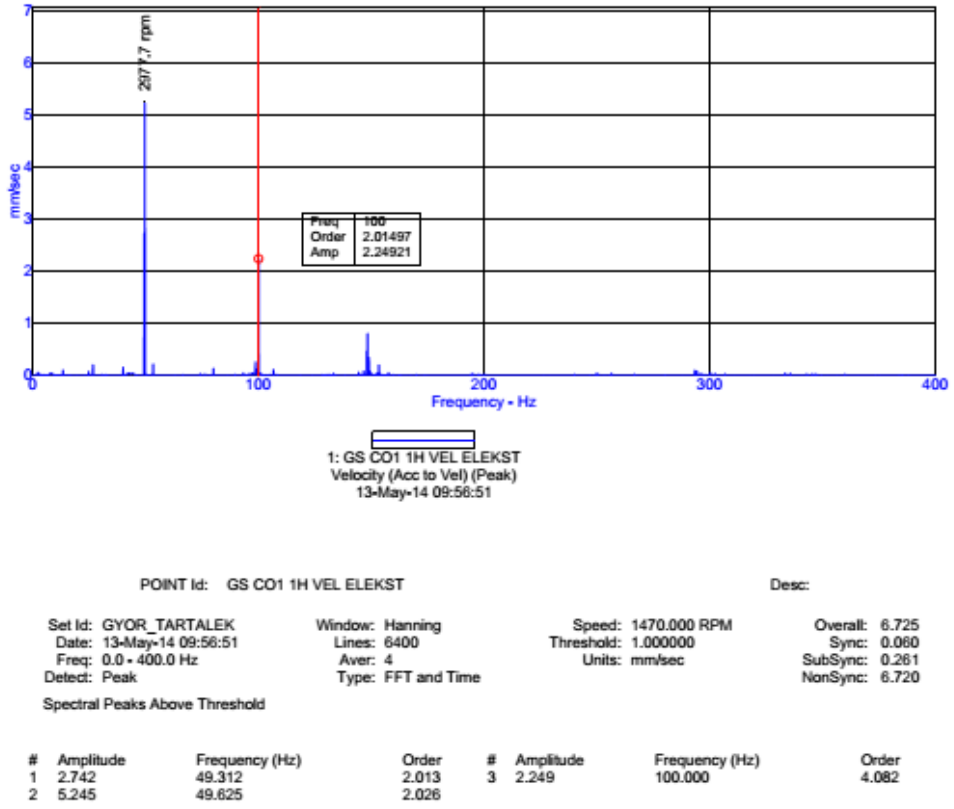
Az alábbiakban egy háromfázisú aszinkron motor motoráram analízissel történő állapotfelmérését mutatjuk be. A vizsgált motor robbanásveszélyes élelmiszeripari környezetben a folyamatos termelésben nélkülözhetetlen berendezéseket hajtanak, így rendszeres állapotfelmérésük elengedhetetlen mind munkavédelmi, mind gazdasági szempontból. A szén-dioxid szivattyú hajtómotor típusa Agisys T1CR 200L2-2 B5 T1-T4, üzemi feszültsége 400/690 V, névleges áramfelvétele 65,80/38,14 amper, teljesítménye 37 kW, fordulatszáma 2920 1/min volt.

4. ábra Szén-dioxid szivattyú hajtómotorjának adatlapja és beépítési helye



5. ábra A motoráram analízis eredménye

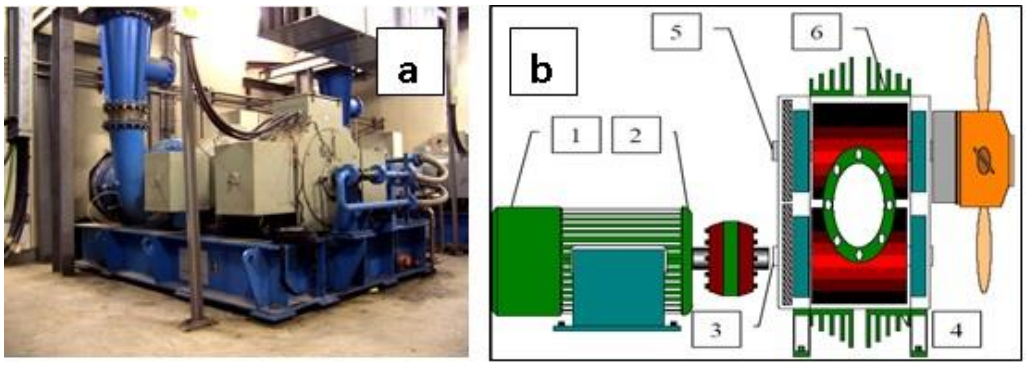
A motoráram analízis eredménye: 52,24 dB, mely megfelelő állapotú motort jelez. Ezt a megállapítást a 6. ábrán látható rezgésmérés eredménye is alátámasztja. A motor villamos eredetű hibájára utaló frekvenciákon nem vagy csak kis mértékű rezgés látható, a forgási frekvencián mért 5,245 mm/s rezgésérték villamos hibára nem utal.



6. ábra Ugyanazon a motoron azonos időpontban végzett rezgésmérés eredménye

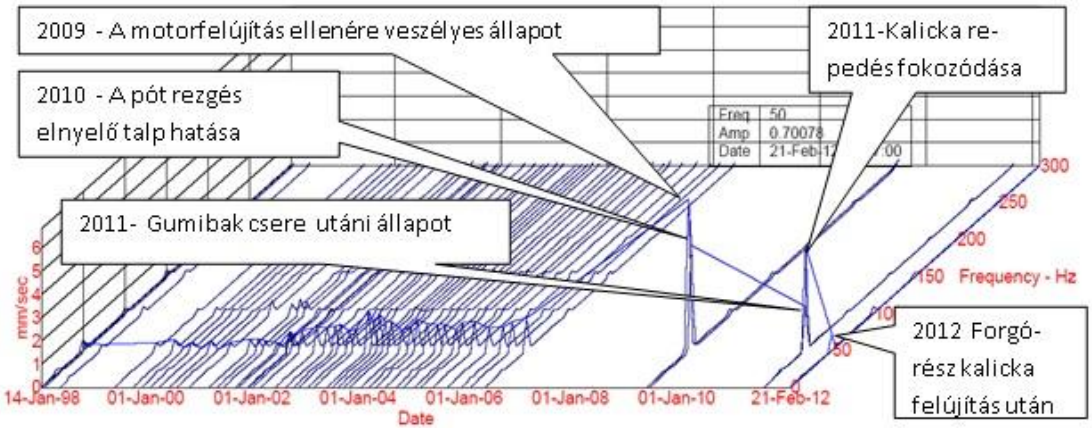
EGY LÉGFÚVÓ BERENDEZÉS VIZSGÁLATA

A következő esettanulmányban egy 40 000 m^3/h térfogatáramú, P_{mot} = 1100 kW teljesítményű légfúvó berendezés hibadiagnosztikáját mutatjuk be. A folyamatirányító rendszer a berendezést fokozatmentesen szabályozza a diffúzor segítségével, így a motor fordulatszáma állandó, de a terhelése fokozatosan változó. A berendezésen 1998 és 2006 között 2−3 havonta állapotfelmérő rezgésdiagnosztikát végeztek, mely időszakban a gép váratlan meghibásodás nélkül üzemelt. Az esetenkénti, soron kívüli zsírzással, üzem közbeni karbantartásokkal a tervezett nagyjavítási ciklus a kétszeresére nőtt. A 7. ábrán látható 6. számú mérési pontra automata rezgésvédelmi rendszert telepítettek, mely 6 mm/s rezgésnél automatikusan leállítja a berendezést. Ezután megszűntették a gép időszakos felülvizsgálatát, majd 2009-ben az üzemképes berendezésen TMK jellegű karbantartást végeztek. A nagyfelújítás végeztével a gép 50%-os teljesítmény mellett 6−7 mm/s rezgésértékek jelentek meg, melynek hatására a berendezés automatikusan lekapcsolt. A rezgésmérés során a berendezés minden pontján 50 Hz-es forgási frekvencián jelentek meg a veszélyes rezgésértékek, a vázszerkezeten 15−25 mm/s rezgésértékkel. Ezek a szimptómák egyszerre utalhatnak motor kiegyensúlyozatlansága, a motor vagy a vázszerkezet fellazulására, tengely-beállítási vagy elektromos problémára is. A rezgésspektrum analízis pontosabb kiértékelése, a hibák szétválasztása érdekében mozgás-animációs vizsgálatot végeztek. Ennek eredményeképpen egyértelművé vált a vázszerkezet billegése, amely feltámasztási és rezgéselnyelési problémákra utal. Másrészt a motor és hajtómű tengely ellentétes mozgását figyelték meg, mely tengelybeállítási hibára utal.



7. ábra A légfúvó berendezés képe és hajtás elrendezési, mérési vázlata

A költségek minimalizálása érdekében a javítás fokozatosan, az egyszerűbb beavatkozásokkal kezdődött. A fellazult csavarok meghúzása nem vezetett érezhető javuláshoz, Ezután a három legerősebb rezgést mutató helyre pót rezgéselnyelő talpakat helyeztek, ezzel próbálták „elhangolni" a gerjesztő erőket. Ezzel a megoldással már a teljes terhelés 70%-ig tudták üzemeltetni a gépet, mely minimálisan elégítette ki a termelés igényeit. Ezután a pontos tengelybeállítás és a rezgéselnyelő talpak cseréje a rezgéseket átmenetileg elfogadható szintre csökkentette. Folyamatos üzemben a berendezés egy évig üzemelt, majd a rezgésértékek újra növekedésnek indultak. A motor elektromos ellenőrzése az álló és forgórészen a mágneses mező ingadozását mutatta, mely forgórész excentricitásra vagy kalicka repedésre utalnak. Endoszkópos vizsgálat során egyértelművé vált a kalicka repedés ténye, melynek javítása után a gép teljes terhelés mellett is megfelelő rezgésértékeket produkált.



8. ábra Rezgés spektrumok a berendezésen végzett javítások során

ÖSSZEGZÉS

Az ipari mérésekből bemutatott esettanulmányok bizonyítják a módszerek ipari körülmények közötti alkalmazásának lehetőségeit és azok fontosságát, az időszakos állapotfelmérés fontosságát, a termelés során elengedhetetlenül szükséges motoroknál. A kalicka repedésre utaló elektromos hibák egy váltakozó áramú motoron esettanulmányban bemutattam az időszakos állapotfelmérő diagnosztika gazdaságosságát, bizonyos esetekben már a karbantartási költség egy nagyjavítás során meghaladja a több éves diagnosztika költségét, a termelés kieséssel együtt mindenképp gazdaságosabb lehetett volna annak rendszerben tartása a TMK jellegű karbantartás helyett.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Dr. Nagy István: Állapotfüggő karbantartás Műszaki diagnosztika I. Delta-3N Kft. Paks, 2006
[2] Barabás Miklós- Karsai Tibor: Villamos forgógépek tekercselése Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1978
[3] Benyeda László: Villanymotorok műszaki állapotának meghatározása rezgésdiagnosztikai
[4] módszerekkel. Kézirat, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
[5] Mechatronikai és Autótechnikai Intézet, Budapest, 2016.
[6] Vibration Diagnostic Handbook Technical Associates of Charlotte P. C.
[7] Dr. Szabó József Zoltán: Forgógépek üzem közbeni mozgásának próbapadi és ipari vizsgálata című cikk

CONDITION MONITORING OF ELECTRIC MOTORS BY MOTOR CURRENT AND VIBRATION ANALYSIS

During the condition monitoring of rotating machinery one of the most commonly used method is the comparison of vibration severity to various threshold values provided by international standards, and analysis of vibration signals using the FFT technology. This latter one method is an efficient tool to detect the potential severity of damages caused by vibration, too. In this paper apart from the method of vibration analysis the method of motor current analysis has been effectively used. It has been found, that the two methods are partly complementary to each other, and partly they confirm the conclusions drawn by each other.

Keywords: *electric motor, vibration analysis, motor current analysis,*

Szabó József Zoltán (PhD) egyetemi docens Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825	József Zoltán Szabó (PhD) Associate professor, Dy leader of Institute Óbuda University Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering Institute of Mechatronics and Automotive Technology szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825
Dömötör Ferenc (PhD) címzetes egyetemi docens Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Gépjármű Technológia Tanszék ferenc.domotor@gjt.bme.hu orcid.org/0000-0003-3385-9287	Ferenc Dömötör (PhD) Honorary associate professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Vehicle Engineering and Transport Engineering Department of Automotive Technology ferenc.domotor@gjt.bme.hu orcid.org/0000-0003-3385-9287

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-05-0470_Szabo_Jozsef_Zoltan-Domotor_Ferenc.pdf

Salavec Péter

FEJLESZTÉSEK A HULLÁM-ELŐREJELZÉS TERÉN AZ ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLATNÁL

Az Országos Meteorológiai Szolgálat 2016. november 1-je óta működő új honlapján (http://aviation.met.hu) a modell előrejelzések között szerepel a hullámrepülés támogatását szolgáló rész, melyen jelenleg mindössze egy időbeli szélprofil jelenik meg az AROME modellből az ország négy pontjára (Budapest, Kőszeg, Pécs és Pipis-hegy), melyek rendre a Budai-hegység, a Kőszegi-hegység, a Mecsek és a Mátra hullámterében találhatók. Célunk e rész fejlesztése szél, vertikális sebesség, (ekvi)potenciális hőmérséklet, nedvesség/felhőzet és Scorer-paraméter térbeli és időbeli vertikális metszetekkel. Az időbeli metszetek több hegység hullámterére, a térbeli metszetek a nagyobb hegységektől különböző irányokban húzott vonalak mentén kerülnek előállításra, mellyel a Kárpát-medencét igyekszünk lefedni, hogy a hullámrepülés támogatása minél szélesebb körű legyen. Távolabbi tervünk a hullámokhoz kapcsolódó turbulencia előrejelzése.

Kulcsszavak: *repülésmeteorológia, Hegyi hullám, hullám-előrejelzés, hullámturbulencia, Scorer-paraméter*

BEVEZETÉS

A magyar légtérben többnyire a 3 km alatti térrészt foglalja el az alacsony szintű kisgépes repülés forgalma. Ultrakönnyű, vitorlázó repülőgépek, sárkányrepülők, siklóernyők, paplanernyők, hőlégballonok, kötött ballonok és pilóta nélküli repülő eszközök teszik ki e forgalom nagy részét. A legtöbb művelet sportolási vagy turisztikai célú. Kisebb mérték-ben tudományos céllal használnak többnyire kötött ballonokat és pilóta nélküli repülőket, illetve időnként geográfiai célú felszín fotózás is történik.

A hegyi hullámok kialakulásának körülményei

Mivel Magyarország a Kárpát-medencében fekszik, ideális a földrajzi környezete a hegyi hullámok kialakulásához. Több alkalommal kialakulhatnak hegyi hullámok megfelelő szinoptikus időjárási helyzet esetén. Ugyanakkor ezek a hullámok csak ritkán hasznosíthatók hullámrepüléshez az időjárás egyéb körülményei miatt (pl. vastag felhőzet vagy erős turbulencia van jelen), amelyek nagyon veszélyessé, így lehetetlenné teszik a hullámrepülést [1][2].

Amikor a nyugati, északnyugati szél erős (15–40m/s a határrétegben, 30–70 m/s a szabad légkörben, szélirány profil közel konstans), hosszú hullámok alakulnak ki 2–50 km hullámhosszal. Ezek általában horizontálisan a Kárpát-medence nagyobb részét elfoglalják (a keleti, északkeleti területeket a Nyugati-Kárpátok hullámai, vagy a déli, délnyugati területeket az Alpok hullámai), vertikálisan pedig a teljes troposzférát. A vertikális szél oszcillációja bennük nagyobb amplitúdójú, erősebb emelések fordulnak elő a feláramlási oldalukon. Ezeket a hullámokat azonban gyakran erős rotorok vagy hullámtörési jelenség kísérik, erős turbulenciával. Ritka esetben erős délkeleti szél (Košava) hatására a Déli-Kárpátok is képes hullámokat létrehozni a Kárpát-medence délkeleti területei fölött, erős adriai vagy balkán-félszigeti mediterrán ciklon előoldalán [3].

Más esetekben, amikor a szél gyengébb, hullámképződés ritkán történik, de speciális hőmérsékleti és szélprofil megfelelő körülményt biztosíthat rövidebb hullámhosszú hullámok kialakulására a Kárpát-medence belső területeinek alacsonyabb hegyvonulatai környezetében. Ilyen hullámok keletkezhetnek például a Mecsektől délre (ahogy LHPP Pécs-Pogány repülőtér helyezkedik el) egy hidegfront mögött, amikor északi szél fúj 5–20 m/s-mal körül-belül az alsó 500m vastag rétegben, és a frontális inverzió az 1–3 km rétegben található. Más területeken, más és más időjárási helyzetben, szintén kialakulhatnak hullámok: a Mátrától délre (LHGY Gyöngyös-Pipishegy), a Börzsönytől keletre (Rétság), a Budai-hegységtől keletre (LHDK Dunakeszi), a Bakonytól délkeletre (LHBD Börgönd/Alba, LHSK Siófok-Kiliti), a Soproni-hegységtől keletre és a Kis-Kárpátoktól keletre (LHFM Fertőszentmiklós, LHPR Győr-Pér), a Kőszegi-hegységtől délkeletre (LHSY Szombathely, LHSM Sármellék/Hévíz-Balaton).

A hullámok haszna és veszélyei

A pilóták számára a hullámképződés valószínűsége hasznos információ nem csak azért, mert a hullámokat emelkedésre használhatják, de turbulens másodlagos jelenségek is kísérhetik, melyek veszélyesek számukra [4]. A gyakrabban hasznosított termikek általában csak a határrétegben vannak jelen, és általában legfeljebb 3km magasak. Ugyanakkor a hegyi hullámok akár az egész troposzférát elfoglalhatják. Az emelés körülbelül egy nagyságrendbe esik a hullámokban és a termikekben. Az áramlások térbeli szerkezetének változékonysága a hullámok esetében több óra, a termikek esetében viszont néhány perctől néhány óráig terjed. Órásnál rövidebb időskálán a hegyi hullám stacionárius, a termikek tulajdonságai azonban már e skálán is megváltozhatnak. A termikben lévő áramlás önmagában turbulens, míg a hullámáramlás közel lamináris. Ugyanakkor a hullámokat másodlagos turbulens jelenségek kísérhetik. A hegyi hullámok tehát sokkal könnyebben hasznosíthatók nagyobb távolságokra vagy nagyobb magasságokban történő repülésre, mint a termikek [5].

Nyári nappalokon termikek képződnek, melyek gyenge vagy közepes turbulenciát okoznak a határrétegben. Ez a turbulencia ritkán veszélyes a kisgépes repülés számára, ezért a termikeket gyakran használják az ultrakönnyű és vitorlázó repülők emelkedésre. Ilyenkor a horizontális szél általában gyenge vagy mérsékelt. Ezzel szemben a hegyihullám-turbulencia gyakran éri el az erős kategóriát, mivel a horizontális szél és a vertikális szélnyírás gyakran erős. Ugyanakkor a hullámturbulencia térbeli mintázata valamennyire megbecsülhető. Rotorok képződnek a hullámhegyek alatt. Másodlagos rotorok alakulhatnak ki a hullámvölgyek fölött, ha az amplitúdó a magassággal gyorsan csökken. Hullámtörés fordulhat elő a tropopauza alatt, amikor a jet jelen van, és megdönti a hullámhegyet (ennek következtében előfordulhat, hogy a leszálló ág sűrűbb levegője a hullámvölgy fölé ritkább levegője fölé kerül). Más típusú turbulens kísérőjelenségek is ismertek. A légkör nedvességtartalma határozza meg, hogy ezeknek a jelenségeknek – és magának a hullámnak is – lesz-e vizuális megnyilvánulásuk (Ac len felhők a hullámhegyen, rotorfelhők, irreverzibilis hullámok gomolyfelhői, stb): „elég száraz” levegő esetén a levegő felhőmentes marad (ekkor hegyihullám-CAT-ről beszélünk) [6][7].

A hullámelőrejelzés története az OMSZ-nál

Az Országos Meteorológiai Szolgálat Repülésmeteorológiai Osztálya 2011. március 11-ig adott ki naponta hullám-előrejelzéseket. A produktum tartalmazta a szinoptikus helyzet rövid

leírását a következő 36 h-ra, a végén néhány állítással a hullámok kialakulásának valószínűségére vonatkozóan: mely területeken, magassági szinteken alakulhat ki hullámzás, milyen erős emelés lehet bennük, illetve olykor a kapcsolódó turbulens jelenségek lehetőségéről is említést tettek az előrejelzők. „Távolabbi kilátások" címszóval egy rövid összefoglaló is szerepelt a következő 4–5 napra. Négy városra (Budapestre, Pécsre, Miskolcra és Szombathelyre, melyek a Budai-hegység (nyugati szél esetén), Mecsek (északi), Bükk (É-ÉNY) és Kőszegi-hegység (NY-ÉNY) hullámterében van) szerepeltek hőmérséklet, gradiens, szélirány, teljes horizontális szélsebesség, hegyvonulatra merőleges irányú horizontális szélsebesség és e két szélsebességgel számolt Scorer-paraméter profilok.

A profilok az ALADIN modellből kerültek kiszámításra a felszíntől 8km magasságig. Vertikális átlagolás történt 500m-es rétegekre a hőmérsékletre, gradiensre, szélsebességekre és irányokra. A Scorer-paraméter számítása mind a teljes szélsebesség, mind a hegyre merőleges sebességkomponens felhasználásával megtörtént. A merőleges eset az, ahogyan a hegyi hullámot szokás kezelni elméleti úton. Idealizált hegyalak esetén azonban a probléma általánosítható nem merőleges esetre is. A produktum magukat a hullámokat természetesen nem modellezte. Empirikus észlelési adatokra támaszkodva azonban általános állítások tehetők a hullámok kialakulásának valószínűségére vonatkozóan, melyek alapján egy „felhasználói segítség" készíthető a táblázatok, különösen a Scorer-profil értelmezéséhez. Eszerint hegyi hullám kialakulása (pontosabban a csapdázódásuk) akkor várható, ha a Scorer-profilnak 1–2 km magasság között 1–2 km^{-2} értékű maximuma van, fölötte pedig lassan csökken 0–0,6 km^{-2} között.

Ez a hullám-előrejelzés 2011. március 11-én megszűnt. Ennek egyik oka volt, hogy viszonylag ritkán alakul ki hullámrepülésre alkalmas hegyi hullám (gyakran erősen felhős, csapadékos idő, vagy erős turbulencia kíséri). Másrészt, az előrejelzés verifikálása is nehézkes. Kevés visszajelzés érkezik pilóták részéről a kialakult hullámokról. Nem volt lehetséges olyan mérések kivitelezése, melyekből a hegyi hullámok jelenléte egyértelműen detektál-ható. A hullámok ritkán jelennek meg kizárólag lencsefelhők formájában. A szinoptikus észlelésekben ritkán jelennek meg, és a rájuk alkalmazott kód (Ac4 és Ac7 középszintű felhőkódok) más, hasonló felhőket is jelenthetnek. A hullámok detektálására legalkalmasabbnak a webkamerás észleléseknek és a műholdas megfigyelések tűnnek akkor, ha kevés egyéb felhő van jelen a lencsefelhőkön kívül. A harmadik ok az előrejelzések mellé közzétett értelmezési segédlet volt, a benne foglaltak ugyanis kevés ismereten alapultak.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat új honlapja, az http://aviation.met.hu 2016. november 1-jén indult. Megjelenik rajta az Osztály minden produktuma, valamint minden, az országon belül nyilvánosan elérhető adat:

- Táviratok:
  - METAR-ok LHBP, LHPR, LHPA, LHSM, LHPP, LHKE, LHSN, LHUD, LHBC és LHDC repterekről;
  - Hosszú TAF-ok LHBP és LHPA, rövid TAF-ok LHPR, LHSM, LHPP és LHDC repterekre;
  - GAMET táviratok az SFC/FL100 légtérre 06/12 és 12/18UTC között
  - • SIGMET és AIRMET táviratok;
- Felszíni észlelések térképesen megjelenítve:
  - QNH (óránként az utolsó 12 órára)

- látás és felhőalap a NATO által használthoz hasonló színkódolással (óránként az utolsó 12 órára Közép-Európára);
- 2 m hőmérséklet, harmatpont és relatív páratartalom (10 percenként az utolsó 2 órára);
- 10m szél (áramvonal), átlagos és maximális széllökés (10 percenként az utolsó 2 órára);
- A szinop állomásokon észlelt aktuális időjárás (szignifikáns jelenség vagy felhőzet), 2 m hőmérséklet (10 percenként az utolsó 2 órára, a szinop adatok csak óránként frissülnek);
- csapadékradar (10 percenként az utolsó 3 órára)

✈ Regionális előrejelzés:
- 3 órás blokkokban, 9 órára előre, téli időszámítás alatt 6–18UTC, nyári időszámítás alatt 3–21UTC között;
- az előrejelzett 9 órás időszak általános időjárásának szöveges leírása;
- veszélyjelzési térképek zöld (nincs veszély), sárga és piros területekkel;
  - széllökés (sárga: >25 kt, piros: >35 kt);
  - látástávolság (sárga: <5 km, piros: <1 km);
  - 300 m alatti felhőalap (sárga: FEW/SCT, piros: BKN/OVC);
  - ónos eső (sárga: nem használt, piros: ónos eső lehetséges);
  - Cb felhő (sárga: ISOL, piros: OCNL/FRQ/EMBD);
  - zivatar (sárga: ISOL, piros: OCNL/FRQ/EMBD/SQL);
  - Áttekintő (a fentiek maximuma);
  - a Cb és a zivatar magába foglalja a többi jelenség piros fokozatát, így azoknak a színezése a zivataroktól függetlenül kialakulható veszély mértékét mutatja.

✈ Alacsony szintű szignifikáns időjárási térkép 6, 12 és 18UTC-re SFC/FL100 között Közép-Európára.
- Térkép a következő elemekkel:
  - frontok, konvergencia- és instabilitási vonalak;
  - alkörzetek, melyekben valamely szignifikáns jelenség (eső, szitálás, havazás, köd, párásság, ónos eső és zivatar) legalább OCNL mennyiségben előfordul úgy, hogy a VFR repülést ellehetetleníti;
  - szignifikáns jelenségek (szitálás, szemcsés hó, fagyott eső, eső, havas eső, hó, ezek záporos változata, záporok, ónos csapadék, zivatar, Cb, párásság, köd, viharos széllökés, hófúvás, porvihar, hegytakarás);
  - turbulencia és jegesedé (erősség és magasságtartomány);
  - 850 hPa szél 15 kt fölött (AROME modellből);
  - alacsony, közép és magas szintű felhőzet (AROME modellből);
- Táblázat az egyes körzetekben, alkörzetekben előforduló időjárási elemekről
  - körzetek és az egyes időjárási elemek térbeli gyakorisága;
  - felszíni látástávolság;
  - szignifikáns jelenség;
  - felhő mennyiség, típus, alap és tető;
  - hegytakarás, turbulencia és jegesedés;

        - fagypont magasság;
- ✈ AROME modell előrejelzések a következő 36 órára
    - szél, széllökés és hőmérséklet 10, 50, 100, 300, 600, 900, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500, 2750 és 3000 m;
    - szél+hőmérséklet térképek 1000 és 700 hPa között;
    - a legalacsonyabb és legmagasabb 0 °C magassága;
    - termik előrejelzés
        - átlagos és maximális emelés termikekben, termiktető (AGL és AMSL)
        - CCL és LCL (AGL és AMSL), Cu valószínűség és mennyiség;
        - átlagos gradiens (SFC/600m, SFC/900 m, SFC/1250 m, SFC/1500 m, SFC/2000 m, SFC/2400 m, 600/900 m, 900/1250 m, 1250/1500 m, 1500/2000 m, 2000/2500m, 2500/3000m);
        - Hőmérsékleti deficit ahhoz, hogy a termik elérje a 900, 850, 800, 750 és 700 hPa szintet.
    - Labilitási indexek (SSI, K, TT);
    - Hőlégballonos repülést támogató produktumok;
        - szél és relatív páratartalom profilmenetek az alsó 3 km-re különböző sport-repülőterekre (Agárd, Csorna, Debrecen, Eger, Gödöllő, Győr, Hajdúszoboszló, Kajászó, Keszthely, Kisköre, Miskolc, Pécs, Siófok, Sopron, Szeged, Szekszárd, Vác);
        - 10 m széllökés térkép;
        - előrejelzett felszíni csapadékmennyiség;
    - Hullámrepülést támogató produktumok
        - szél profilmenetek az alsó 12 km-re (Dunakeszi, Kőszeg, Pécs-Pogány és Gyöngyös-Pipishegy, melyek a Budai-hegység, Alpok/Kőszegi-hegység, Mecsek és Mátra lee oldalán találhatók);
        - 10 m széllökés térkép;
        - előrejelzett felszíni csapadékmennyiség.

Látható, hogy a hullámrepüléshez meglehetősen kevés információ van közzé téve. A széllökés és csapadék térképek alapján valamennyire látható, ha az általános időjárás lehetetlenné teszi a hullámrepülést. A széllökések a felszállást és a leszállást nehezítik, míg a csapadék létéből vastag felhőzet jelenlétére, esetleges rossz látási viszonyokra és alacsony felhőalapokra következtethetünk. A szél profilmenetek csak közvetett információt szolgál-tatnak a hullámképződés lehetőségéről: ha a szél erősödik a magassággal miközben az iránya nem változik, hullámképződés lehetséges. Ez azonban nem jelenti azt, hogy más szélprofil esetén nem képződhet hullám. Sőt, a hőmérsékleti (pontosabban a potenciális hőmérsékleti) profil erősebben meghatározó eleme a hullámképződésnek, és a relatív pára-tartalomnak is van rá hatása. Ha a troposzféra közel instabil rétegződésű (akár feltételesen instabil esetben is), a hullámképződés nem lehetséges. Egyes módusok csapdázódása történhet inverziós rétegekben, ami a vitorlázórepülők emelkedéséhez a leghasznosabb eset, de az inverziós rétegek „rossz” magassága, vastagsága ezt megakadályozhatja. A nem csapdázódó hullámok a hegyek környezetében vannak jelen, ahol a turbulens kísérőjelenségek térbeli változékonysága és a felhőképződés (hegytakarás) igen veszélyes lehet.

Ezek következményeként született döntés a hullám-előrejelzés bővítéséről a hullámrepülés támogatása érdekében. Új produktumok közzététele van tervben. Szél, hőmérséklet, nedvesség Scorer-paraméter és vertikális szélsebesség profilmeneteket (idő-magasság-metszeteket) és keresztmetszeteket (horizontális távolság-magasság-metszeteket) állítunk elő az OMSz-nál operatívan futó és fejlesztés alatt álló AROME mezoskálájú modellből.

A TERVEZETT PRODUKTUMOK

Hegyi hullámok és az AROME modell

A hegyi hullámok elméleti leírása számos egyszerűsítéssel lehetséges. Feltéve, hogy a jelenség csak a szabad légkörben van jelen (ami ritkán igaz), a viszkózus és turbulens tagok elhanyagolhatók. Ez nem csak a kísérő turbulenciáról kapható információ mellőzését jelenti a hullámáramlás közelében (ahol a szélnyírás lokálisan erős), hanem az olyan kísérőjelenségek, mint a rotoráramlások, a hullámtörés stb. kialakulását is megakadályozza a modellben. A szél egy stacionárius átlagos és egy perturbációs tagra van bontva. A perturbáció a hullámegyenlet levezetésekor szintén stacionárius, ám a csoportsebesség számításakor ezt nem szabad feltenni, ugyanakkor a nem-stacionaritás a valóságban a hullámok csapdázódását befolyásolja, akár meg is akadályozhatja [8][9][10].

A hegyi hullámoknak kétféle tér- és időskálája létezik. Az egyik skála a hullámhossz és a periódusidő, amely alatt a részecske egy hullámon áthalad (ez a perturbációs tagok skálája). Ez térben körülbelül 0,5–50 km, időben körülbelül 1–100 perc tartományt jelent. Ugyanakkor a hullámok nagy területet képesek elfoglalni hosszabb időn keresztül, attól függően, hogy a hullámképződés számára kedvező feltételek mekkora területen és mennyi időn keresztül állnak fenn. Ez az átlagos tagok skálája. Ez általában 1–10 óra élettartamot jelent. A térbeli skála lehet egy hegység lee oldala felől lévő síkság egy kisebb része, vagy olyan nagyobb területek, mint a Kárpát-medence. Kiterjedést tekintve 10–1000 km. A határréteg-effektusokat szintén el szokás hanyagolni, ez csak akkor jó megoldás, ha a csapdázódás olyan rétegben történik (általában a közép-troposzférában), amely nincs kapcsolatban a felszínnel [11].

Az AROME modell egy korlátos tartományú mezoskálájú modell, mely az Országos Meteorológiai Szolgálatnál operatívan fut, napi 8 alkalommal a következő 48 órára a Kárpát-medencére [12]. Horizontális felbontása 30_{00}, tehát a körülbelül 4 km hosszú hullámokat már képes leírni a dinamikája. E modell kimenetéből az OMSZ-nál fejlesztett HAWK-3 megjelenítő rendszerrel automatikusan előállíthatók lesznek produktumaink.

Idő-magasság metszetek (profilmenetek)

Az idő-magasság metszetekkel (profilmenetekkel) adott helyen a hullámképződés szempontjából kedvező feltételek fennállásának időtartama ellenőrizhető. Ha hullám csapdázódás történik, megbecsülhetővé válik az a tartomány, amelyben ezek a hullámok még csapdázottak maradnak. E csapdázott hullámok ezért addig élnek, amíg a valamely feltétel egy hirtelen változás következtében a becsült tartományon kívülre kerül, szignifikánsan megváltozik.

Profilmenetek megjelenítését tervezzük több sportrepülőtérre, melyek egy-egy hegység lee oldalán helyezkednek el (pl. LHDK Dunakeszi a Budai-hegység keleti oldalán, LHGY Gyön-

gyös-Pipishegy a Mátra déli oldalán, stb). Mivel a hegyi hullámok nagyobb területre is kiterjednek, különösen a nagyobb hegységek (Kárpátok, Alpok) által okozott hosszabb hullámok, e produktumok nem csak a hegyek közelében lévő helyeken lehetnek hasznosak, hanem például az Alföld sportrepülőterein is, mint pl. LHKA Kalocsa, LHMP Matkópuszta stb.

Szél

A hegyi hullámok kialakulásához a tapasztalatok alapján a legalkalmasabb szélprofil, ha az irány a magassággal nem változik, a sebesség pedig növekszik. Ugyanakkor hullámok nem feltétlenül alakulnak ki ilyen szélprofil mellett, sőt, más szélprofil esetén is kialakulhatnak. Az erős vertikális szélnyírás is kiolthatja a hullámokat. A csapdázott hullámok még érzékenyebbek a szélprofil változásaira, mivel ők stacionárius feltételek mellett tudnak kialakulni [13]. A szél profilmenetein e feltételek ellenőrizhetők.

A vertikális nyírás hiánya (különösen az irány szerinti nyírásé) a csapdázódás esélyét növelik. Erős szélnyírás turbulenciát generál, amely zavarja a hullám lamináris áramlását, ami az esetleg jelen lévő lencsefelhőkön mammatus, catellanus képződést okoz. Erős szélnyírás esetén a turbulens örvények a hullámhosszal összemérhető méretűvé nőhetnek, ami a hullámokat elpusztítja. Az ehhez szükséges szélnyírás „küszöb" azonban nagyban változhat, több paramétertől függően, mint például a hullámhossz, a hullámzó réteg vastagsága, Brunt-Väisälä-frekvencia stb [14]. A szél profilmenetéből az áramlás átlagos stacionaritása fennállásának időtartama becsülhető.

Relatív nedvesség

A relatív nedvesség a felhőzet indikátoraként fogható fel. Fontos tudnunk, hogy felhőmentes feltételek állnak-e fenn hullámrepüléshez. Mivel a felhő önmagában veszélyes a hegytakarás miatt, felhős környezetben kialakuló hullámok nem hasznosíthatók. Egy nedves, de telítetlen környezetben alakulhatnak ki lencsefelhők, vagy feltételes instabilitás esetén a hegy csúcsán zivatar [15]. A nedvesség profilmenetből becsléseket lehet tenni arra, hogy jelen lehet-e vastagabb felhőtakaró.

Potenciális és ekvipotenciális hőmérséklet

A hegyi hullámok, illetve általánosabban a belső gravitációs hullámok, csak akkor tudnak kialakulni, ha az áramlásban függőlegesen elmozduló légrész stabil egyensúlyi helyzetben van. A stabilitás típusa alapján a hullámokat is három típusba sorolhatjuk [16]:

- **Száraz hullámok** azok, melyekben nem képződik felhő. A légrészecske a száraz-adiabata mentén rezeg, és elég száraz ahhoz, hogy a hullámhegy tetején se érje el a telítést. Ha a légkör abszolút instabil (pl. nyáron a határértegben általában), ez a hullám nem alakulhat ki. Száraz hullámok kialakulásához kedvező esetben a potenciális hőmérséklet emelkedik a magassággal.
- **Reverzibilis nedves hullámok** az előzőkhöz hasonlóak, de lencsefelhők képződnek a hullámhegyeken. A légelem eléri a telítettséget és nedves-adiabatán halad a hullámhegy körül. E hullámok kialakulásának feltétele, hogy a légkör abszolút stabil legyen, vagyis az ekvipotenciális hőmérséklet a magassággal emelkedik.
- **Irreverzibilis nedves hullámok** tulajdonképpen nem hullámok a szokásos értelemben. Ebben az esetben a levegő feltételesen instabil. Ha a nedvesség elég nagy ahhoz, hogy a

légelem elérje a telítést a hullámhegyen, gomolyfelhő-képződés kezdődik (mély konvekcióval), amely gyakran zivatart okoz a hegy csúcsa körül. Ennek lokális áramlásai megakadályozzák a lee-oldali hullám kialakulását. Ebben az esetben a potenciális hőmérséklet növekszik, az ekvipotenciális hőmérséklet azonban csökken a magassággal. Ilyenné alakul-hatnak hullámok a lee-oldalon a hegytől távolabb is lokálisan feltételesen instabil, a hegy környezetében viszont abszolút stabil rétegződés esetén is.

Külön érdekesség, hogy mivel a relatív nedvesség a magassággal változhat, a hullámtípus is változhat a magassággal. Előfordulhat, hogy egy néhány tíz méter vastag réteg száraz, a következő réteg reverzibilis nedves, felette pedig ismét száraz. Ez egyrészt azt jelenti, hogy többrétegű lencsefelhők alakulhatnak ki. Ez hidegebb környezetben könnyebben megtörténik, mivel a száraz és reverzibilis nedves légelem gyorsulása között ekkor kisebb a különbség, mint melegebb környezetben. Az is lehetséges, ahogyan a hullám fejlődik, bizonyos rétegek feltételesen instabil környezetet érnek el, és beindul a konvekció, ami a hullámot aztán elgyengíti. Hasonló jelenség, amikor egy gomolyfelhő tetejénél válik a légréteg abszolút stabillá, ahol reverzibilis nedves hullámképződés során pileus alakul ki.

A potenciális hőmérséklet és ekvipotenciális hőmérséklet profilmenetei segítenek elkülöníteni, mely rétegekben milyen típusú hullámok alakulhatnak ki, és időben ez hogyan változhat. Az is látható, ha egy réteg instabillá válik, akkor a hullámok gyors elhalása várható.

Scorer-paraméter

A w_0 vertikális sebesség-perturbáció egyenletében – amely egy stacionárius másodrendű homogén lineáris parciális (Long-féle) differenciál-egyenlet: $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}-\ell^2\right)w'=0$ – egy nulladrendű tag jelenik meg, melynek együtthatója az $\ell^2(z)=\frac{N^2}{\overline{u}^2}-\frac{1}{\overline{u}}\frac{\partial^2\overline{u}}{\partial z^2}$ Scorer-paraméter. Itt $\overline{u}(z)$ a horizontális szélsebesség időátlaga, z a magasság, $N^2=\frac{g}{\overline{\theta}}\frac{\partial\overline{\theta}}{\partial z}$, ahol $N(z)$ a Brunt-Väisälä-frekvencia, g a gravitáció, $\overline{\theta}(z)$ a potenciális hőmérséklet időátlaga [8][10].

A Scorer-paraméter gyöke a hegyi hullámok hullámszámvektorának hosszaként fogható fel. Tegyük fel, hogy a domborzat k_x horizontális hullámszámú hullámokat generál. A diszperziós reláció (ami egy Pitagóraszi típusú egyenlet: $\ell^2=k_x^2+k_z^2$) a Scorer-paraméter ismeretében (amely a környezet állapotától függ) adott k_x horizontális hullámszámhoz egy k_z vertikális hullámszámot rendel. Ezért a Scorer-paraméter egy felső korlát a hullámszám-vektor-komponensekre. Hullámok minden frekvenciával kialakulnak, de csak azok lesznek vertikálisan is periodikusak, melyekre$k_x<\ell$. Az ilyen hullámok csoportsebességének a vertikális komponense valós, ráadásul pozitívnak kell lennie, különben a hullám a világűrből nyerné az energiát (a belső gravitációs hullámok vertikálisan felfelé „sugároznak”). A többi hullám, melyre $k_x>\ell$, vertikálisan elhaló, az ő csoportsebességük horizontális.

Ahhoz tehát, hogy egy k_x horizontális hullámszámú hullám periodikus legyen vertikálisan is, $\ell^2>k_x^2$ szükséges, hogy $k_z^2=\ell^2-k_x^2$ pozitív legyen. Ha a Scorer-paraméter változik a magassággal, egy adott hullámmódus számára lehetséges, hogy egy bizonyos légrétegben vertikálisan periodikus, míg másikban elhaló. Egy ilyen réteghatár meggátolja az energia hullám általi kisugárzását, a hullámot visszaveri. Ez a csapdázódás jelensége.

Másként fogalmazva, egy réteg, ahol a Scorer-paraméter megváltozik, visszaveri, elnyeli és áteresztí a hullámokat. Azon hullámok számára, melyeket egy ilyen réteghatár csapdáz, az áteresztési együttható zérus. A reflexió függ annak a rétegnek a vastagságtól, mely-ben a hullám vertikálisan periodikus. Egy hullám a réteghatárról akkora amplitúdóval verődik vissza, amekkora a kilengése a réteghatáron, tehát ha a hullámhegy nem a réteg-határra esik, a reflexió kisebb lesz 1-nél, elnyelődés történik. Ezért, annak ellenére, hogy végtelen sok visszaverődés történik, az egyes módusok amplitúdóinak összege véges lesz $\left(A = \frac{A_0}{1-r}\right)$. Végtelen amplitúdó r=1 esetén fordulhatna elő. Tulajdonképpen egy kvantumszerű kiválasztódás történik: csak néhány hullámmódus fog csapdázódni, ezeknek lesz végtelen az amplitúdójuk matematikai értelemben. A valóságban azonban a másodlagos (eredetileg elhanyagolt) kísérőjelenségeket (pl. turbulens másodlagos áramlások) is figyelembe kell vennünk, mivel az eldisszipálja a hullámok energiájának egy részét, így véges marad ezek amplitúdója is.

Látható, hogy a csapdázott hegyi hullámok a legjobban hasznosíthatók a vitorlázó repülők által emelésre vagy utazásra. Mivel a Scorer-paraméter profilja használható a leginkább a csapdázódés lehetőségének becslésére, annak profilmenete lehet a leghasznosabb a felhasználók számára. Azonosítható, hogy mikor és melyik rétegekben alakulhat ki csapdázódás, és hogy a csapdázott hullámok a troposzféra mely részét fogják elfoglalni. Ha hullámok csapdázódnak, addig fognak életben maradni, amíg a magas Scorer-értékek rétegének vastagsága nem csökken szignifikánsan, vagy maga a Scorer-érték nem csökken szignifikánsan. Emelkedő rétegvastagság vagy paraméter érték következtében újabb módusok válhatnak csapdázottá, amely egy gyors változást okoz az áramlási képben, amíg az új módus felerősödik. Ez veszélyes lehet, mivel hirtelen szélirányváltozások, az emelés elvesztése, átmeneti turbulenciaerősödés lepheti meg a pilótákat.

Térbeli keresztmetszetek

A térbeli keresztmetszetek megmutatják, hogy a hullámokat kialakító hegytől távolodva mekkora távolságig állnak fenn a kedvező körülmények a hullámok csapdázódásához (az adott irányban). A hullámmező nagy valószínűséggel addig fog kiterjedni, ahol legalább az egyik kedvező feltétel megszűnik, kicsúszik a kedvező tartományból. E tekintetben a térbeli keresztmetszet gyakorlatilag ugyanarra használható, mint az időbeli profilmenet, azzal a különbséggel, hogy itt a térbeli kiterjedés, és nem az élettartam becsülhető (az átlagos skála másik eleme). Ebben az esetben ugyanakkor egy, a térképeknél találhatóhoz hasonló panel van tervben azért, hogy állítani lehessen, melyik modell-időlépcsőben érvényes térbeli metszetet lássuk.

Térbeli keresztmetszetek operatív előállítását tervezzük több különböző irányban a Magas-Tátra és az Alpok felől kiindulva. A metszetek terveink szerint lefedik majd azokat az irányokat, melyekben gyakrabban fúj erős szél, azaz nagyrészt a nyugati, északnyugati, északi szelek irányát. A Tátra felől délkeleti irányban Kelet-Magyarország fölé lesz egy metszet, valószínűleg az Eperjes-Tokaji-hegységen vagy a Bükkön keresztül. Ebben az irányban kiterjedt hullámképződés zajlott 2017. október 13-án, amely a lejjebb olvasható demonstratív esettanulmányunk tárgya [17]. Másik metszetet észak-déli irányban tervezzük, a Duna mentén, vagy azzal párhuzamosan a Duna-Tisza-közén, elérve a szerbiai Tarcal-hegységig (Fruška Gora). Egy harmadik metszet a Dunántúl irányába haladna, keresztül a Bakonyon és a Bala-

tonon. Az Alpok felől egy metszet Budapest és Északkelet-Magyarország felé mutatna, keresztül a Budai-hegységen, egy másik kelet-északkelet felé a Bakonyon keresztül és egy harmadik délkelet felé a Mecseken keresztül. Egy további metszet van tervben a Kis-Kárpátoktól indulva délkelet felé, mivel az a hegység északnyugati áramlásnál nagy területre kiterjedően okozza rövidebb hullámok keletkezését a medence északnyugati területein. E hegységnek különösen ideális a topográfiája (hosszú, keskeny, egyenes, az uralkodó szélirányra merőleges, mindkét oldalon nagyobb síkság található).

Mivel a rövidebb hullámokat az AROME jelenlegi fejlesztési szintjén nem képes megfelelően modellezni, más metszetek nagy valószínűséggel alig mutatnának hullámképződésre utaló jeleket ideális esetben is. Ugyanakkor a legtöbb kisebb hegység a Kárpát-medencén belül szintén képes olyan hosszabb hullámokat létrehozni, mely a modell által már leírható. Ezért rövidebb keresztmetszetek létrehozása is tervezett, elsősorban annak tesztelése céljából, hogy kapunk-e használható, illetve a felhasználók által hasznosítható információkat legalább olyan esetekben, amikor várható hullámképződés. Például nyugat-keleti irányú keresztmetszetek a Börzsönyön vagy a Budai-hegységen keresztül, vagy észak-déli irányúak a Mátrán, a Bükkön vagy a Mecseken keresztül erre megfelelőek lehetnek.

Szél

A szél térbeli keresztmetszetei az időbeli profilmenetekhez hasonlóan használható lehet. Ha valahol a horizontális szélirány megváltozik, az a hullámok számára gyakran „gátat" képez (például egy front vagy konvergenciavonal). Szintén információ lehet a szélnek a metszet menti szélkomponens (a szélvektor metszetre vetítésének nagysága). Egy hosszú hegyvonulattal párhuzamos szélkomponens gyakran nem okozza hullám kialakulását.

Relatív páratartalom

Szintén hasonlóan értelmezendő, mind a profilmenet: megmutatja, hogy (térben) hol várható nagyobb valószínűséggel felhőképződés, és hol alakulhat ki felhőmentes környezet. Az is látható rajta, hogy az esetleges felhőképződés összefügghet-e csupán a hullámzással: ha periodikus mintázat alakul ki a relatív nedvességben, az (a modellben is kialakuló) lencsefelhőképződésre utal. A relatív nedvesség oszcillációját a száraz-adiabatikus hűlés/melegedés, és így nedvesedés/száradás okozza a légelem emelkedése/süllyedése során.

Potenciális és ekvipotenciális hőmérséklet

A potenciális hőmérséklet változásai hatással vannak a hullámzás kiterjedésére. Ha horizontálisan egyre nagyobb területen stabilizálódik a légkör, a hullámok ezt a területet elfoglalják. Ahol a potenciális hőmérsékleti gradiens lecsökken, ott a hullámhossz megnő, az amplitúdó csökken, a hullám maga pedig vertikálisan elhalóvá válhat. A réteg tetejének süllyedése a csapdázott hullámok hosszát növelheti. Ezek a hullámok feláramlási oldalán az emelés csökkenését eredményezik.

Reverzibilis nedves hullámok esetén az ekvipotenciális hőmérséklet is hasznos információ. Ennek csökkenése állandó potenciális hőmérséklet mellett telítődést jelent, amely miatt a hullámok irreverzibilissé válhatnak: térbeli csökkenés esetén előfordulhat, hogy a hullám csak a hegytől távolabb válik irreverzibilissé, ahol lencsefelhő helyett gomolyfelhő fog kialakulni, ismétlődő záporképződés játszódhat le. Bár e konvektív képződmény a környezetében a hul-

lámot elfolytja, disszipációja után a hullám újra felerősödhet, és ha a gradiensek az előzőhöz hasonlóak maradtak, újabb zápor alakulhat ki.

Scorer-paraméter

Mivel a Scorer-paraméter az, amelyik a legközvetlenebb módon határozza meg a hullámok viselkedését, különösen a csapdázódás tekintetében, annak térbeli keresztmetszetéből meghatározható, hogy a hegyektől milyen távol lehet tapasztalható még a hullámzás. Ah-hoz, hogy hullámok csapdázódjanak egy rétegben, az szükséges, hogy a Scorer-paraméter ott szignifikánsan magasabb legyen, mint fölötte és alatta. Egy térbeli keresztmetszeten egy ilyen réteg hullámvezető csatornaként fogható fel. A csatornában a Scorer-paraméter kisebb változásai általában még nem befolyásolják a hullámok viselkedését. Hasonlókép-pen egy kisebb rétegvastagság módosulás sem okoz nagy változásokat a hullámképben, legfeljebb a horizontális hullámhossz nő meg.

Ahol a Scorer-paraméter csökken, csökken a csapdázott hullámok vertikális hullámszáma is, így pedig nem a hullámhegy lesz a réteghatáron, a reflexió kissé lecsökken 1-ről, a hullámenergia egy része elszökik. Ha távolabb újra megnő a Scorer-paraméter, e hullám újra csapdázódik. A Scorer-paraméter magasságfüggése számos hullámjelenséget képes létrehozni a légkörben, ezek további részletezésétől most eltekintünk.

A Scorer-paraméter az AROME modellből számítható parametrizációként, és 3D-s mező-ként előállítható. Ez a munka jelenleg zajlik. Az implementáció kissé költséges a számítási kapacitást tekintve. A modell a határréteg fölött nyomási szinteken dolgozik, ezért ott magassági szintekre történő interpolációval állítjuk elő a bemeneti mezőket. Ennek optimális vertikális felbontását szükséges megtalálni. Túl finom felbontás a változók értékeit kissé zajossá teszi: a horizontális szélsebesség második deriváltjában egy oda-vissza ugrálás jelenik meg, mely a Scorer-paraméter második tagjában egy, a szokásos értékekkel összemérhető, a határrétegben annál nagyobb zajt okoz. Túl durva felbontás esetén pedig egy-egy vékonyabb réteg, ahol a paraméterek erősebben megváltoznak (pl. erős inverzió teteje), elmosódnak a kimenetben, ezáltal a Scorer-paraméter szisztematikusan alábecsült lehet. E hibák kijavítása után a Scorer-paraméter is elérhető lesz a modellből, és a többivel megegyező módszerrel lehet belőle előállítani a produktumokat.

Vertikális szélsebesség

E paraméterből csak térbeli keresztmetszetet érdemes készíteni, az időbeli keresztmetszeten a stacionárius hullámok nem azonosíthatók. Ha a modellben kialakulnak állóhullámok, e produktum azokat közvetlenül megmutatja. Az is kiderülhet, hogy ha nem csak egyetlen módust csapdáz a modell, ekkor pedig az is előfordulhat, hogy láthatóvá válik, ha különbö-ző rétegek különböző hullámokat képesek csapdázni, például egy 2–6 km közötti réteg egy hosszabb, egy 2–4 km közötti réteg pedig egy rövidebb vertikális hullámhosszú hullámot. Ehhez hasonló történt a lejjebb bemutatott 2017. október 13-ai esettanulmányunkban is [17].

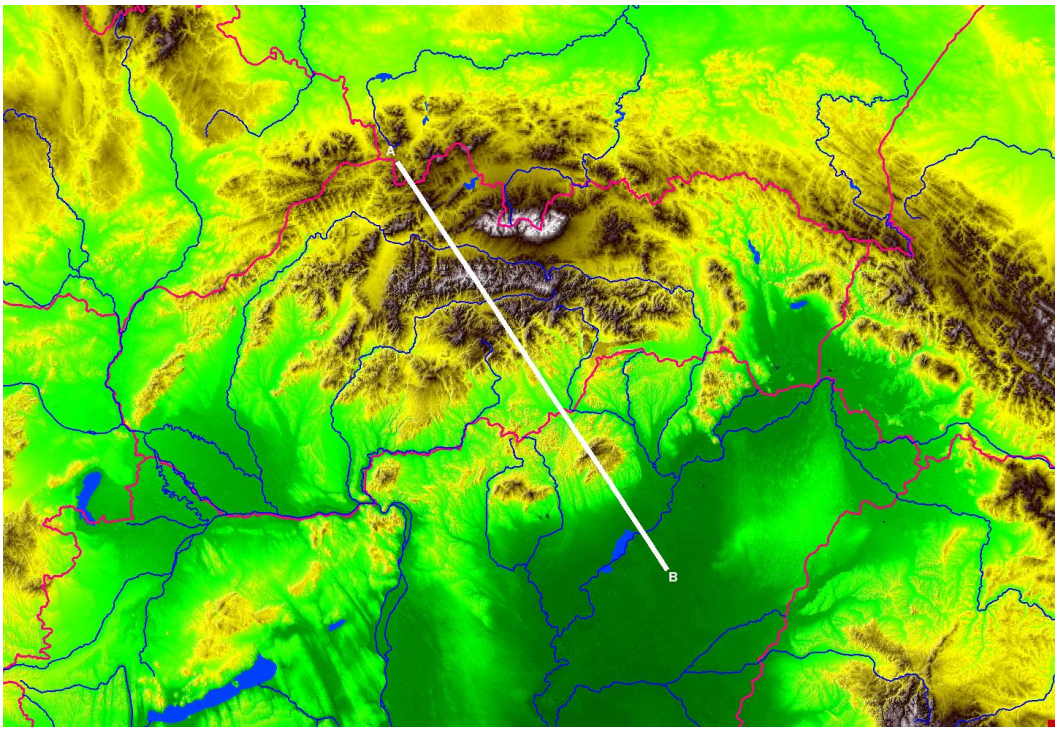
ESETTANULMÁNY

A fejlesztés még kezdeti fázisban van, a fent bemutatott tervek közül egyelőre a térbeli keresztmetszetek olyan dizájn tervei készültek el, melyekkel tesztelhető lesz majd használhatóságuk. Erre szolgál a most következő esettanulmány is. Bár még maga a dizájn sem végleges, mivel a lentebb bemutatott ábrák néhány, a honlapon alkalmazott formai megoldást (pl. képarány, feliratok formája stb.) egyelőre mellőznek.

2017. október 13-án Magyarország északi, északkeleti tájai fölött kiterjedt hullámzás volt megfigyelhető. Jelei elsősorban a műholdképeken mutatkoztak, de webkamera-felvételeken is azonosíthatók voltak lencsefelhők. Ezt bemutattuk egy rövid, akkor még csak érdekességnek szánt bejegyzésben az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapján [17], később ezt az esetet választottuk ki esettanulmányunk alanyaként. Egy másik érdekes eset történt 2017. december 23-án is [18], erre az esetre egyelőre nem készítettük el a metszeteket, szükség esetén az AROME modell visszamenőleges futtatását kérjük majd.

E szakaszban a tervek bemutatására fektetjük a hangsúlyt. A produktumok létrehozása után az első tesztelési fázisban néhány olyan alkalommal, amikor a modell alapján vár-ható, vagy a műhold- vagy kameraképek alapján észlelhető hullámtevékenység, a műhold és a modellfutás összehasonlításával állapítjuk meg, hogy a produktumok alkalmasak-e a várható hullámképződésről információt szolgáltatni. Később a pilóták észleléseire támaszkodva szeretnénk információt gyűjteni arról, hogy mikor alakult ki hullámzás a légkörben, manapság azonban alig érkezik észlelés a vitorlázórepülő pilótáktól.

A következőkben bemutatott néhány ábrán a kiválasztott esetben a hullámzásra utaló jeleket keressük. A metszet helyét az 1. ábra mutatja. A kiválasztott időpont 11UTC, de néhány esetben más időpontok is bemutatásra kerülnek. Erre az AROME fejlesztésével foglalkozó kollégák utólagosan újra lefuttatták és egy archívumban elérhetővé tették a modell 2017. október 13-ai 6UTC-s futását.

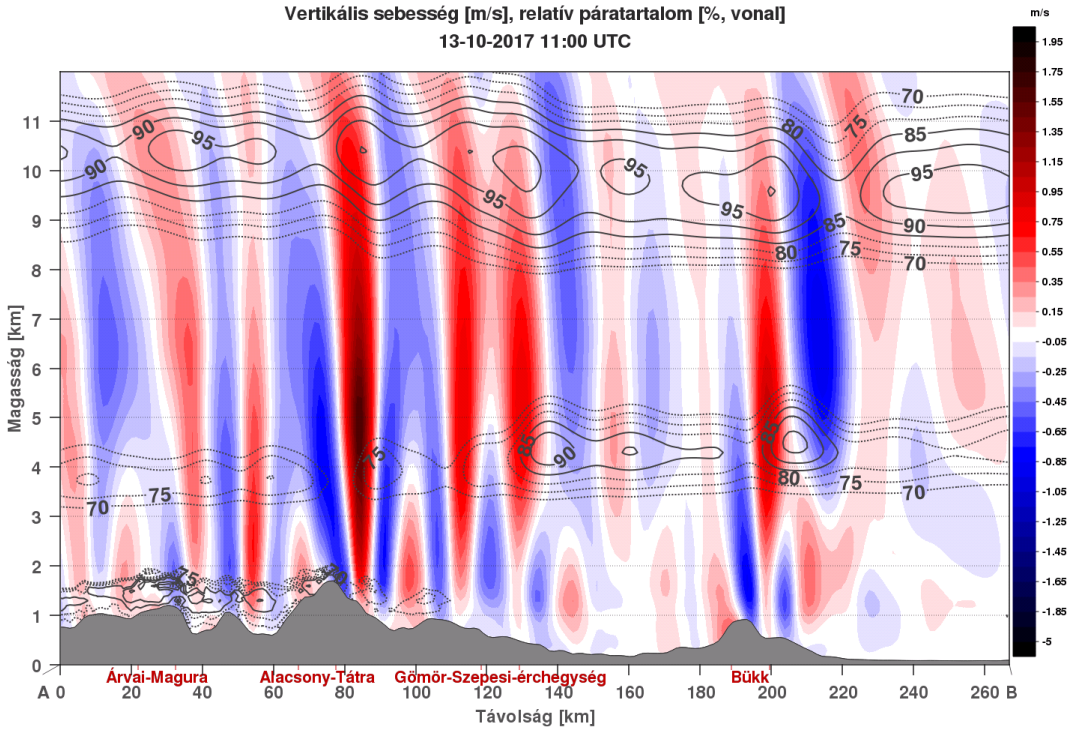


1. ábra A metszetek helye az Északnyugati-Kárpátok térképén

Vertikális sebesség

Elsőként a vertikális sebesség produktumával foglalkozunk (2. ábra), mert ez mutatja meg a legközvetlenebbül a hullámok jelenlétét. A kiválasztott esetünkben is látszott, hogy az AROME modell dinamikája képes volt leírni a hullámokat. Egy kb. 25 km hosszú hullám a teljes troposzférát elfoglalta, bár az Alföld fölött ennek vertikális sebessége a modellben már meglehetősen kicsi volt. Látszik a metszet tetején a hullámok visszahajlása is (magasabb kivágaton 12 km fölött ez még erősebb), amely a tropopauza erős inverziójának és az erős magassági jet hiányának köszönhető. Alacsonyabb szinteken, kb. 3–4 km magasságig egy rövidebb hullám is látszik az Alacsony-Tátrától „jobbra” (délnyugatra).

Ezen a produktumon a relatív nedvességnek csak a nagy értékeit jelenítettük meg. Abban szintén látszik némi térbeli periodicitás, ami középszinten lévő nedvesség esetén lencsefelhők kialakulását valószínűsíti. Ez a lencsefelhő-képződés a valóságban is bekövetkezett [17]. Bár a nedvesség a modellben a felhőképződéshez képest meglehetősen alacsony, a kialakuló hullámok amplitúdója elég ahhoz, hogy a levegő a hullámhegyen elérje a telítettséget. A Magura-medencében és a Vág-völgyben köd és alacsony szintű rétegfelhőzet volt jelen.



2. ábra A vertikális sebesség és a relatív nedvesség 2017. október 13-án 11UTC-kor

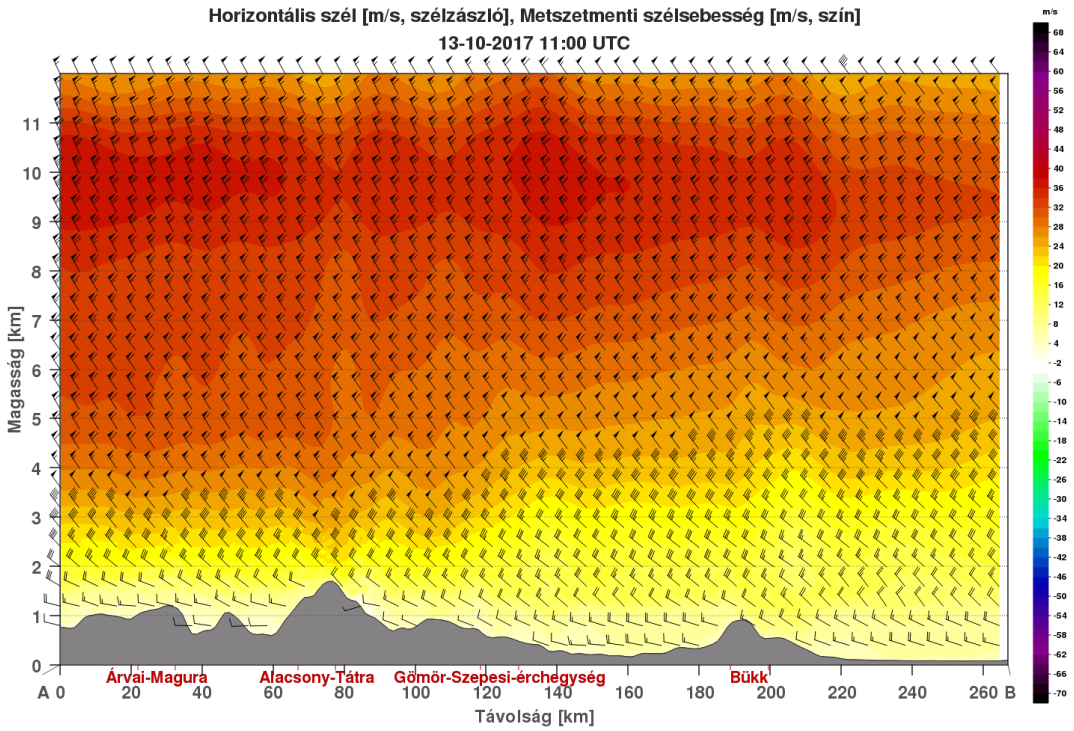
Szél

A 3. ábra3. ábra a szél produktuma, rajta a horizontális szél iránya és sebessége van feltüntetve szélzászlókkal, a színek a horizontális szélkomponens nagyságát jelentik. Meleg színek jelölik a metszeten „balról jobbra”, ez esetben északnyugatról délkeletre fújó szelet.

Általában elmondhatjuk, hogy ha ez a komponens nagy, akkor nem valószínű, hogy a szél nagy szöget zár be a metszettel (de ezt a szélzászlók és a metszet irányának ismerete alapján is eldönthetjük). Említettük, hogy a hullámképződés számára hasznos, ha a horizontális szél

iránya a magasság szerint nem változik, sebessége pedig növekszik. A produktum ezt a kiválasztott esetben jól szemlélteti.

Bár a hullámok leírásakor a hullámegyenletet a vertikális szélre írjuk fel, a horizontális szélben is mutatkozik perturbáció (hullámzás). Ennek egyik magyarázata, hogy a magasságfüggő átlagos horizontális szél az adott magaságban lévő rétegre vonatkozik, de azt a vertikális szél kimozdítja a helyéről. Ez szintén látszik a modellen, ahogy az Alacsony-Tátra és a Bükk fölött a metszet menti szélkomponens izovonalai hullámvonalban haladnak. Ennek az effektusnak a megjelenítéséhez kontrasztosabb színskála szükséges. Elégséges lehet a ±70m/s skálavégpont helyett alacsonyabb értéket is megadni.



3. ábra A horizontális szél és metszetmenti komponense 2017. október 13-án 11UTC-kor

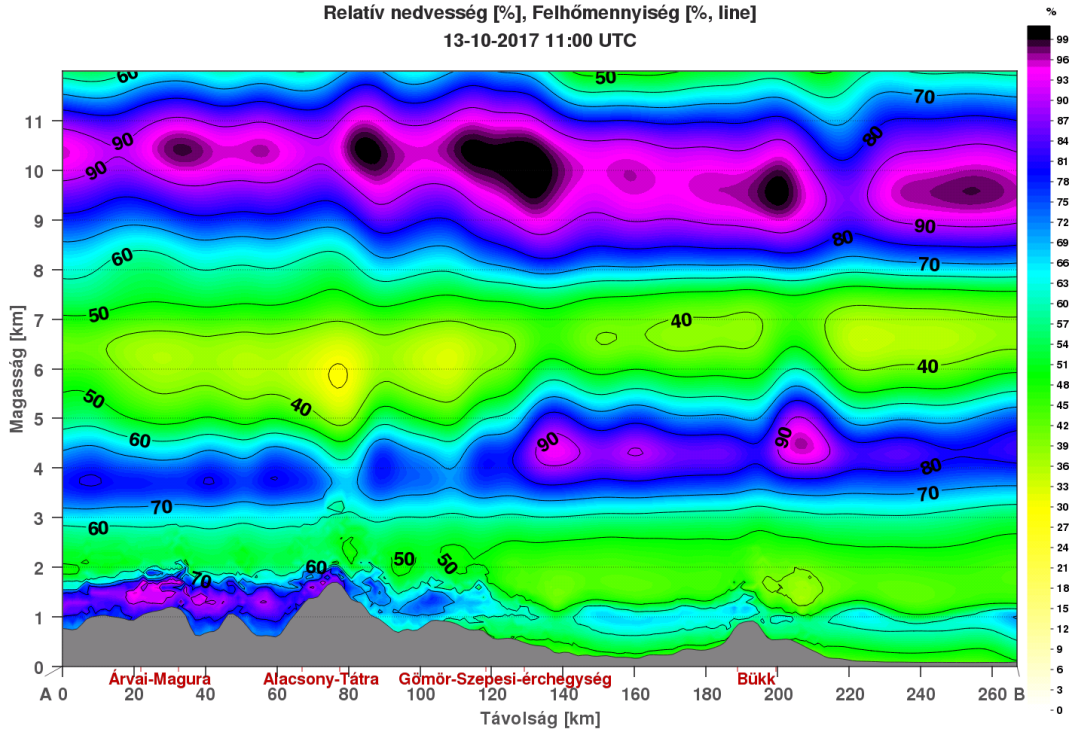
Relatív nedvesség

A 4. ábra mutatja a relatív nedvesség metszetét. Látható, hogy az Alacsony-Tátra fölött vertikális sávok alakultak ki, melyek mentén a környezetéhez képest más a nedvesség, ez a jel rárakódik a magasság szerinti függésre. Ilyet a hullámok felszálló ágában bekövetkező adiabatikus hűlés hoz létre. Látszik a középszintű és a magas szintű nagyobb nedvességtartalmú légréteg, melyekben elsősorban a hullámzás hatására alakult ki felhőzet, más felhő nem volt jelen.

Ezen a produktumon tervezünk később megjeleníteni felhőmennyiséget. Az AROME modellben jelenleg csak a hidrometeorok keverési aránya érhető el, ez azonban a felhasználók számára kevésbé hasznosítható információ. Az alacsony, középmagas és magas szintű felhőborítottság pedig 2D-s változók, melyekből vertikális metszet nem készíthető. A terv a hidrometeorok száma alapján 3D-s felhőmennyiség számítása és izovonalakkal történő megjelenítése (a jelenlegi RH-értékek helyett), mely a cikk írásáig nem készült el.

Potenciális és ekvipotenciális hőmérséklet

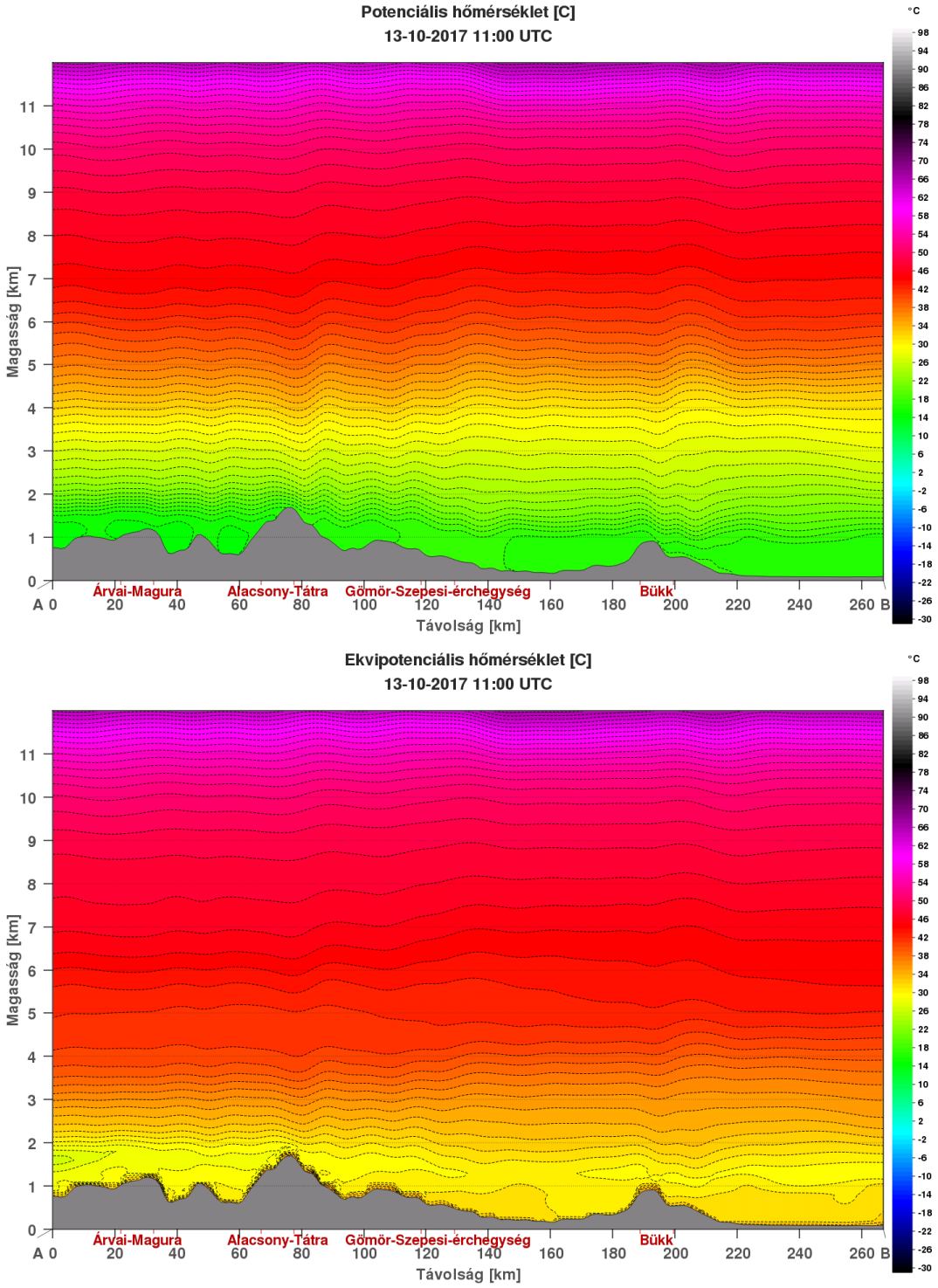
Az 5. ábra felső részén a potenciális, alsó részén az ekvipotenciális hőmérséklet látható. Mindkettő a légkör labilitásáról ad információt: az izovonalak nagyobb sűrűsége nagyobb stabilitást, így nagyobb Brunt-Väisälä-frekvenciát is jelent. Ahol az izovonalak ritkák, ott labilis a légkör.



4. ábra A relatív nedvesség 2017. október 13-án 11UTC-kor

A hullámzás során a légkör száraz-adiabatikusan mozog, ezért az áramló levegő szállítása miatt az izovonalak hullámszerűvé deformálódása történik, amely ez esetben a potenciális hőmérsékleten jól látható. Ugyanez az ekvipotenciális hőmérsékleten is kimutatható. Ha-bár az a száraz-adiabata mentén csak telítettség esetén nem állandó egy elmozduló légrész szempontjából, mégsem ugyanazt a képet látjuk, mivel a légoszlop pillanatnyi állapotában a gradiensük nem egyezik meg, az az ekvipotenciális hőmérséklet esetén a nedvességen keresztül is a magasságtól.

Az alsó légkörben, ahol általában a hőmérséklet és a nedvesség is magasabb, jól látszik a magasabb ekvipotenciális hőmérséklet. Általában itt fordul elő gyakrabban, hogy az ekvipotenciális hőmérséklet csökken a magassággal, ilyenkor csak száraz hullámok tudnak kialakulni, ha a légelem a hullámhegyen eléri a telítettséget, gomolyfelhő képződik. Ilyen helyzetben azonban általában a potenciális hőmérsékleti gradiens sem elég erős ahhoz, hogy hullám tudjon kialakulni. A mostani esetünkben azonban az is fontos információ, hogy az ekvipotenciális hőmérséklet csökkenése pl. az Alacsony-Tátra fölött 4–5 km között is lassú, ez az abban a rétegben lévő magasabb nedvességnek köszönhető, a nedvesség magasság szerinti átmeneti gyors növekedése okozza.



5. ábra A potenciális (lent) és ekvipotenciális (lent) hőmérséklet 2017. október 13-án 11UTC-kor

ÖSSZEFOGLALÁS

Látható tehát, hogy a produktumok a hullámokhoz kötődő egyes jelenségeket képesek megmutatni, így a felhasználók számára hasznosak lehetnek a hullámrepülés támogatása szempontjából. Ahhoz azonban, hogy ezek a jelenségek már első pillantásra szembetűnők legyenek, a dizájnon (skála színezése, izovonalas megoldások) még finomítani érdemes. A cikk írásakor használt dizájn egyelőre csak egy belső szűk kör által került véleményezésre, e cikk,

illetve a Repüléstudományi Konferencián elhangzó előadás lesz az első alkalom, ahol szélesebb közönség láthatja e terveket, az érkező visszajelzéseket pedig a dizájn további tökéletesítésekor figyelembe tudjuk venni.

A potenciális és ekvipotenciális hőmérsékletek ábráin lévő izovonalak látható módon ugyanazt jelölik, mint a színek, de segítenek annak megállapításában, hogy hol kicsi a gradiens. A vertikális sebesség elsőre „jól sikerült", a hullámok azonnal látszanak rajta, ugyanakkor az alacsony sebességek tartományán érdemes lehet módosítani a kisebb hegységek által, csak az alsó rétegekben keltett, rövidebb hullámhosszú hullámok kimutatására való kísérlet érdekében. A relatív nedvesség színskáláját kisebb mértékben, elsősorban esztétikai okokból szeretnénk módosítani. A horizontális metszet menti szélkomponens esetében a negatív tartományon szintén esztétikai módosítást tervezünk, illetve a skála szélsőértékeit is tervezzük finomítani, csakúgy, mint a potenciális és ekvipotenciális hőmérsékletek esetén.

A bemutatott eset napján éjjel, ahogy a magasban melegedett a levegő és a fölénk húzódó anticiklon peremén süllyedt az inverzió, de alatta még erős volt a szél, az Alacsony-Tátrán a modell egy lejtővihart is szimulált. Látszik a hegy fölött közvetlenül az alacsony szinteken a potenciális hőmérséklet lejtőviharra jellemző képe, a vertikális sebességen a lee oldalon a hidraulikus ugrás feláramlása, fölöttük az inverziós réteg felett pedig a kettő hatására kialakuló kettős csapdázatlan (és jelen esetben száraz) hullám is (6. ábra).

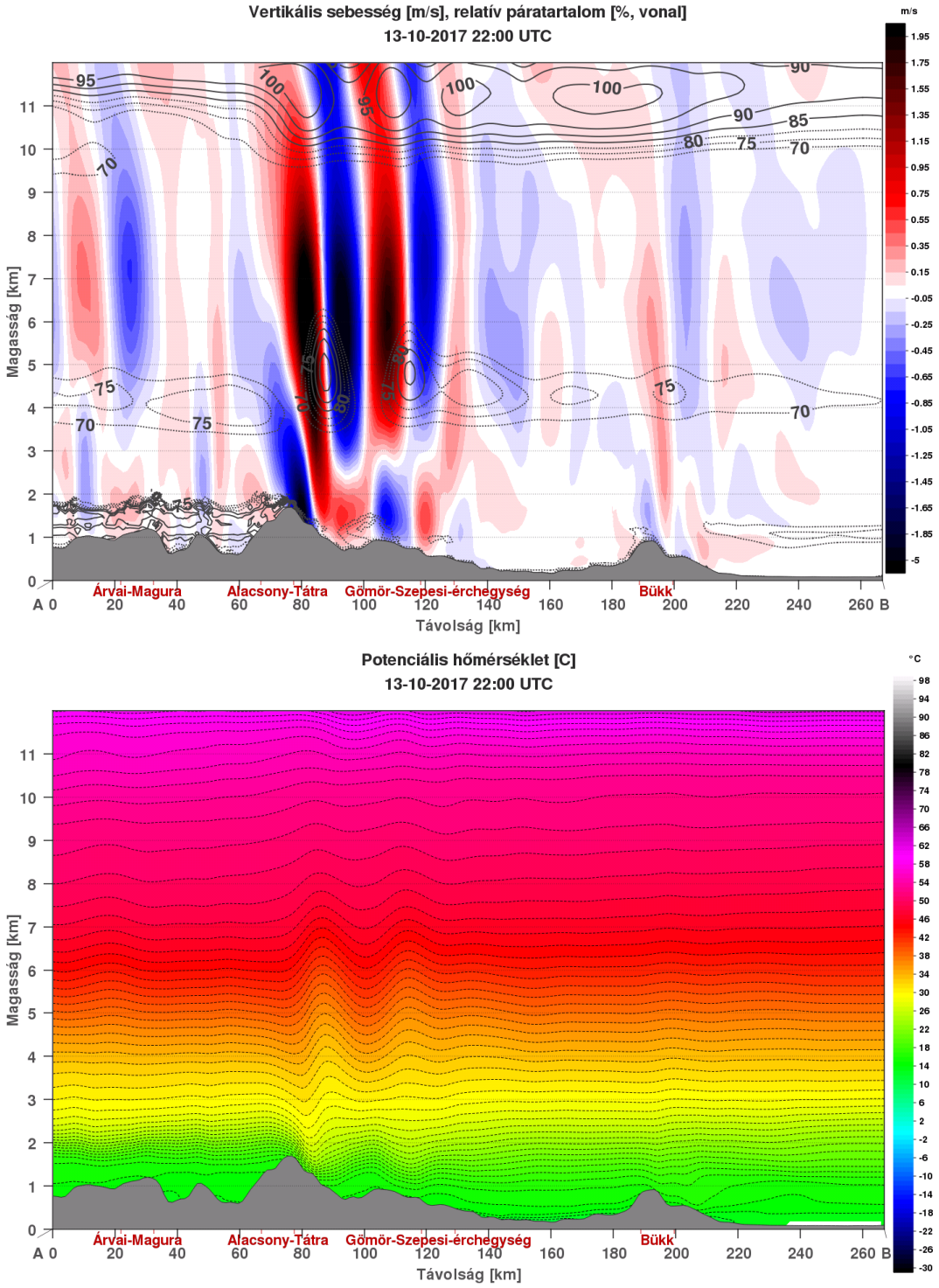
TOVÁBBI TERVEK

A magyarországi kisgépes légi forgalom, elsősorban a sportrepülés keretein belül végzett hullámrepülés támogatása az eddigiekben meglehetősen kevés információ szolgáltatásával járt, ennek jelentős bővítése van folyamatban. Terveink több részre bonthatók a megva-lósítás időtávja alapján.

Rövidtávú tervek

A jelenlegi munka a produktumok kibővítését célozza, a hullám-előrejelzéshez hasznosít-ható paramétereket tervezünk megjeleníteni. Ez tartalmazna az eddig elérhetőhöz hasonló időbeli profilmeneteket az eddigieknél több repülőtérre, valamint térbeli keresztmetszeteket is több vonal mentén.

Profilmenetek készülnek például Pér, Fertőszentmiklós, Siófok vagy Miskolc térségére. Mivel azonban a nagyobb hullámhosszú hullámok megfelelő időjárási helyzetben nagyobb területeket képesek elfoglalni, nem csak az olyan repülőterekre lehet érdemes ezeket elkészíteni, amelyek közvetlenül valamely hegyvonulat lee lejtőjénél helyezkednek el. Kísérleti jelleggel az Alföld néhány városára, például Nyíregyházára vagy Kalocsára is gyártunk profilmeneteket.



6. ábra A vertikális sebesség, relatív nedvesség (fent) és a potenciális hőmérséklet (lent) 2017. október 13-án 22UTC-kor

A térbeli keresztmetszetek elsősorban a hosszabb hullámok megjelenítését teszik lehetővé, melyet az AROME modell képes modellezni. Így ebből hasznosabbnak gondoljuk olyan produktumok létrehozását, melyek iránya a Kárpátok vagy az Alpok felől Magyarország valamely területe felé mutat.

Az itt bemutatott térbeli keresztmetszeteken már csak kisebb változtatásokat eszközölünk elsősorban a dizájn terén, az időbeli profilmenetek előállítása a cikk írásakor még folyamat-

ban van. A Scorer-paraméter implementálása szintén a végső fázisba került, annak profilja azonban még zajos, melyet interpolációs probléma okoz. Annak kikísérletezése, hogy az interpolációt milyen vertikális z-rácsra érdemes végrehajtani, szintén a közeli jövő feladata.

Középtávú tervek

Középtávon a produktumok elsődleges tesztelése és operatív közzététele szerepel terveink között. Ezt még 2018-ban szeretnénk befejezni, valószínűleg az őszi szezonra már operatívan elérhetők lesznek. A tesztelés eleinte abból áll majd, hogy amikor hullámképződés várható a modellkimenetek alapján, akkor igyekszünk megfigyelni például a műholdképek vagy kameraképek elemzésével, hogy valóban kialakult-e hullámzás. Másik irányban pedig, ha hullámok jelenlétére utaló felhőformákat figyelünk meg, vagy mások ilyen megfigyeléséről kapunk hírt, ellenőrizzük, hogy a modell mutatta-e a hullámképződés lehetőségét.

Amikortól a produktumok operatívan is elérhetők lesznek, szeretnénk, ha a felhasználóink is küldenének visszajelzéseket a hullámképződéssel kapcsolatban. Sajnos manapság ilyen jellegű észlelések, beszámolók ritkán érkeznek hozzánk, még a nagygépes repülést végző személyzet általi turbulencia észlelések is meglehetősen ritkák, néhány naponta, egy-két hetente érkezik egyetlen észlelés. A tesztelés ezen részéhez tehát jelentősen élénkíteni kell a kommunikációt köztünk és felhasználóink között.

Távolabbi tervek

Mivel a hegyi hullámokat különféle turbulens jelenségek kísérik, fontos információ lehet a felhasználók számára, hogy ezek a jelenségek milyen erős turbulenciával járnak. Jelenleg léteznek operatívan is működő turbulencia-parametrizációk, melyek a szélsebesség és nyírás alapján közelítik a szabad légkör turbulenciáját, ez alapján kerülnek ki többek között a SIGMET-ek, ha szükséges. A határrétegbeli turbulencia becslése gyengébb szeles időben a termikek erősségén alapul. A hullámturbulencia nem csak a lokálisan (a hullámzó réteg határainál) fellépő erős szélnyírás miatt alakul ki. Több turbulens jelenség a határréteggel történő kapcsolat következménye, vagy a jet jelenléte miatti torzulások okozzák. Utóbbiak közül néhányat (pl. a felső légköri törést) az AROME képes modellezni, a határréteg hatásait azonban kevéssé.

Érdemes lehet tehát átgondolni olyan elméleti parametrizációk adaptálását, melyek kifejezetten a hullámzó légkör hullámokhoz kapcsolódó turbulenciáját írják le [19][20]. Azonban a hullámturbulencia elméleti leírásának némileg gátat szabott a modellezés elterjedése. A turbulencia elméletének ugyanis kissé bonyolult matematikája van, a lezárási elméleteket pedig a jelenség helyéből következően rendkívül nehéz ellenőrizni: ma még nem tudunk a közép-troposzférában olyan mikrometeorológiai kampányokat végezni, melyeket a ha-tárrétegben szokás, annak érdekében, hogy a hullám-turbulencia természetét feltárjuk, az adatok felhasználásával pedig kalibráljuk a lezárási elméleteket. A fentiek következtében az elméleti munkát egy idő után felváltotta a numerikus modellezés, a használt modelleknek azonban sokkal finomabb térbeli felbontása van az operatív AROME-énál. Így pedig az AROME modell valószínűleg nem lenne elég pontos akkor sem, ha a parametrizációnk jól írja le a valós hullámturbulenciát.

Mindezek ellenére kísérleti jelleggel be lehet vezetni hullámturbulenciát leíró parametrizációkat az operatív modellfutásba. Ennek feltétele egy megfelelően pontos elméleti leírás, me-

lyekben a lezárási parametrizációkat nagyon finom felbontású kutatási célú modellfuttatásokkal lehetne kalibrálni. E modellfuttatások bemenetként egyszerűbb, idealizált eseteket kapnának, melyekben könnyen változtathatók az alapparaméterek, ezáltal a ki-menetként nyert információ könnyen felhasználható a parametrizációs függvények előállítására. Mindez azonban hosszabb munkát igényelne, ezért ezzel a közeli jövőben még nem tudunk foglalkozni, bár az OMSZ modellfejlesztői a közelmúltban végeztek kísérleteket a turbulencia modellezésének pontosítása terén, melyek hasznosak lehetnek a hullám előrejelzés terén is.

Köszönetnyilvánítás

Munkánk során sok segítséget kaptunk az OMSZ különböző részlegeinél dolgozó kollégáktól. Köszönettel tartozunk Lancz Dávidnak a Scorer-paraméter numerikus sémájának megalkotásáért, Kullmann Lászlónak a séma AROME modellbe történő beprogramozásáért, Szűcs Mihálynak és Hodossyné Rétfalvi Ritának az esettanulmány visszamenőleges futtatásáért és archívumban történt közzétételéért, Rajnai Márknak a HAWK-3-ban történő megjelenítéssel kapcsolatos tanácsaiért, segítségéért, Berényi Líviának és Fövényi Attilának a történeti adatok felkutatásáért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] TÜSKÉS, Boglárka: Főnszerű hatások detektálása a Kárpát-medencében MODIS műholdképek és meteorológiai adatok alapján 2005–2010 téli hónapjaiban. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Meteorológiai Tanszék, 2010

[2] VINNICSENKO, Nyikolaj Konsztantyinovics: Turbulentnoszty v Szvobondoj Atmoszfere. Springer, 1972

[3] FRÖCHGOTT, Jiři: Evidence for Mountain-sized Lee Eddies. Weather, 1969/24(7), pp. 255–260

[4] LILLY, Douglas K.: A Severe Downslope Windstorm and Aircraft Turbulence Event Induced by a Mountain Wave. J. Atmos. Sci., 1978/35(1), pp. 59–77

[5] COLSON, DeVer: Meteorological Problems in Forecasting Mountain Waves. Bull. Am. Meteorol. Soc., 1954/ 35(8), pp. 363–371

[6] DOYLE, James D., DURRAN, Dale R.: The Dynamics of Mountain-Wave-Induced Rotors. J. Atmos. Sci., 2002/59(2), pp. 186–201

[7] LESTER, Peter F., FINGERHUT, William A.: Lower Turbulent Zones Associated with Mountain Lee Waves. J. Appl. Meteorol., 1974/13(1), pp. 54–61

[8] SCORER, Richard S.: Theory of Waves in the Lee of Mountains. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1949/75(323), pp. 41–56

[9] SCORER, Richard S., KLIEFORTH, H.: Theory of Mountain Waves of Large Ampli-tude. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1959/85(364), pp. 131–143

[10] DURRAN, Dale R.: Mountain Waves and Downslope Winds. In William BLUMEN (ed.), Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteorological Monographs, vol. 23, Springer, 1990, pp. 59–81

[11] HOLTON, James R., HAKIM, Gregory J.: An Introduction to Dynamic Meteorology. 5 ed., Elsevier, 2013

[12] HORÁNYI, András, KERTÉSZ, Sándor, KULLMANN, László, RADNÓTI, Gábor: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service. Időjárás, 2006/110, pp. 203–227

[13] SHUTTS, G. J.: Stationary Gravity-Wave Structure in Flows with Directional Shear. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1998/124, pp. 1421–1442

[14] HERTENSTEIN, Rolf F., KÜTTNER, Joachim P.: Rotor types assiciated with steep lee topography: influence of the wind profile. Tellus, 2005/57(2), pp. 117–135

[15] DURRAN, Dale R., KLEMP, Josehp B.: The Effects of Moisture on Trapped Mountain Lee Waves. J. Atmos. Sci., 1982/39(11), pp. 2490–2506

[16] JIANG, Qingfang: Moist Dynamics and Orgrgraphic Precipitation. Tellus, 2003/ 55(4), pp. 301–316

[17] SALAVEC, Péter: Hullámképződés a Kárpát-medencében 2017. október 13-án. http://met.hu/ismerettar/meteorologiai_hirek/index.php?id=2221&m=2, 2017

[18] SALAVEC, Péter: Kettős hullámképződés 2017. december 23-án Közép-Magyarországon. http://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=2329&m=2, 2017
[19] BOUGEAULT, Philippe, LACARRÈRE, Pierre: Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Meso-β-Scale Model. Mon. Wea. Rev., 1989/117(8), pp. 1872–1890
[20] KIM, Young-Joon, ARAKAWA, Akio: Improvement of Orographic Gravity Wave Parameterization Using a Mesoscale Gravity Wave Model. J. Atmos. Sci., 1995/52(11), pp. 1875–1902

ONGOING DEVELOPMENTS IN MOUNTAIN WAVE FORECASTING AT THE HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE

On the new website (http://aviation.met.hu) active since the 1st November 2016, among the model forecast outputs, a section for mountain wave gliding is published which consists now only of a wind time-height profile from the AROME model for four places in Hungary (Budapest, Kőszeg, Pécs and Pipishegy) which lie on the lee side of mountain ranges Buda-mts, Kőszeg-mts, Mecsek and Mátra, respectively. Our aim is the development of this section with publishing wind, vertical velocity, (equi)potential temperature, humidity/cloud fraction and Scorer-parameter time-height and spatial cross-sections. The time-height sections were to be created for more places on lee sides of mountain ranges, and the spatial cross-sections along several lines in different directions from the surrounding mountain ranges, to cover the Carpathian Basin in order to increase the support of mountain wave gliding. Another aim in the more distant future is to forecast mountain wave turbulence.

Keywords: *Aviation Meteorology, Mountain Wave, wave forecasting, wave turbulence, Scorer-parameter*

Salavec Péter (MSc)
Repülésmeteorológus
Országos Meteorológiai Szolgálat
Előrejelzési Főosztály
Repülésmeteorológiai Osztály
salavec.p@met.hu
https://orcid.org/0000-0001-5126-192X

Salavec, Péter (MSc)
Aviation Forecaster
Hungarian Meteorological Service
Department of Forecastig
Unit of Aviation Meteorology
salavec.p@met.hu
https://orcid.org/0000-0001-5126-192X

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-06-0472_Salavec_Peter.pdf

Patartics Bálint, Péni Tamás, Vanek Bálint

FLEXIBILIS SZÁRNYÚ REPÜLŐGÉP AKTÍV FLATTER SZABÁLYOZÁSA[1]

Az aeroelasztikus flatter egy csillapítatlan lengés, amelyet a repülőgép strukturális dinamikája és az aerodinamikai erők között fellépő rezonancia okoz. E jelenség fellépését meg kell akadályozni, mivel a repülőgép szerkezetének károsodásához, és ezáltal potenciálisan katasztrófához vezet. A repülőgépek tervezői ezt jelenleg passzív eszközökkel, főként a szárnyak merevségének növelésével oldják meg. Azonban könnyebb anyagokból épült, és ezért rugalmasabb szerkezetű szárnyak alkalmazása előnyösebb lenne az üzemanyag-fogyasztás szempontjából. Ez motiválta az utóbbi évek kutatásait, amelyekben a flutter jelenség megszüntetését aktív szabályozással kívánják elérni. Ehhez a célkitűzéshez csatlakozva két szabályozó tervezési módszerét ismertetünk e cikkben, amelyek képesek a biztonságos repülési tartomány megnövelésére egy pilóta nélküli kísérleti repülőgép estén. A bemutatott módszerek alkalmazhatóságát szimulációs eredményekkel szemléltetjük.

***Kulcsszavak**: UAV, flatter szabályozás, robusztus irányítás*

BEVEZETÉS

Az aeroelasztikus flatter a rugalmas szerkezetű repülőgép strukturális dinamikája és az aerodinamikai erők között fellépő rezonancia eredménye. Ez a jelenség a szerkezet csillapítatlan lengéséhez vezet, ami beavatkozás nélkül a repülőgép károsodását okozhatja. A flatter egy bizonyos sebesség felett jelentkezik, amelyet flattersebességnek nevezünk. Utasszállító repülőgép pilóták szigorúan a flattersebbesség alatt repülnek, hogy elkerüljék a katasztrófát. A repülőgép biztonságos repülési tartományának növelése így a szárnyak merevítésével lehetséges, amely növeli a flattersebességet. Üzemanyag-fogyasztás szempontjából azonban a rugalmas, könnyűszerkezetű szárnyak az előnyösek.

Az elmúlt években számos kutatási projekt indult el e probléma megoldására. Céljuk olyan aktív szabályozórendszerek kifejlesztése, amelyek képesek a repülőgép strukturális csillapításának növelésére. Amellett, hogy a stabilitást biztosítsuk nagyobb sebességtartományon, a másik kihívás, hogy a megtervezett szabályozónak együtt kell működnie a *baseline* szabályozóval, amely a repülőgép merevtest-szerű mozgását irányítja.

Három különböző eljárást fejlesztettek ki a PAAW[2] projektben, amelyek kísérleti repüléseken sikeresnek bizonyultak. [8] H_∞ norma-alapú szabályozást javasol, amelyben a beavatkozójel súlyozására *notch filtert* használnak a szerzők a flatter szabályozó és a *baseline* szabályozó frekvenciatartományi elkülönítésére. A MIDAAS[3] algoritmus a kimenetek optimális lineáris kombinációját használja statikus kimenet-visszacsatolás tervezéséhez [2]. A cél a flatter módusok

[1] A kutatás, amely ezekhez az eredményekhez vezetett a FLEXOP project része. Ez a projekt az Európai Unió Horizon 2020 kutatási és innovációs programjából kapja a támogatást (grant agreement No 636307).

[2] PAAW: Performance Adaptive Aeroelastic Wing

[3] MIDAAS: Modal Isolation and Damping for Adaptive Aeroservoelastic Suppression

csillapításának növelése, úgy, hogy a dinamika többi részét a lehető legkisebb mértékben módosítsuk. A módszer a felnyitott körben egy zérust helyez az origó közelébe, azért hogy a felnyitott hurok kisfrekvenciás erősítését csökkentse. A harmadik módszer a rendszer viselkedésének ismeretére támaszkodva egyszerű szabályozási elveket alkalmaz [6]. Alapjául az Identically Located Acceleration and Force megközelítés szolgál PI szabályozók alkalmazásával.

A PAAW projektben használt csupaszárny repülőgép struktúrája speciális, ezért a rajta megfigyelhető flatter jelenség kissé eltér a kereskedelmi forgalomban előforduló repülőgépekétől. A FLEXOP[4] projektben egy olyan pilóta nélküli repülőgép épül, amely flatter szempontjából közelebb áll a jelenleg gyártott utasszállító repülőgépekhez [10]. Korábbi munkánkban [5], [8] felhasználásával, LPV[5] szabályozást alkalmaztunk az ún. BAH[6]-szárny [1] szabályozására, ami a flatter szabályozás egyik alapesete.

Ebben a cikkben két szabályozótervezési elvet mutatunk be. A H_∞ norma-alapú megközelítés kiindulópontjául [8] szolgál. E módszer fókuszában a flatter és a *baseline* szabályozó frekvenciatartományi elkülönítése áll. A másik megoldás modális transzformációval kezdődik, amellyel az instabil (flatter) és a stabil módusokat különítjük el. Az instabil módusok stabilitásához LQ[7] szabályozást használunk.

A cikk további részének felépítése a következő. Az ez utáni fejezetben a szabályozótervezéshez használt repülőgépmodellt mutatjuk be. A folytatásban a H_∞ szabályozó részleteit tárgyaljuk, majd az LQ-alapú technikáét. Az utolsó előtti fejezetben a H_∞ szabályozó használatával készített időtartományi szimuláció eredményeit mutatjuk be. Az utolsó fejezetben összefoglaljuk a munkánkat és rámutatunk további fejlesztési lehetőségekre.

A FLEXIBILIS REPÜLŐGÉPMODELL LEÍRÁSA

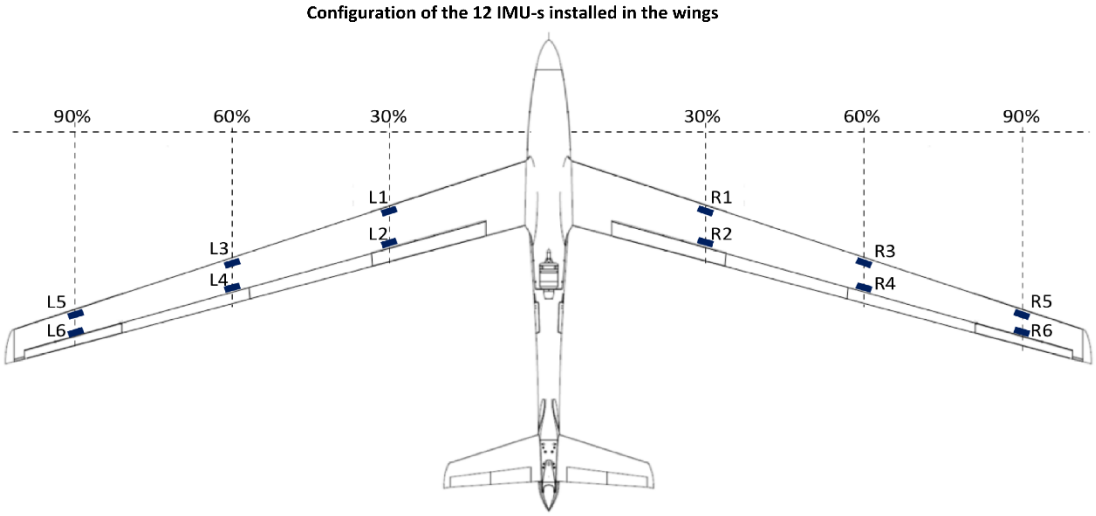
A szabályozandó repülőgép az 0. ábrán látható. Ez egy nagy szárnykarcsúságú repülőgép hátranyilazott szárnyakkal. A V-alakú farkon két *ruddervator* található. A hajtást egy sugárhajtómű biztosítja. Mindkét szárnyon négy-négy csűrőkormány található, amelyeket a törzstől a szárny vége felé haladva egytől négyig számozzuk. A szárny végén található csűrőt a dedikáltan flatterelnyomásra használjuk.

A repülőgép struktúrális modellje tizenöt modális koordinátát tartalmaz, amelyek a rugalmas alakváltozást írják le. Az aerodinamikát lineáris modellekkel írjuk le, amelyeket örvény- és *doublet*-panel módszerrel nyerünk. A teljes modell három komponensből tevődik össze: merev test dinamikából, aerodinamikából és strukturális dinamikából. Flatternek nevezzük az e komponensek között fellépő rezonanciát, amely a szerkezeten jelentkező csillapítatlan rezgéseket okoz. A flatter (rezonancia) frekvenciái $\omega_{f,1} = 42{,}2\ \mathrm{rad/s}$ és $\omega_{f,2} = 47{,}7\ \mathrm{rad/s}$. A modell 26 LTI[8] modellel adott a levegőhöz képesti sebesség $\rho = 45\ \mathrm{m/s}, 46\ \mathrm{m/s}, \ldots, 70\ \mathrm{m/s}$ értékei mellett. Az összes LTI rendszer 522-állapotú.

[4] FLEXOP: Flutter Free FLight Envelope eXpansion for ecOnomical Performance improvement
[5] LPV: Lineáris Paraméter Változós
[6] BAH: Bisplinghoff-Ashley-Halfman
[7] LQ: Linear Quadratic (lineáris kvadratikus)
[8] LTI: Linear Time Invariant (lineáris időinvariáns)

1. ábra Számítógépes grafika a FLEXOP projektben épülő repülőgépről [10]

A flatter elnyomására a beavatkozó jel a négyes csűrők kitérítése, amelyet rendre $\delta_{4,l}$-lel és $\delta_{4,r}$-rel jelölünk a bal és a jobb oldali szárny esetén. A rendszer kimenetei szárnyanként két-két pontban a helyi függőleges gyorsulás és a helyi elcsavarodás és elhajlás szögsebessége. Mindkét pont a szárny végéhez közel található, az egyik a belépő, a másik a kilépő él közelében. Ezeket a pontokat a 0. ábra az R5, R6 és az L5, L6 szimbólumokkal jelzi.



2. ábra A szenzorok elhelyezkedése a repülőgépen [10]

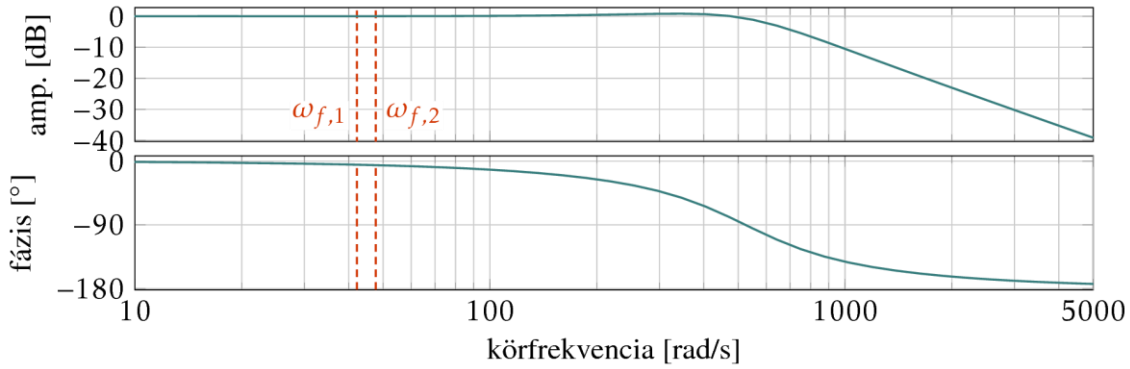
A flatter elnyomásához használt csűrőt mozgató speciális aktuátor neve *direct drive*. Az identifikációból nyert átviteli függvénye

$$G_{\mathrm{dd}}(s) = \frac{2{,}741\cdot 10^5\left(s^2+11{,}37s+373{,}6\right)}{\left(s^2+11{,}34s+373{,}1\right)\left(s^2+564{,}5s+2{,}746\cdot 10^5\right)}. \tag{1}$$

A *direct drive* alkalmazását az indokolja, hogy sávszélessége nagyobb, mint a flutter frekvenciák. Ez látható a 0. ábrán. A $G_{\mathrm{dd}}(s)$ átviteli függvényt a repülőgépmodell mindkét bemenetére rátesszük.

A szabályozórendszerben 10 ms késleltetésre lehet számítani. Ezt bemeneti késleltetésként vesszük figyelembe a

$$e^{-0{,}01\cdot s} \approx G_{\mathrm{delay}}(s) = \frac{\left(s^2-1158\,s+3{,}656\cdot 10^5\right)\left(s^2-841{,}5\,s+4{,}595\cdot 10^5\right)}{\left(s^2+1158\,s+3{,}656\cdot 10^5\right)\left(s^2+841{,}5s\,+4{,}595\cdot 10^5\right)}. \tag{2}$$



3. ábra A *direct drive* aktuátor Bode-diagramja (G_{dd}) [11]

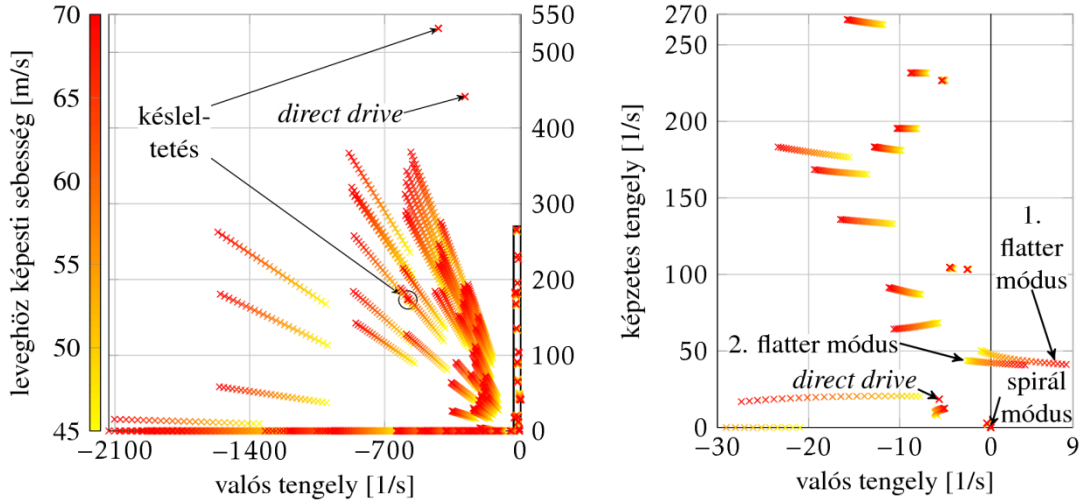
Padé-approximáció felhasználásával. Az így kapott $G_{\mathrm{delay}}(s)$ átviteli függvényt szintén mindkét bemenethez hozzáillesztjük.

A modellt végül LPV rendszerként adjuk meg,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\rho)x + B(\rho)u \\ y &= C(\rho)x, \end{aligned} \tag{3}$$

ahol x a rendszer állapota, u a bemenete y pedig a kimenete. Az állapotok száma az aktuátordinamika és a közelített késleltetés hozzáadásával 538. A rendszer u bemenete a csűrőkormányok kitérítésére vonatkozó referenciajel késleltetés nélkül.

A rendszer pólusainak vándorlása a 0. ábrán látható. A sebesség növekedésével a dinamika legtöbb része egyre gyorsabbá válik (azaz a pólusok távolodnak az origótól). Két módushoz, az ún. flatter módusokhoz tartozó pólusok a jobb félsík felé közelednek. Az $\omega_{f,1}$-hez és $\omega_{f,2}$-höz tartozó flatter módus rendre $59\ \mathrm{m/s}$ és $51\ \mathrm{m/s}$ sebességnél válik instabillá. Az ún. spirál módus egy valós pólus az origó közelében. E módus alacsony sebességen instabil, és $49\mathrm{m/s}$-nál megy át a bal félsíkra. A sebességtől nem függő pólusok a késleltetéshez és az aktuátordinamikához tartoznak.



4. ábra A flexibilis repülőgépmodell pólusvándorlása
(a jobb oldali diagram a bal oldalon bekeretezett rész nagyítása) [11]

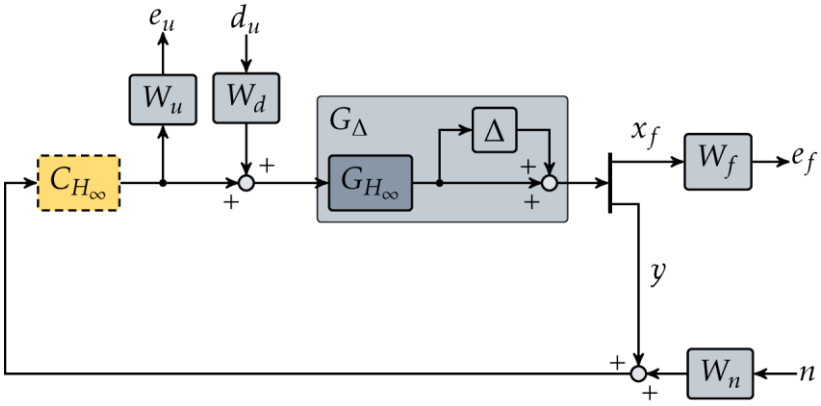
H_∞ SZABÁLYOZÓTERVEZÉS

A H_∞ szabályozó tervezésének alapötletét [8][5] adja. A rendszert, amelyhez a szabályozót tervezzük a következő lépésekben konstruáljuk. (3) rendszerből kiválasztjuk a $\rho = 70\ \mathrm{m/s}$ sebességhez tartozó LTI rendszert. Ezt harminc állapotra redukáljuk *balanced truncation* eljárással, amely során a $[0{,}1\omega_{1,f}, 10\omega_{2,f}]$ frekvencia intervallumra fókuszálunk. Ezt a lépést a MATLAB balred függvénye segítségével végezzük el. A redukált rendszert modális alakra transzformáljuk annak érdekében, hogy a flatter módusokat elkülöníthessük. Az így kapott rendszer kimenetét kiegészítjük a flatter módusokhoz tartozó állapotváltozókkal, amelyek vektorát x_f-fel jelöljük. A rendszer alakja ezek után

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y \end{bmatrix} = G_{H_\infty}(s)u. \tag{4}$$

Kimeneti multiplikatív bizonyságot adunk a rendszerhez, amely a modellezés hiányosságait, az elhanyagolt dinamikát és a sebességgel változó működést írja le. A $\Delta(s)$ bizonytalanságot felhasználva, amelyre $\left|\left|\Delta(s)\right|\right|_\infty \leq 0{,}3$, a bizonytalan rendszer átviteli függvénye $G_\Delta(s) = \big(I + \Delta(s)\big)G_{H_\infty}(s)$.

Az általánosított szakasz felépítése az 0. ábrán látható. A performancia bemenetek a bemeneti zavarás d_u és a mérési zaj n. Az előbbit a $W_d(s) = 9 \cdot 10^{-4} I$ súlyfüggvénnyel súlyozzuk, ahol I a megfelelő méretű egységmátrix. A W_n meghatározásához kiértékeljük a (3) rendszer válaszát egy 10°-os ugrásra a $\delta_{4,l}$ bemenetről a bal oldali szárnyon mért kimenetekre $\rho = 50\mathrm{m/s}$ mellett. Az N mátrixot a kimenetek csúcsértékeinek egy százalékából konstruáljuk, $N = 10^{-3} \cdot \mathrm{diag}(6{,}4;\ 0{,}1;\ 0{,}1;\ 6{,}6;\ 0{,}1;\ 0{,}1)$, a súlyfüggvény pedig $W_n(s) = \mathrm{diag}(N, N)$.



5. ábra A H_∞ szabályozó tervezéséhez használt általánosított szakasz blokkdiagramja [11]

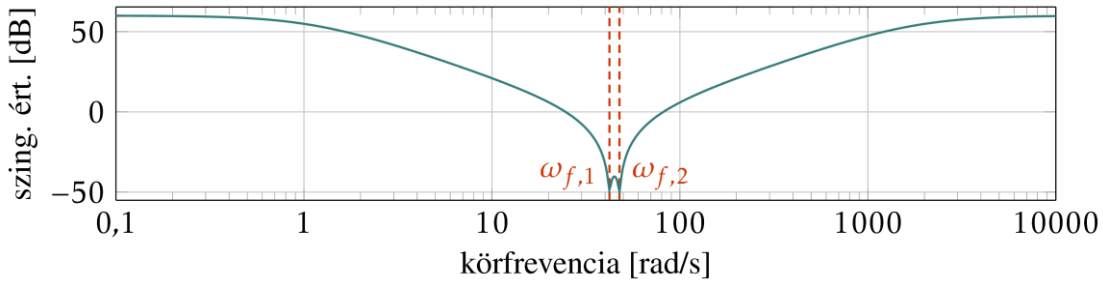
A flatter módusokat a

$$W_f(s) = \mathrm{diag}(0{,}01;\ 0{,}01;\ 0{,}1;\ 0{,}1) \tag{5}$$

függvény súlyozza. A beavatkozójel súlya, W_u, két *notch filter* soros kapcsolása, amelyeket egy-egy flatter frekvenciára hangolunk,

$$W_u(s) = \frac{10^3\left(s^2+s+1781\right)\left(s^2+s+2275\right)}{(s+1907)(s+1687)(s+1{,}193)(s+1{,}056)} I. \tag{6}$$

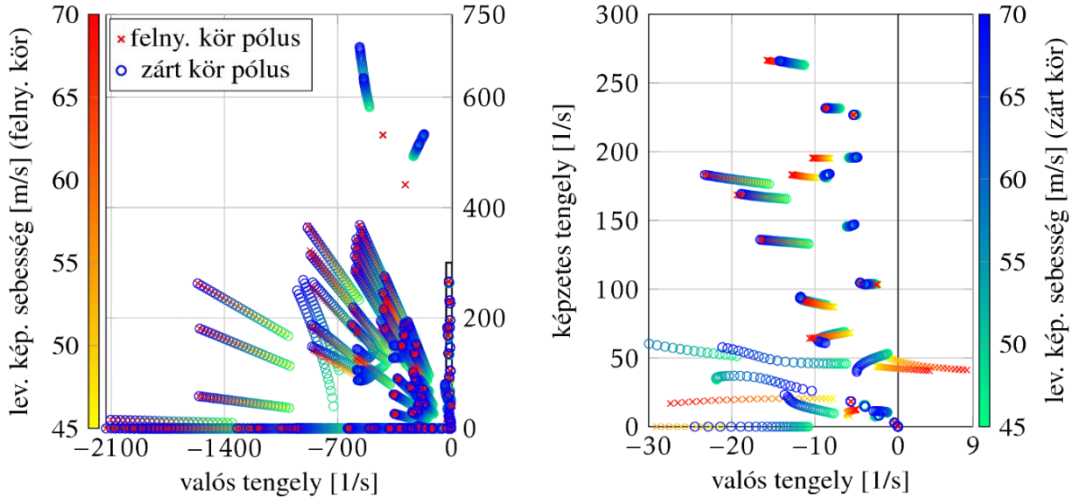
A W_u szinguláris érték grafikonja a 0. ábrán látható. A W_u súlyfüggvényt azért választjuk meg így, hogy a beavatkozójel spektrumát a flatter frekvenciák közelébe korlátozzuk. Ezáltal a flatter szabályozót a *baseline* szabályozótól akarjuk frekvenciatartományban elválasztani. (Ebben a cikkben azonban a *baseline* szabályozó tervezésével nem foglalkozunk.)



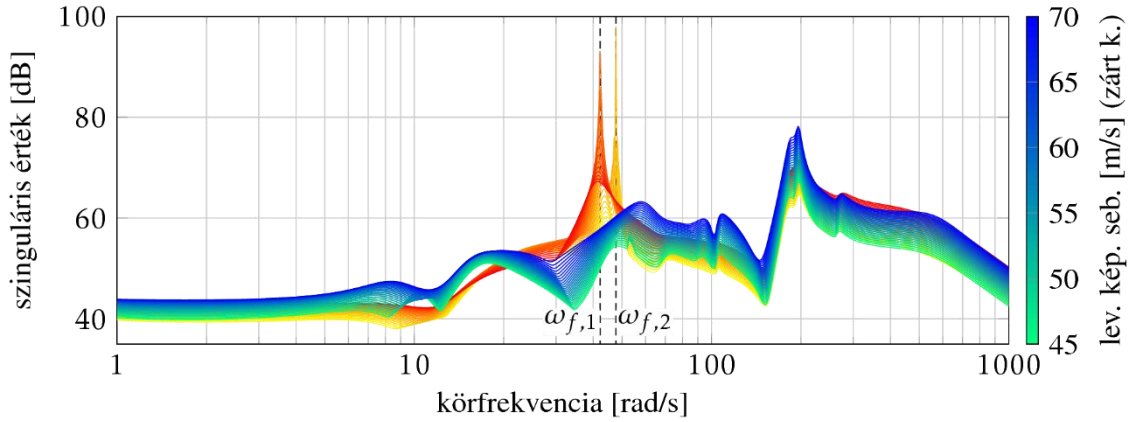
6. ábra: A W_u szinguláris érték-diagramja [11]

A szabályozót DK-iterációval szintetizáljuk a MATLAB dksyn függvényének használatával [4, 7]. A kapott szabályozó 208 dimenziós. Ezt tíz állapotra redukáljuk ugyanazzal a módszerrel, amelyet a repülőgépmodell esetén is használtunk. A redukált szabályozót jelölje C_{H_∞}.

A zárt szabályozási kört a C_{H_∞} szabályozóból és (3) rendszerből képezzük, azaz az szabályozó kiértékelését az 538-dimenziós és a sebességgel változó modellel végezzük. A pólusok vándorlását a zárt és a felnyitott kör esetében a 0. ábra szemlélteti. Nagyfrekvenciás alul csillapított módusok jelennek meg a zárt körben, azonban a diamika nagy része változatlan. A spirál módus nem mozdult el, de a flatter módusokat a szabályozó stabilizálja a teljes sebességtartományra. A zárt és a felnyitott kör szinguláris érték grafikonjai a 0. ábrán láthatók. A felnyitott kör rezonanciacsúcsait a szabályozó alkalmazása megszünteti, tehát a flatter módusokat valóban csillapítjuk.



7. ábra A felnyitott és zárt kör pólusainak vándorlása H_∞ szabályozó használatával (a jobb oldali diagram a bal oldalon bekeretezett rész nagyítása) [11]



8. ábra A felnyitott és a zárt kör szinguláris érték grafikonja H_∞ szabályozó használatával [11]

Egy LPV rendszer stabilitásanalíziséhez ennél szigorúbb vizsgálatra lenne szükség [9]. Azonban a levegőhöz képesti sebesség nem változhat tetszőlegesen, fizikaik okokból $\dot{\rho}$ csak egy korlátos intervallumban mozoghat. Ilyen esetben a rögzített sebességpontokban elvégzett LTI stabilitásanalízis elégséges az LPV rendszer stabilitásának megállapításához.

LQ SZABÁLYOZÓTERVEZÉS

Ez a tervezési elv a flatter módus és a stabil dinamika szétválasztását célozza. Ehhez kiválasztjuk a $\rho = 70\text{m/s}$ sebességhez tartozó LTI modellt (3) rendszerből. E rendszert modális alakba transzformáljuk. A transzformáció eredményeként a rendszeren belül a stabil és az instabil dinamika teljesen szétcsatolva jelenik meg

$$\begin{aligned} \dot{x}_f &= A_f x_f + B_f u \\ \dot{x}_s &= A_s x_s + B_s u \\ y &= C_f x_f + C_s x_s \end{aligned} \tag{7}$$

alakban. Itt az f index a flutter, az s a stabil módusokra vonatkozik.

A szabályozás blokkdiagramka a 0. ábrán látható. Az optimális állapot-visszacsatolást az $G_{\text{LQ},f}(s) = C_f\left(sI - A_f\right)^{-1}B_f$ rendszerhez az

$$A_f^T X + X A_f - X B_f R_K^{-1} B_f^T X + Q_K = 0, \tag{8}$$

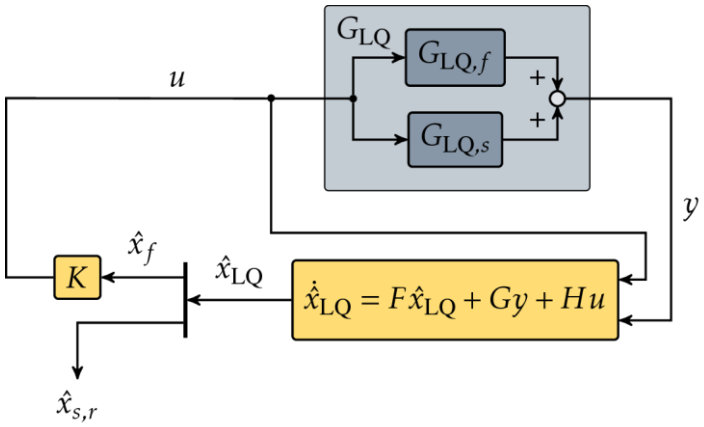
Ricatti-egyenlet megoldásával tervezünk [3]. Az egyenletben

$$R_K = 8{,}207 \cdot I, \quad Q_K = \text{diag}(1;\ 1;\ 0{,}01;\ 0{,}01) \tag{9}$$

és a visszacsatolás erősítése $K = R_K^{-1} B_f^T X$.

Az x_f becsléséhez a stabil dinamikát tíz állapotra redukáljuk a balred függvénnyel a 'MatchDC' opciót használva. A redukált rendszer mátrixait jelölje $A_{s,r}$, $B_{s,r}$, $C_{s,r}$ és $D_{s,r}$. A redukált stabil dinamika $G_{\text{LQ},s}(s) = C_{s,r}\left(sI - A_{s,r}\right)^{-1}B_{s,r} + D_{s,r}$. LTI Kalman-szűrőt tervezünk a $G_{\text{LQ}}(s) = G_{\text{LQ},f}(s) + G_{\text{LQ},s}(s) = C_{\text{LQ}}\left(sI - A_{\text{LQ}}\right)^{-1}B_{\text{LQ}}$ rendszer állapotainak becslésére. Az

$$A_{\text{LQ}}^T Y + Y A_{\text{LQ}} - Y C_{\text{LQ}} R_{\text{est}}^{-1} C_{\text{LQ}}^T Y + Q_{\text{est}} = 0 \tag{10}$$



9. ábra Zárt kör az LQ szabályozóval [11]

Ricatti-egyenlet megoldását felhasználva nyerjük a becslő paramétereit [3]. Az $R_{\text{est}} = \text{diag}(N, N)$,

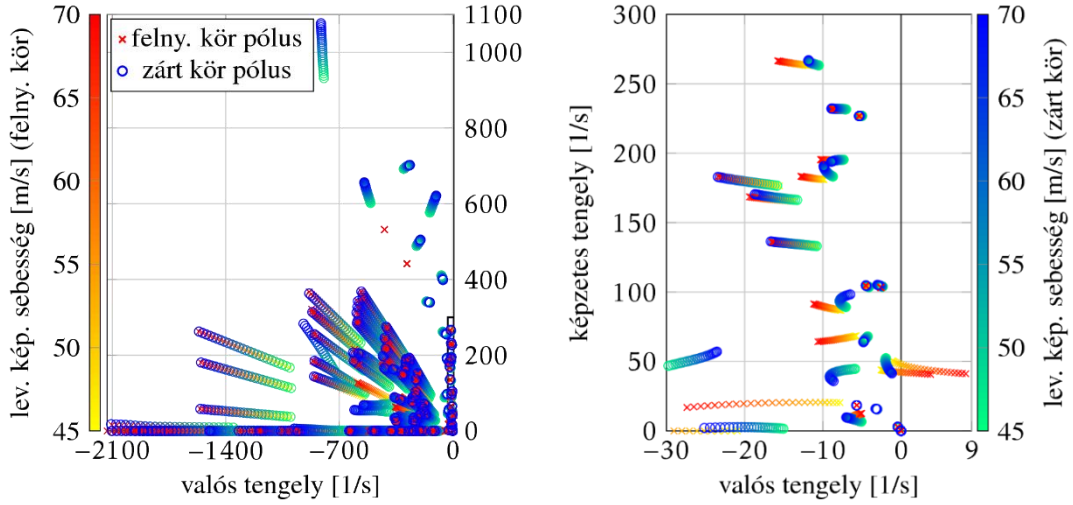
$$N = 10^{-3} \cdot \text{diag}(40{,}61;\ 0{,}006;\ 0{,}018;\ 43{,}041;\ 0{,}006;\ 0{,}018),$$

$Q_{\text{est}} = 0{,}1 \cdot I$. A becslő

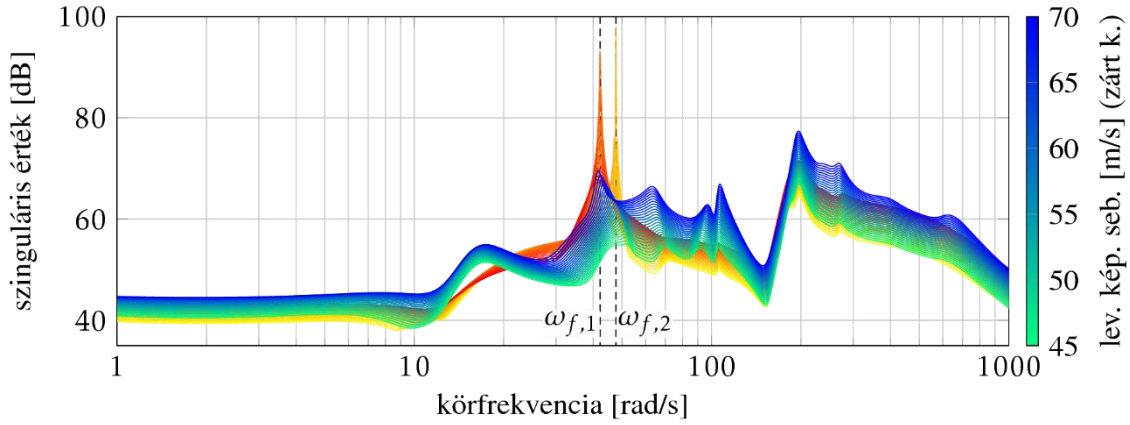
$$\dot{\hat{x}}_{\text{LQ}} = F\hat{x}_{\text{LQ}} + Gy + Hu \tag{11}$$

alakú, ahol $G = Y^T C_{\text{LQ}} R_{\text{est}}^{-1}$, $F = A_{\text{LQ}} - GC_{\text{LQ}}$ és $H = B_{\text{LQ}} - GD_{\text{LQ}}$. Csak x_f becslését, amelyet $\hat{x}_f$ jelöl, használjuk az állapot-visszacsatoláshoz a 0. ábra szerint.

Ezt a szabályozót is (3) rendszerrel összekötve analizáljuk. A zárt és a felnyitott kör pólusvándorlását a 0. ábra mutatja. A H_∞ szabályozóhoz képest ez esetben több alul csillapított módus jelenik meg. A flatter módusok kevésbé csillapítottak ez esetben a 0. ábra alapján. A stabilitás azonban továbbra is biztosított a teljes sebességtartományon.



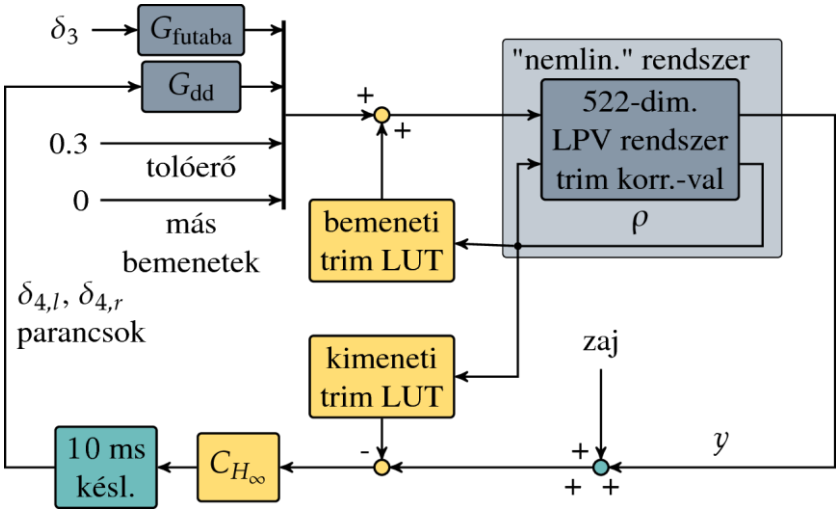
10. ábra A felnyitott és a zárt kör pólusainak vándorlása LQ szabályozó használatával (a jobb oldali diagram a bal oldalon bekeretezett rész nagyítása) [11]



11. ábra A felnyitott és a zárt kör szinguláris érték grafikonja LQ szabályozó használatával [11]

SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A H_∞ szabályozót a 0. ábrán látható szimulációban teszteljük. Az 522-dimenziós LPV repülőgépmodell állapotaiból kiszámítjuk a levegőhöz képesti sebességet, amit visszacsatolunk a ρ paraméterre. A rendszer állapotának, kimenetének és bemenetének trimpontbeli értékét hozzáadjuk a megfelelő mennyiségekhez. Így a nemlineáris rendszer viselkedését a lehető legjobban megközelítettük. A beavatkozójel késleltetését, mérési zajt és aktuátordinamikát szintén tartalmaz a szimuláció. A szabályozó ki- és bemenetének korrigálását lookup table-ök (LUT-ok) használatával oldjuk meg.

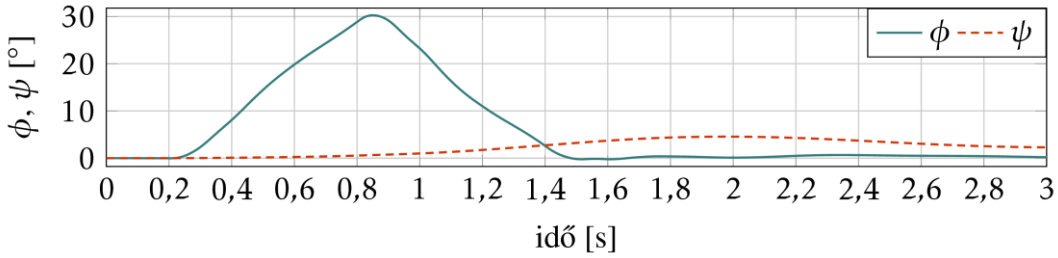


12. ábra A szimulációs elrendezés blokkdiagramja [11]

A szimuláció során a repülőgépet állandó tolóerővel gyorsítjuk. A hármas csűrőkön alkalmazott $\pm 20°$-os *doublet* (δ_3) miatt a repülőgép fordul. Ezeken a csűrőkön nem a G_{dd} aktuátort alkalmazzuk, mivel ez nem vesz részt a flatter szabályozásában. Ehelyett az ún. *futaba* aktuátort használjuk, amelynek átviteli függvénye

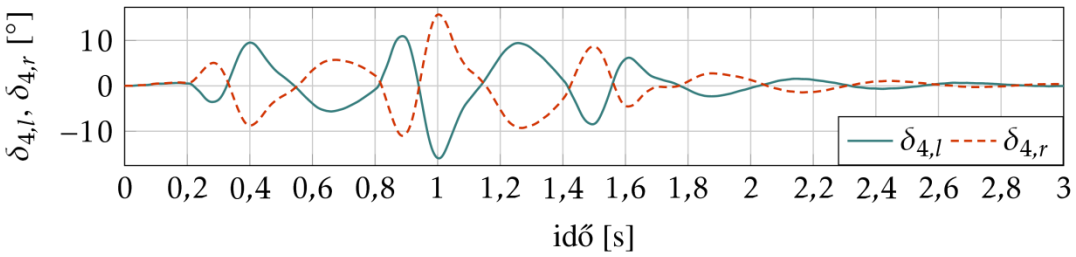
$$G_{\text{futaba}}(s) = \frac{9441}{s^2+183{,}4\ s+9441}. \tag{12}$$

A repülőgépet vízszintes és egyenes repülésnek megfelelő kezdőállapotból (trim helyzetből) indítjuk $\rho = 57$ m/s sebességen. A sebesség 69,2 m/s^2-re növekszik a szimuláció végére. A legyezési és orsózási szög (rendre ϕ és ψ) időbeli alakulását a 0. ábra mutatja.



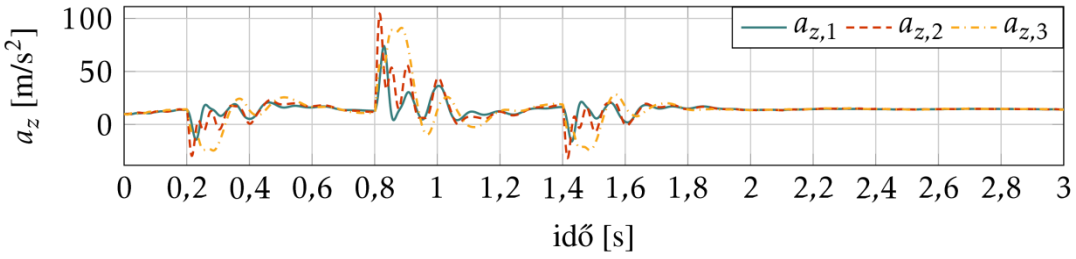
13. ábra Az orsózási és legyezési szög értéke a szimuláció során [11]

A flatter elnyomására használt kormányfelületek (csűrők) kitérítése a 13. ábrán látható. A szimuláció kezdetekor az első flatter módus már instabil, a második pedig röviddel ezután destabilizálódik. A szabályozó azonban biztosítja a szárnyak lengésének stabilitását. A beavatkozójelek amplitúdójára jól látható hatást gyakorol a fordulás és a gyorsítás. A maximális kitérés meghaladja a 15°-ot.



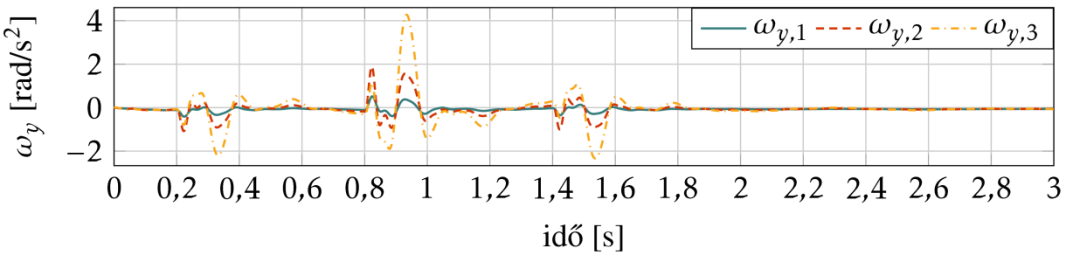
14. ábra A csűrőkormányok kitérítése a szimuláció során [11]

A gyorsulást és szöggyorsulást a szárny három pontjában mérjük: a törzs közelében, a szárny közepén és a vége közelében. Ezeket a pontokat rendre egyes, kettes és hármas számmal számozzuk (a 0. ábrán ezeket rendre R2, R4 és R6 jelöli). Mindhárom a kilépő élhez közel helyezkedik el. E pontokban a függőleges gyorsulást, a_z-t a 0. ábra mutatja. A gyorsulás a *doublet* hatására gyorsan növekszik. Ugyan a lengéseket a szabályozó megszünteti, a szárny maximális teherbírása további vizsgálatot igényel.



15. ábra A függőleges gyorsulás értéke a szárny mentén három pontban a szimuláció során [11]

A szárny torziós elcsavarodásából eredő szögsebességet, ω_y-t a 14. ábra szemlélteti ugyanazokban a pontokban, amelyekben a_z-t is mérjük. Az ω_y tehát a függőlegesre és a törzsre is merőleges szögsebesség, amely a 0. ábra alapján a szárny vége felé haladva (a befogástól távolodva) és a δ_3 *doublet* következtében növekszik.



16. ábra A szárny torziós elcsavarodásából származó szögsebesség a szárny mentén három pontban a szimuláció során [11]

ÖSSZEFOGLALÁS

Két különböző flatter elnyomó szabályozási elvet mutattunk be. Az első egy DK-szintézisre épülő módszer, amelyben az ideálistól legjobban eltérő rendszert (legnagyobb sebesség és késleltetés) használtuk a tervezéshez. E metódus célja, hogy a flatter és a *baseline* szabályozót frekvenciatartományban elválasszuk egymástól. Ezt a beavatkozójel súlyfüggvényének alkalmas megválasztásával értük el. A második módszerben a stabil és instabil dinamikát szétválasztjuk. Az instabil részt állapot-visszacsatolással stabilizáljuk, az ehhez szükséges állapotváltozókat egy LTI Kalman-szűrő számítja. A zárt kör stabilitását mindkét szabályozó esetén rögzített sebességpontokban igazoltuk. Mindkét módszerben lehetőségünk van további javításokra. A H_∞ szabályozó tervezéséhez strukturált tervezési módszereket fogunk alkalmazni, míg az LQ szabályozó esetén a stabil és instabil dinamika szétválasztására optimalizálás-alapú eljárások alkalmazhatóságát vizsgáljuk.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] R. L. Bisplinghoff, H. Ashley, and R. L. Halfman. Aeroelasticity. Addison-Wesley Publishing Company, 1955.
[2] B.P. Danowsky, P.M. Thompson, D. Lee, and M. Brenner. Modal isolation and damping for adaptive aeroservoelastic suppression. AIAA Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference, 2013.
[3] Frank L Lewis, Draguna Vrabie, and Vassilis L Syrmos. Optimal control. John Wiley & Sons, 2012.
[4] Andy Packard, John Doyle, and Gary Balas. Linear, multivariable robust control with a μ perspective. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 115(2B):426–438, 1993.
[5] B. Patartics, T. Luspay, T. Péni, B. Takarics, B. Vanek, and T. Kier. Parameter varying flutter suppression control for the BAH jet transport wing. IFAC-PapersOnLine, 50(1):8163 – 8168, 2017.
[6] David K Schmidt. Stability augmentation and active flutter suppression of a flexible flying-wing drone. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015.
[7] Gunter Stein and Johnc Doyle. Beyond singular values and loop shapes. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 14(1):5–16, 1991.
[8] Julian Theis, Harald Pfifer, Peter Seiler, and H Werner. Robust control design for active flutter suppression. In AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, volume 1751, 2016.
[9] F. Wu. Control of Linear Parameter Varying Systems. PhD thesis, University of California at Berkeley, 1995.
[10] Flutter Free FLight Envelope eXpansion for ecOnomical Performance improvement (FLEXOP). Horizon 2020 research and innovation programme of the European Union, grant agreement No 636307. https://flexop.eu/ (2018. 03. 10.)
[11] Saját készítésű ábra.

ACTIVE FLUTTER CONTROL OF A FLEXIBLE WING ARIRCRAFT

Aeroelastic flutter is an unstable oscillation, which is the result of an adverse interaction of the structure and the aerodynamics of aircraft. Since this phenomenon leads to structural failure, it must be avoided. Presently, this is achieved passively, by the increase of structural stiffness of the airframe. At the same time, the use of lighter and therefore more flexible materials for the construction of the wings is desirable for fuel efficiency. In recent years, this motivated research aiming to develop active control solutions to suppress flutter. Joining to this effort, two control design processes are presented that are able to expand the flight envelope of an unmanned flexible wing aircraft. Simulation results are provided to demonstrate the applicability of the proposed concepts.

Keywords: *UAV, flutter control, robust control*

Patartics Bálint (MSc) Tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium Repülésirányítási és Navigációs Csoport patartics.balint@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1445-9061	Bálint Patartics (MSc) Assistant research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory AeroGNC Research Group patartics.balint@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1445-9061
Péni Tamás (PhD) Tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium Repülésirányítási és Navigációs Csoport peni.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1440-4263	Tamás Péni (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory AeroGNC Research Group peni.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-1440-4263
Vanek Bálint (PhD) Tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium Repülésirányítási és Navigációs Csoport vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725	Bálint Vanek (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory AeroGNC Research Group vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-07-0447_Patartics_B-Peni_T-Vanek_B.pdf

Ady László, Terpecz Gábor

MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALKALMAZÁSA AZ OKTATÁSBAN

Az oktatás története során többször kellett átalakulnia vagy az új kihívások miatt vagy mert új technológiai lehetőségek váltak elérhetővé. Jelenleg a tudomány fejlődése által a társadalom jelentős átalakuláson megy keresztül. Jelenleg ez a folyamat még csak most kezdődik. A következő generációk viszont már teljesen más társadalmi problémákkal fognak szembesülni. Szakmák szűnnek meg, a robotizálás jelentős mértékű emberi munkát vált ki. Az emberek által elvégzendő munkák komplexitása nő, többségében a kreativitást igénylő munkákra lesz igény. Ez megint új kihívások elé állítja az oktatást. Ugyanakkor a kiváltó okokat jelentős technológiák új lehetőségeket is megnyitnak az oktatás területén. A társadalmat a közeljövőben leginkább átalakító technológia a(MI) mesterséges intelligencia és a robotika. Jelen írásban a MI és az oktatás kapcsolatára, az oktatás fejlesztés koncentrálunk.

***Kulcsszavak**: eLeaerning, MI, mesterséges intelligencia, oktatás*

BEVEZETÉS

A tudomány – technológia fejlődése jelentős kihatással van a társadalomra. Ez a hatás olyan mértékben változtatja a társadalom szerkezetét, hogy az oktatás nem tudja szerepét megfelelően betölteni. A technológiai fejlődés hatására már nem csak a nagy ismétlés számot igénylő feladatok automatizálása oldható meg, válik gazdaságossá. Több adaptivitást igénylő komplex munka váltható ki a közeljövőben robotokkal. Ilyen mértékű automatizálásra az MI fejlődésével vált lehetőség. Az MI a mesterségesen létrehozott tárgy képes legyen viselkedését célszerűen és megismételhető módon változtatni. Jelenleg a számítógép-tudomány jelentős ágát képviseli, amely intelligens viselkedéssel, gépi tanulással, és a gépek adaptációjával foglalkozik. Így például szabályozással, tervezéssel és ütemezéssel, diagnosztikai és fogyasztói kérdésekre adott válaszadás képességével, kézírás-, beszéd- és arcfelismeréssel. Egy olyan tudományággá vált, amely a valós életbeli problémákra próbál válaszokat adni. Az MI fejlettsége jelenlegé éri el a komplex széleskörű felhasználhatóságát. A jövőben ezért számolni kell nagy mértékben szakmák megszűnésére, egyes szakmák teljes átalakulására. A jövőben főleg komplex kreativitást igénylő munkaerőre lesz csak szükség. Mindeközben az oktatásban tapasztalható, hogy a felső oktatásba belépő hallgatók tanulás módszertana, figyelme és a tanulás megközelítése teljesen más, mint amire az oktatás fel van készítve. Ebből következik, hogy újra kell gondolni az oktatás szervezést, módszertant.

Ebben a cikkben azt mutatjuk be, hogy milyen a magyar oktatási rendszer, milyen történettel rendelkezik, milyen megoldások érhetőek el jelenleg az oktatás területén, és milyen lehetőségek nyílnak meg az MI használata esetén.

A MAGYAR OKTATÁS TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉSE

A magyar oktatást az intézményes feljegyzett oktatás kezdetétől csupán áttekintő jelleggel gyűjtöttük össze. Nem célunk egy teljes részletes elemzés készítése csupán érdekességek és a tendenciák bemutatása.

A magyar iskola történet kezdete

A magyar iskola történet kezdetének tekinthető az 996-ban [4] létrehozott Szent Márton-hegyi bencés kolostor Pannonhalmán. 1093-ban a pannonhalmi kolostor iskolájának már 83 könyve volt. [5] A könyvekkel való ellátás István király III. törvényének I. cikkelye szerint a püspök feladat volt, mind a 10 püspökségben megindult a könyvmásolás és az írás oktatása. Az iskola egyházi rendszerbe tagolódó intézmény volt. Kis csoportos latin nyelvű oktatás folyt.

XI. század iskola rendszere

XI. században jellemző iskolatípusok:

- kolostori;
- székesegyházi és káptalani iskola;
- plébániai iskola.

Ebben az időszakban már nem csak egyházi iskolák voltak, királyi, püspöki és főúri alapítású iskolákban ázómban egyházi szervezésben voltak, egyházi irányítás alatt. Az első iskolákat a bencések szervezték meg, 1142-ben a francia ciszterciták is megérkeztek, akik számos iskola alapításával rakták le a magyar művelődés alapjait, de bábáskodtak a kapucinus, ferences és domonkos rendiek is.

Kolostori iskola működött Pannonhalmán.

Káptalani iskolák:

- Esztergomban;
- Győrben;
- Pozsonyban;
- Veszprémben;
- Pécsett;
- Egerben;
- Nagyváradon;
- Gyulafehérváron.

A káptalani iskolák jól differenciált közép tagozattal rendelkeztek. A zárdai, káptalani és székesegyházi iskolák a mai középiskolák feladatát teljesítették. Tantárgyaik az úgynevezett 7 szépművészet (septem artes liberales), amelyek két tanfolyamra voltak osztva, az elsőnek a neve volt trivium, a másodiké quadrivium. A trívium anyaga a grammatika, retorika és dialektika -, mely tantárgyak viszont a latin nyelv, olvasás, írás és számtan ismeretén nyugodtak.

Az iskola élén álló rektornak nagy diákok segédkeztek a kisebbek oktatásában. Az osztály és a tanítási óra fogalma ismeretlen volt, a fegyelem fenntartására a virgács szolgált, megszégyenítésül a szamárpadot használták.

XIII.-XV. század iskola rendszere

Megjelentek az első nem egyházi iskolák is, viszont még mindig szervezetileg egységes rendszert alkottak a világi iskolákban a tananyag közel állt az egyházihoz még latinul, egyházi tanárokkal. Az első városi iskolák alapításának éve: Pest 1238, Óbuda 1276, Pozsony 1302.

Az iskolázottság nem volt általánosan elterjedt. Csak egy szűk elitnek volt lehetősége a gyermekei taníttatására. A lakosság nagy többségét alkotó parasztság gyermekei őseik foglalkozásával a családi gyakorlatban, tehát nem az iskolában ismerkedtek meg. A tananyagot az élet természetesen szabályozta. A "természetes tanterv" generációról generációra szállt, ami meg is felelt a társadalom lassú fejlődési ütemének. A tankötelezettséget középkorban a magyar törvény nem írta elő.

A városi oktatásban komplex tantárgycsoportos oktatás folyt. A tanulókat a koruk szerint alsó, közép és felső csoportba sorolták. Délelőtt középső csoportban fogalmazást, vers mondást és éneket tanítottak. Délutánonként az alsó csoportban a latin nyelvtan elemeit és szókincsét tanították. A felső osztályban filozófiát és teológiát sajátítottak el a diákok. A XIII. sz-i városi iskoláknak két-két tanára volt, akik aránylag magas jövedelmet kaptak.

A középkori tantermek úgy voltak berendezve, hogy a tanító dobogón foglalt helyet egy asztal mögött, a tanulók padokban ültek a tanítóval szemben. A tanulók táblára egyenként írták fel krétával az ábécé betűit. A tanítók kemény fegyelmet tartottak az oktatáson kívül nevelni is igyekeztek. A tanulók nagy része az iskolaépületben lakott. Tanári engedély nélkül diák az utcára ki nem mehetett, az utcán kardot nem viselhetett, s aki sötétedés után is kinn maradt azt szigorúan megpálcázták. Előírás volt, hogy a diákoknak egyszerű, hosszú ruházatot kell viselniük. A fegyelmezésre bot és bor szolgált [6].

Lovagi kultúra

Az Árpád korban fogalmazták meg a lovagság művészetének eszméjét. Ekkor főleg úszást, lovaglást, vívást, vadászatot, solymászatot, sakkozást, muzsikálást, hangszeres zenét és versírást tanítottak.

A lovagi nevelés ellentéte az egyházi iskolai nevelésnek. A kolostori iskola sok más egyéb között - elutasította a testedzést. A taneszközök jellemzően a fegyverek voltak.

Mátyás király kori oktatás

Mátyás király komoly erőforrásokat fordított az oktatásra és az oktatás színvonalának fejlesztésére. Könyvtárat alapított és az országban további, jelentős könyvtár alapítási programot indított, mely részeként további könyvtárak jöttek létre

- Körmöcbányán;
- Lőcsén;
- Bártfán;
- Nagyszebenben;
- Selmecbányán;
- Sopronban.

Ezek a könyvtárak ugyan templomokban létesültek, de a polgárság számára hozzáférhetők voltak.

Külföldi professzorokat hívott az oktatási rendszer felméréséhez:

„*Te vagy egyedüli alkotója, fenntartója ... A tanárok és az oktatást vezető elöljárók felségedtől áradó bőségben kapják esztendőnként az aranyat; a növendékek az élelmet, ruházatot, szállást, s bőven ellátod őket mindazzal, ami az embernek szükséges.*” [7 p. 35]

És az oktatás színvonalának emeléséhez:

„*Mátyás király beküldé embereit Franciaországba és Németországba, és mindenütt keresteté az jeles és tudós népeket és béhozatá azokat nagy költséggel és bőv fizetésre Magyarországba; mert látja vala, hogy a magyarok barbarusok és csak bárdolatlan parasztok volnának.*" [8 p. 2]

Uralkodása alatt a hazai iskolázás színvonalának egyik fokmérője, hogy Vitéz János érsek Reginomontanus (Johannes Müller) tudós tanárt Pozsonyba küldte, ahol előadta − több mint száz évvel Galilei előtt − a Föld mozgásáról szóló tanát [7].

A számtan tanítás a gazdasághoz kapcsolódott. Az írásbeliség tanítása gyakran hivatalos beadványok fogalmazását jelentette. A városi iskolák 5−7 tanulócsoportosak voltak, de működött 8-9 osztályos iskola is.

Három részre szakadt ország oktatási rendszere

Az oktatás fejlődése a középső török birodalom által uralt területeken megállt, sok esetben az oktatást szétverték. A háromrészre szakadt ország többi területén folyamatosan fejlődött, főleg Erdélyben, az Erdélyi Fejedelemséghez tartozó Sárospatakon, Comenius működése alatt élte virágkorát a Pataki Kollégium. Comenius, aki Szeges János néven látta meg a napvilágot, a morvaországi Nivnitzben született 1592-ben és Amszterdamban halt meg 1670-ben. A hollandiai Naarden templomában nyugszik [9].

A Nagy Didaktika című könyvében azt fejtegeti, hogy a tanulóban okok által kell mindent megszilárdítani; indokok alapján kell tanítani [10].

Comenius szerint a nevelés 24 évig tart, s négy fokon megy végbe 6−6 éven keresztül:

- az anya és a család nevelése;
- anyanyelven tanító iskola minden községben;
- latin iskola (gimnázium) minden városban;
- akadémia (egyetem) minden országban [11][12].

Sárospatakon írta a Lucidarium című könyvét is, mely 150 leckét tartalmaz. A leckék fölött képekben mutatja be a teljes világot a gyermekeknek: az erkölcsi, társadalmi ismereteket, a növény- és állatvilágot stb.

A debreceni református kollégium a sárospataki mintájára jött létre 1657-ben.

Ugyancsak 1657-ben az egri érsek Kassán alapított egyetemet, s az oktatást a Jézus Társaság tagjaira, a Jezsuitákra bízta.

A reformáció következtében kialakultak a protestáns iskolák. Az evangélikus vallás a városi német polgárság körében, a református vallás pedig a parasztság (mezővárosok) körében terjedt el. Emiatt az iskolázás is megoszlott a három felekezet között.

Az 1630-40-es években élte fénykorát a gyulafehérvári akadémia, amely 1658-ban elpusztult. A törökök feldúlták híres könyvtárát fölégették, az iskola épületével együtt. Szertárainak gazdagsága, korszerű szemléltetőeszközei mindig híresek voltak. Az akadémia hallgatói között találjuk Körösi Csoma Sándort, Benedek Eleket, Sütő Andrást, Köpeczi Bélát és másokat.

Osztrák-Magyar monarchia a kiegyezés előtti oktatása

A törököt 1686-ban kiűzték Budáról, s egy év múlva az egész ország területéről kiszorították.

Nagy népvándorlás vette kezdetét az országban: szerbek menekültek a Szerémségbe, Ráckeve és Szentendre térségébe, hatalmas rajokban özönlöttek a románok is Erdélybe a Havasalföldről. Így néhány év alatt a magyar lakosság elveszítette ott számbeli többségét.

1776-ban bécsi rendeletre előírták, hogy Karlócán a szerb és román iskolák tantermeit be kell rendezni asztalokkal és padokkal. Ezekről, valamint író- és rajzeszközökről az udvar gondoskodik. Az ábécés könyvek is nemzetiségi nyelveken jelentek meg, a tanítás nyelve szerb, illetve román nyelv volt.

Bécs tehát feltűnően bőkezűen és megkülönböztetett gondoskodással segítette a Magyarországon lévő román, német és szerb iskolákat a magyarokkal szemben, akiknek ilyen taneszköz-ajándékot nem juttatott.

A német törekvések ellenhatásaként egyre jobban terjed a magyar anyanyelvű oktatás.

A XVIII. század közepétől válik a latin nyelv az oktatás nyelvéből egyszerű tantárggyá, bár főtantárggyá. Az egyházi iskolák szemlélete modernizálódott, tantárgyai között helyet kaptak a természettudományok. Szakszerű, pontos tankönyvek jelentek meg, szertárak létesültek.

Bár még mindig a fiúk nevelése van előtérben, 1784-ben megjelenik az első, leányoknak szánt tankönyv, a „Leány á-b-tz". Az általános oktatás ugyan még csak eszmény, de a gyerekek egynegyede - az unitáriusokénak fele - ját iskolába. Legtöbben csak elemi népiskolába járnak, de a XVIII. század elejétől egész sor új középiskola is létesült, leginkább Erdély városaiban. A XVIII. század elejétől egyfajta korszerűsítési reform kezdődött a hazai oktatásban mely a XIX. század közepéig tartott. A reform lényege, hogy az oktatás nem az egyházon belül zajlik, hanem az állam által felügyelt és az egyház által fenntartott intézményekben. A reform jellegzetessége, hogy a reformerek nem egyes felekezetekben alakult csoportokként jelennek meg. A haladó szellemiségű Lutheránusok és Kálvinisták egymással való kapcsolata sokkal jobb, mint a saját egyházközösségeik konzervatív vezetőivel.

A maguk korában Apáczai és Mikes Kelemen még csak kívánták, hogy a népiskolák tanulóinak jobb volna - amikor már írni és olvasni tud - valamilyen mesterséget tanulni, mert a mesterségek és a kereskedés hajtanak hasznot egy országnak.

Ez az óhaj ez időtől kezd valósággá válni. A korábban kizárólag papi pályára készülő ifjúság körében sokasodnak a világi ismeretek iránt érdeklődő diákok, elsősorban az orvosi és mérnöki tudományoknak van vonzereje. Az ekkor már körzővel és vonalzóval dolgozó Bolyai János a matematikai gondolkodást forradalmasítja az iskolában.

Osztrák-Magyar monarchia a kiegyezés utáni oktatása

1867-ben létrejött az Osztrák-Magyar Monarchia. A magyar kormány közoktatási minisztere báró Eötvös József így fogalmazott: „*ha van feladat, amelynek megoldására az állam hatalma elégtelen, az a népnevelés. Új feladat ez, melyet csak maga a nép oldhat meg. Ha valamely ország a kultúrában visszamaradt, akkor az iparban, a mezőgazdaságban, tehát az anyagiakban is*

természetszerűleg fejletlen" [13 p. 6] „*A magyar tudomány zászlóját olyan magasra kell emelnünk, hogy azt hazánk határain túlis meglássák, és megadhassák neki az illő tiszteletet.*" [13 p. 34].

Magyarországon 1868-ban iktatták törvénybe az Eötvös-féle kötelező népoktatást. Abban az évben a felmérések alapján az írástudatlanok számaránya 65,6% volt. Az államháztartásnak minden egyes település elöljáróságának új kötelezettségekkel kellett szembenéznie.

A 6-12 éves korúak kötelező iskoláztatása mellett az 1868-as törvény 38.tc.30. paragrafusa előírta: „*A közösség tartozik az iskolát földgömbbel, térképpel, táblákkal, természetrajzi ábrákkal és minden szükséges, elegendőszámú taneszközzel felszerelni.*" [18 p. 4] A szükséges taneszközök jegyzékét egy 15 évvel későbbi feljegyzésből tudhatjuk meg. „*A tanszoba bútorzatát képezik: Ő felségének arczképei, szentképek a római és görög katolikus iskolákban, az iskolapadok, a katedra, fekete falitábla, falióra, köpőládák, sarutisztító vasak, ruhatartó és szekrény*". [14 p.24]

Az új iskolarendszerében egyre nagyobb teret hódít a felvilágosodás és a liberalizmus, míg háttérbe szorul a felekezetiség.

XX. század oktatása

A XIX. század végén, illetve a XX. sz. elején jelennek meg a reformpedagógiai irányzatok melyek közös jellemzői, hogy a gyermeket nem kicsinyített felnőttként kezelik, meghatározott pedagógiai gyakorlattal és elmélettel rendelkeznek, szemléletük középpontjában a gyermek fejlődésének sajátosságai állnak.

A XX. század elején már általánossá vált a tankötelezettség. Ebben az időszakban már elvárás volt négy elemi osztály elvégzése. Az új oktatási rendszer az egyenlőség elvén alapul, célja az oktatásban való osztálykülönbség megszüntetése. A női egyenjogúsági törekvéseknek köszönhetően megnőtt a leánygyermekek taníttatásának száma. Ez azt eredményezte, hogy egyre több lány tanult szakmát vagy szerzett diplomát. A kialakult új szemlélet a műveltséget már közvagyonnak tekintette, mely megszerzése nem csak jog, hanem kötelesség is.

Jelen

A rendszerváltás utáni demokratikus átalakulás következtében egyfajta információ robbanás jött létre. Ennek eredményeként az emberi kapcsolatok, értékrendek átértékelődtek. Felgyorsult a társadalmi differenciálódás, társadalmi ellentétek alakultak ki, fokozódott a kiúttalanság érzése. A tömeges közép és felsőfokú oktatás létszám orientáltságának és létszám alapú finanszirozásának erőltetéseként következményeként az oktatásban (köszönhetően a születések csökkenésének) elkezdődött egy demográfiai hullámzás mely napjainkban éri el tetőfokát. A helyzetet rontja a pedagógus pálya elértéktelenedése melynek következtében létrejött egy ördögi kör. A pálya népszerűtlensége pedagógus hiányt okozott. A hiány pótlására "rossz" pedagógusokat alkalmaznak melyek tovább rontják a képzés minőségét, rossz pedagógus jelöltek kerülnek ki és ezzel még népszerűtlenné teszik a pedagógus pályát. A helyzet hasonló a minőségromlás jelentkezik a vezetőknél is. Az elvárások fokozatosan nőnek az iskolákkal kapcsolatban is. Egyre tátongóbb szakadék alakult ki az iskolai követelmények, elvárások és a teljesíthetőség között is.

A régi oktatási formák és pedagógusok képtelenek felvenni a küzdelmet a tanulókat érő információáradattal szemben. A figyelem fenntartása ilyen körülmények mellett emberpróbáló

feladat. Az Y, Z generációknál egyre inkább egyéni fejlesztésre van szükség. Az Alfa generáció esetében előre láthatóan még dominánsabban változtatásra lesz szükség.

A generáció-elméletet két amerikai William Strauss és Neil Howe dolgozta ki. Két évtized alatt több könyvet is írtak a témáról. Generattions (1991) könyvben az egymást követő generációk alapján vizsgálták a történelmet. Megállapították, hogy egy adott generáció tagjai nagyon hasonló értékrenddel és világlátással rendelkeznek. Egy ember életet, ami kb. 80 év seaculumnak nevezték és erre az időszakra 4 generáció váltást határoztak meg. Ezek ciklikusan követik egymást minden században ugyan olyan módon. Ezek:

- az első szakaszban az intézmények erősek az egyének gyengék;
- a második szakaszban az „ébredés" során az egyének az autonómia nevében megkérdőjelezik az intézményeket;
- a harmadik szakaszban az intézmények meggyengülnek, erős individualizmus;
- a negyedi szakaszban a „válság" során az intézmények újra értelmezésé, új alapítás.

Strauss és Howe szerint minden időszaknak megvan a maga embertípusa:

- próféták a válság vége fele születettek, akiknek az erősségei az értékek;
- nomádok az ébredés idején született, szabadságszeretők;
- hősök a vagyon gyarapító, közösség építők;
- művészek az újabb válság idején születettek.

A ma élő generációk szerint:

- 1940−50-as évek próféták;
- X generáció 1960-70-es években születettek nomádok;
- Y generáció 1980-90-es években születettek hősök;
- Z generációk 2000-es években születettek művészek;
- Alfa generáció 2010-es években születettek.

X generáció a Kádár-korszakban nőtt fel Magyarországon. Átmeneti generációról van szó, amely a „nagy" 68-as nemzedék után és a „hipermodern" Y/Z generációk előtt született. Magyarországon ez a nemzedék a rendszerváltás idején vált nagykorúvá, amikor a gyerekkorban megismert világ szabályai érvénytelenné váltak, az új világ viszont még kiismerhetetlen volt. Ami a digitális technológiát illeti, ugyan már fiatalon megismerkedett vele, de a következő generációkhoz képest mindig csak „digitális bevándorló" marad.

Y generáció Strauss és Howe Millennials Rising: The Next Great Generation (2000) című könyve szerint ennek a generációnak a jellemzői:

- különlegesek – legalábbis annak érezhetik magukat, mert gyerekkorukban rengeteget törődtek velük, sokkal többet, mint bármely korábbi generációval;
- védettek – ugyanezért. Sokuk fölött még húszas éveikben is ott köröznek a gyereküket elengedni nem akaró „helikopter-szülők";
- magabiztosak és optimisták – a Zabhegyező elidegenedett, szorongó, lázadó 50-es évekbeli kamasz hősének, Holden Caulfieldnek az ellentétei;
- csapatban szeretnek dolgozni;
- ambiciózusak, erősen motiváltak, racionálisak és hosszú távra terveznek – szemben az előző generációkkal, akiket a művészet, a filozófia és a keleti vallások vonzottak;

- nagy nyomás nehezedik rájuk, mivel sokkal bizonytalanabb gazdasági környezetben lépnek ki a világba, mint a szüleik;
- sokkal hagyományosabb, konvencionálisabb értékrenddel rendelkeznek, mint az előző két generáció.

Ez a generáció már "digitális benszülöttek" közé sorolgató.

Z generáció az igazi digitális bennszülöttek, akik már akkor is tudják használni a technológiai eszközöket, amikor még beszélni is alig tudnak. A Z generáció tagjai idejük jelentős részét online töltik, a közösségi oldalakon chatelnek és barátkoznak. A gazdasági és társadalmi változásokra már gyerekkoruktól kezdve minden eddigi generációnál nagyobb befolyást gyakorolnak, a marketing-szakemberek.

Ennek érdekében nemzetközi ajánlások, trendek idehaza is érvényesültek. (Bolognai folyamat, az egész életen á tartó tanulás programja stb.) Life Long Leaning vagyis az egész életen át tartó tanulás szerves részévé vált az eLearning mely hazánkban sajnos még nagyon gyerekcipőben jár. Ezt jól bizonyítja, hogy sok képző nevezi az oktatását eLarningnek, valójában ez csak olyan oktatási keretrendszerek mint az Ilias vagy Moodle használatában nyilvánul meg. Igazi, az eLearning minden követtelményét kielégítő tananyagot hazánkban csak elvétve találni.

Jövő

Az informatika rohamos fejlődésével elérhetővé vált technológiák a piaci hasznosíthatóság fázisába érnek. Ezáltal új ipari/technológiai forradalom várható, ami jelentős társadalmi változásokat fog okozni. Egy emberöltőn belül tucatjával szűnnek meg szakmák és tömeges szakma elhagyás prognosztizálható. Várhatóan a társadalom egy jelentős részének kell az élete során többször szakmát váltani. Gyakran és jelentősen kell átalakítani a képzés módját és tartalmát. A gyerekek oktatása során nem dedikált tudást kell számukra megtanítani, hanem készséget, amivel képes gyorsan és hatékonyan tanulni. Az mesterséges intelligencia következik, a jövőben a mesterséges intelligenciákat az oktatásban is be lehet és kell vezetni.

A magyar oktatási rendszer történetében jól látszik, hogy sokáig csak a társadalom kis része előtt volt elérhető. Kis létszámú csoportos foglalkozások voltak és a tanultabb diákok a kisebb diákokat segítette tanította. Az oktatás társadalmi elterjedése általában új technológiai vívmányok, a társadalom átalakulásakor változott. A magyar oktatási rendszer a társadalmat ért traumák hatására az oktatás minőségi színvonalának emelésével reagált, ezt jellemzően külföldi szakemberek, vagy külföldön tanult magyar szakemberek bevonásával érte el. A magyar oktatási rendszer történelmében jellemző a találékonyság.

A MODERN OKTATÁS MÓDSZERTANI, SZERVEZÉSI ÁTTEKINTÉSE

Oktatási módszerek: az oktatási folyamatnak állandó, ismétlődő összetevői, a tanár és tanuló tevékenységének részei, amelyek különböző célok érdekében eltérő stratégiákba szerveződve kerülnek alkalmazásra.

Hagyományos oktatás módszertanok [1]:

- előadás;
- magyarázat;

- elbeszélés;
- tanulói kiselőadás;
- megbeszélés;
- strukturálás;
- kérdezés;
- visszacsatolás, a tanulók tevékenységének értékelése;
- vita;
- vita vezetés;
- szemléltetés;
- projekt módszer;
- kooperatív oktatási módszerek;
- szimuláció, szerepjáték és játék;
- házi feladat.

Az oktatás szervezés módjai:

- frontális munka;
- egyéni munka;
- párban folyó munka;
- csoportmunka.

AZ OKTATÁSI MÓDSZEREK GENERÁCIÓI

A tanulási környezet: a tanulás eredményességére ható különböző környezeti tényezőket együttesen nevezzük tanulási környezetnek.

Hagyományos oktatás: a mai magyar oktatásban az egyik leggyakrabban előforduló módszer, jellemzően a frontális osztálymunka és az önálló munkaára épít.

eLearning [2]: Az eLearning az információs technológiák hatékony felhasználása az oktatási folyamat során.

eLearning 2.0 [3]: tanulóközpontú, irregulárisan szerveződő tanulási forma, mely a tanuló autonómiáján és spontán tudáscserén alapulva már nem hierarchikus, hanem sokirányú, decentralizált, sokcsatornás; a kollaboratív tanulásra ösztönözve kibontakoztatja a tanulói kreativitást.

eLearning 3.0: a tananyag automatizáltan kerül létrehozásra, tanulás közben a tanulóhoz igazítja a tananyagot és a tanulás módszertant.

Hagyományos oktatás

A mai oktatási rendben elterjedt domináns oktatási forma. Jellemzően frontális osztálymunka, önálló munka és házi feladat dominál. Az ilyen órák tantermiek, 45 percesek kevés lehetőség adódik a tanulók bevonására, egyedi képességeikben megfelelő egyedi ellőre haladásra. Legfőbb jellemzője, hogy a tanár, tankönyv az információ hordozója. A tananyagok nagy egységekre vannak bontva, minimális az interakció, egy szálon futó ismeret átadás-befogadás történik.

eLearning

Az eLearning alapelve a hatékony multimédiás tanulást a kognitív tudományra építve írja le elektronikus technológiákat alkalmazva. Főbb elvek:

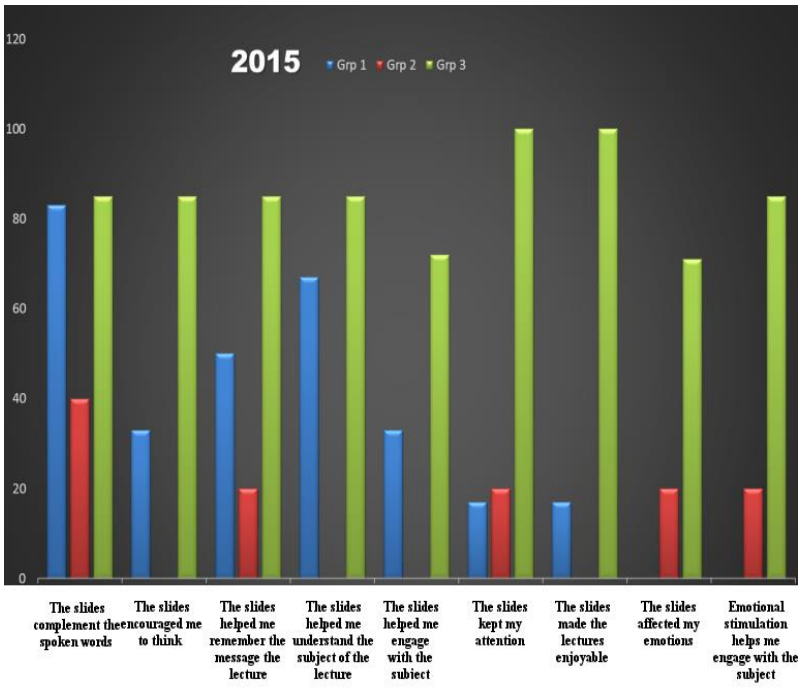
- **multimédiás elv**: mélyebb tanulás akkor figyelhető meg ha a szöveg és a releváns grafika bemutatásra kerülnek, mint amikor csak a szöveg kerül bemutatásra. Röviden megfogalmazva a multimédiás prezentáció három legelterjedtebb eleme a releváns grafika, audio-narráció, és magyarázó szöveg. A három elem közül kettő kombinációja jobban működik, mint egy vagy mindhárom együtt;
- **modalitás elv**: általánosságban elmondható, hogy az audio narráció jobb tanulást eredményez, mint a képernyőn megjelenített folytonos szöveg. Ez különösen igaz, ha már ismert a tananyag („pre-training"). Kivétel az, amikor a tanuló az információt referenciaként használja és többször meg kell néznie. (műszaki területen jelentős);
- **koherencia elve**: ne használjunk felesleges tartalmat. Annak érdekében, hogy minimálisra csökkentsük a memóriában a kognitív terhelést a tanulás során irreleváns és esetleg zavaró tartalmakat el kell hagyni;
- **folytonosság elve**: a mélyebb tanulás akkor jelentkezik, amikor a releváns szöveg a grafika közelében helyezkedik el, vagy amikor a narratíva és grafikák egyszerre jelenik meg, vagy amikor a tanuló válaszára azonnal visszajelzést adnak;
- **szegmentációs elv**: mélyebb tanulás akkor jelentkezik, amikor a tananyag apró részekre van lebontva;
- **jelző elv**: vizuális, audio jelek használata a lecke kritikus elemeinek felidézésére. A közös technikák közé tartoznak a nyilak, a körök, a szöveg kiemelése vagy bélyegzése, valamint a narrációban való szünet vagy vokális hangsúly. A kritikus információk megadása után lezáró leckék szegmensek is jelzőcímként szolgálhatnak;
- **hallgatói irányítási elv**: mélyebb tanulás akkor történik, amikor a tanulók képesek szabályozni azt a sebességet, amelyen a szegmentált tartalmak révén haladnak;
- **tesztre szabási elv**: multimédiás leckék mélyebb tanulása akkor következik be, amikor a tanulók erősebb társadalmi jelenlétet tapasztalnak. A tanulónak azt kell értenie, hogy valaki közvetlenül beszél nekik, amikor meghallják a narrációt. A tanulónak úgy kell éreznie, mintha valaki közvetlenül beszélne velük, amikor meghallják az elbeszélésüket;
- **pre-training elv**: mélyebb tanulás akkor következik be, amikor a leckék bemutatják a kulcsfogalmakat vagy szókészletet, mielőtt bemutatják ezeket a fogalmakat.
- **redundancia elv**: mélyebb tanulás akkor következik be, amikor a lecke grafikát az audio-narrációval magyarázza, nem pedig az audio-narráció és a képernyőn megjelenő szöveg;
- **szakértői hatás**: Az olyan oktatási módszerek, mint a fent ismertetettek, amelyek hasznosak lehetnek a kezdő vagy új ismeretek elsajátításához, nincs hatásuk a magas szintű ismeretekkel rendelkező tanulók körében.

Az eLearning (1.0) a tantermi prezentáció tovább gondolása és a modern multimédiás eszközök és az internet segítségével a tanteremből az egyéni tanuló környezetekbe költözött. Itt a tananyagra van helyezve a fókusz, vagyis minden tanuló ugyan azt a tananyagot, ugyan abban a formában tanulja, a tesztre szabás csak az ellőre haladás sebességében jelentkezik.

Sajnos hazánkban még mindig tévhitek keringenek az eLearning tananyag tervezése, eLearning bevezetése és használata körül. Miközben a világban már az eLearninget tovább gondolták és szerves részét képezi az oktatási rendszereknek. Például: Udacity: nano degre program.

A tapasztalatok alapján a műszaki oktatás területén a eLearning eredményei jól nem használhatók a komplex gondolkodás kialakításában. Nagyobb interaktivitásra van szükség és komplex válaszokat kell kezelni.

Richard E. Mayer, John Sweller és Roxana Moreno olyan multimédiás oktatási elveket hoztak létre, amelyek elősegítik a hatékony tanulást. Ezeket azóta a mindennapi tanításban több helyen használják, tesztelik. Például Dr. David Roberts 9 társadalom tudományi terület oktatásában tesztelte 3 éven keresztül. Az elért eredmények alapján megállapította, hogy a hallgatók nagymértékű javulást értek el képek és a szövegek kombinációjának segítségével [15]. Dr. Davis Robers tudományos kutatásában ugyanazt a tudományos előadást tartotta önkéntes hallgatók három csoportjának, három különböző módon összeállított diákkal. Az első csoport csak szöveges felsorolást tartalmazó diákkal látta az előadást, a második csoport kevés kis képpel és kevesebb szöveggel, a harmadik csoport jó minőségű ábrás képekkel.



1 ábra Dr. David Roberts eredményei [15]

Számos más tanulmány kimutatta, hogy ezek az elvek hatékonyak más korú tanulókkal. Azonban ezek az eredmények nem ilyen szignifikánsak a műszaki tananyag terén [16][17].

eLearning 2.0

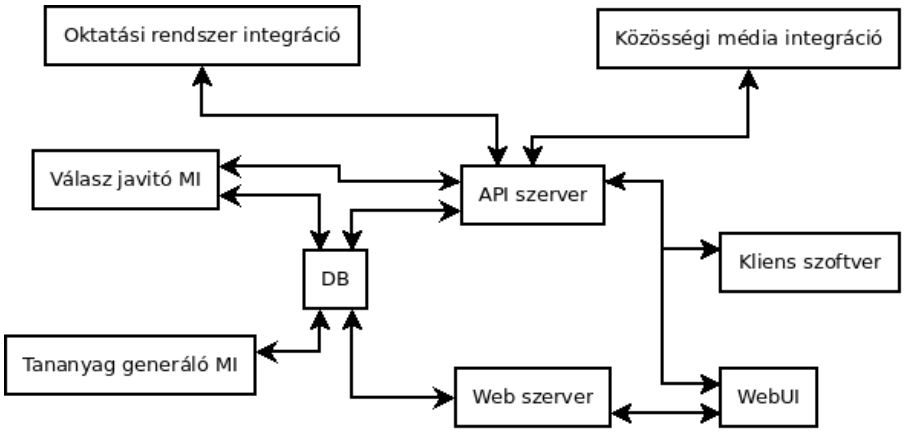
Az eLearning 2.0 az eLearninghez képest további fejlesztést ír le. Hasonlóan a Web 2.0 koncepcióhoz. Ez jellemzően a részvétel, együttműködés, és kommunikáció a diákok és a tanárok között. Az eLearning 2.0-ban a tanulási folyamatok vannak a középpontban. A kifejezést először 2005-ban Stephen Dowes használta. A Web 2.0 technológia eredményeinek segítségével támogathatóvá vált az együttműködő, önállóan irányított és az önálló tanulás. Ezt a web 2.0 alkalmazások használatával lehet elérni. Például: alkalmazások wiki oldalak, podcastek,

közösségi hálózatok, média eszközök és platformok integrálásával. Tehát a tanulás már nem a zárt tanulási platformokon zajlik, hanem egyre nyíltabbá válik. Az eLearning 2.0 előnyei mindenki számára elérhetőek. Az Y és Z generáció természetes környezete a Web 2.0 az eLearning 2.0 ebbe a térbe helyezi az oktatást, az ennek megfelelő formában. A társadalom az Y és Z generációval kezdődően jelentős átalakuláson megy keresztül. A hagyományos oktatás jelenleg nem képes megfelelő módon közelíteni ezekhez a generációkhoz. Jelenleg a legnagyobb gondot az eLeraninng 2.0-ban a nem ellenőrzőt internetes tartalmak okozzák, sok a téves hibás anyag. A web végül hatalmas növekedési potenciállal rendelkezik, nem kontrolálható. Ezért a tanárok új szerepet vállalnak és kísérik a tanulókat, nem autoritárius szakértőként.

eLearning 3.0

Az eLearning 3.0 az eLearning 2.0 továbbfejlesztése oly módon, hogy a tananyag automatikusan kerül létrehozásra. Az információ dialógus formájában kerül átadásra. Így egy nagyon interaktív a dialógus során a tanulóhoz optimalizált rendszer alakítható ki.

Az eLearning elterjedésének egyik akadályozó tényezője Magyarországon, hogy nem érhetőek el jó eLearning tananyagok, a tananyagok tervezése és létrehozása költséges. Nincs egységes minősítési rendszer, így a közoktatásban csak alacsony százalékban támogatott. Minősítés hiányában sajnos sok helyen eLearning-ként tekintenek a videókra vagy központi rendszerbe feltöltött pdf-ekre.



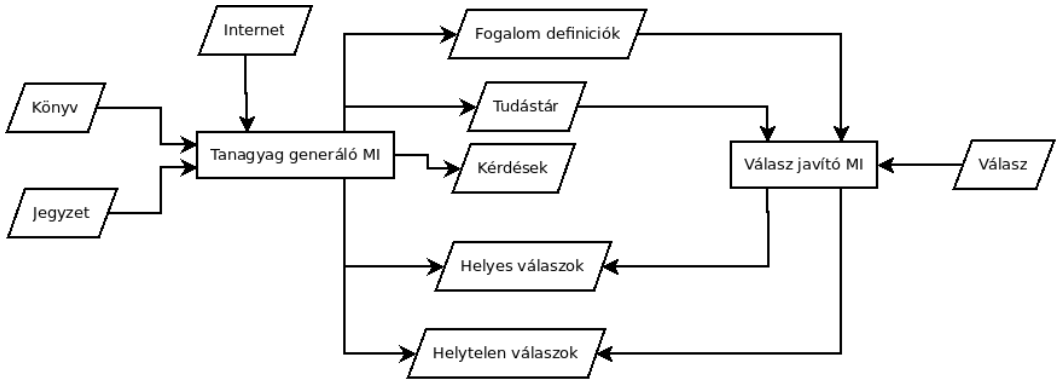
2. ábra A rendszer blokkvázlata (saját szerkesztés)

Ezt a problémát oldaná meg egy automatizált eLearning tananyag generáló szoftver. Ez csak MI felhasználásával lehet lehetséges elég rugalmasan. A tanítandó tananyagnak a hagyományos oktatásban használt formában kell rendelkezésre állnia. Ez általában könyv, jegyzet, prezentáció formájában érhető el.

A könyv és a jegyzet elég részletes, a feldolgozása során a szükséges részekre történő bontást kell elvégezni első lépésben. Ez történhet fogalmak szerint és didaktikai egységek szerint. Például ebben az esetben a tananyagból kigyűjtésre kerül egy fogalomtár és a fogalmak definíciója. A definíciós adatbázis felépítésé a megadott tananyagból és a validált internetes forrásokból történik. A definíciós adatbázisban nem csak egy definíció szerepel. És a tanítás és tesztek során nem csak az adatbázisban szó szerint megtalálható definíció az helyesen elfogadott. A választ egy kiértékelő egység vizsgálja meg. A helyesírási hibákat kijavítja és jelzi a válasz javításában. Amennyiben a helyesírás javított válasz megtalálható az adatbázisban a javításhoz nem kell

számítás igényes MI-t igénybe venni. Amennyiben nem egy MI logikailag vizsgálja meg a definíciót. Az MI eredményeit mindig el kell menteni az adatbázisba így gyarapodik a helyes és helytelen válasz adatbázis. Helytelen válasz esetén az oktató rendszer kétféle üzem módban reagálhat, vagy kijavítja a hibás választ és tovább lép, vagy rávezető kérdéseket tesz fel.

Az első üzem módban mivel így a kérdések minden tanulónál egyformák a tanuló a válasza beküldése után a javítás után kap hozzáférést a kérdést kitárgyaló fórumhoz, ez a fórum egy integrált kommunikációs csatorna hol a tanulok egymás között megbeszélhetik a kérdést, választ.



3 ábra Automata tananyag generálás és válasz javítás mesterséges intelligencia blokk vázlat (saját szerkesztés)

A másik üzemmódban is van lehetőség a közös beszélgetés indítására, ebben az esetben a dialógust elérhetővé kell tenni a többi hallgató számára.

Az első üzem módban mivel a tananyag tartalma mindenki számára egyforma lehetővé válik a A/B tesztelés alkalmazása, és ezáltal a tananyag optimalizálása, esetleg a tanuló személyiség besorolása. Ekkor a tanuló személyiség felméréséhez illeszkedő (statisztikai alapon) formában kerül a tananyag számára előadásra. Például, ha a tanulónak van hobbyja a tananyagban felhasznált példákat lehet a hobbijával összhangba hozni, ez által növelve a tanulás hatékonyságát.

Hagyományos oktatás, eLearning, eLearning 2.0, eLearning 3.0 összehasonlítás

A hagyományos oktatásban az oktatás térben és időben kötött formában történik. A tanulók esetleges iskolába utazása, intézmény fenttartás jelentős járulékos költségeket jelent. Sok esetben ez lehetetlenné teszi az oktatást. Például egy kisebb cégnél, ahol rendszeres munkaerő csere van komoly problémát okoz a fluktuáció miatti folyamatos betanítás átképzés.

Az eLearning (1.0) előnyei a hagyományos képzéshez képest:

- csökkenek a járulékos költségek;
- felgyorsul a tudás átadás;
- időben és térben független hozzáférés;
- a tananyag folyamatosan bövithető, átalakítható;
- a tanulási folyamat nyomon követhető;
- a tanulás saját ütemben folytatható;
- korai folyamatos pozitív vissza csatolás miatt növelhető a motiváció.

Az eLeraning (1.0) hátrányai a hagyományos képzéshez képest:

- az oktatás személytelenebb;
- megnehezíti a tanulók közötti interakciót;

- nincs meg a résztvevők közötti szociális kapcsolat és informális kommunikáció;
- kezdeti beruházási költsége és a tartalom kifejlesztésének költsége magasabb;
- nagy ellenállás jelentkezhet egyes vezetők, csoportok vagy egyének részéről;
- az önálló tanulás kultúráját meg kell tanulni;
- komplex gondolkodás nehezen alakítható ki (műszaki tárgyak).

Az eLearning (2.0) előnyei az eLearning (1.0) képest:

- rugalmasabb képzések;
- kapcsolat a résztvevők közötti és informális kommunikáció;
- megkönnyíti a tanulók közötti interakciót.

Az eLearning (2.0) hátrányai az eLearning (1.0) képest:

- ellenőrizetlen tananyagok.

Az eLearning (3.0) előnyei az eLearning (2.0) képest:

- személyre szabottabb oktatás;
- kezdeti beruházási költsége és a tartalom kifejlesztésének költsége alacsonyabb;
- komplex gondolkodás is kialakítható (műszaki tárgyak).

Az eLearning (3.0) hátrányai az eLearning (2.0) képest:

- a tananyag folyamatos moderálása szükséges.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az oktatás története során már többször volt komoly átalakulás. Szókratész hallgatókkal egyedileg foglalkozó dialógus alapú módszere az idők folyamán az oktatás elterjedésével vissza szorult. A magyar oktatás történeti áttekintésből is látható tendencia az egyre nagyobb csoportos tömeges személytelenebb oktatás. A mesterséges intelligencia fejlődése lehetőséget teremt ennek az oktatás módszertannak egy nagyon költséghatékony alkalmazását.

Az oktatás területén komoly kihívásokkal kell szembenézni a várható jövőben. Erre egy lehetséges megoldás az MI bevonása a számítógéppel támogatott oktatásba (eLearning). A jelenlegi tapasztalatok szerint az eLearning szignifikáns eredményeket ér el a társadalomtudományok és az adatokra épülő tananyagok területén. A komplex gondolkozást igénylő tananyagok területén már nem ennyire tekinthető jól felhasználhatónak. Amennyiben a eLearning-ra fordított erőforrásokat átcsoportosítjuk és az automatizálható folyamatokat MI-ra bízzuk a felszabadult erőforrások a folyamatos tananyag moderálásra és a tanulókkal való dialógusokra fordítható.

Az eLearning 3.0 tesztelését és kipróbálását programozás oktatásán tervezzük. A keret rendszer alapjaiban kezd össze állni. Várhatóan egy éven belül elegendő mérési adat fog rendelkezésre állni, hogy ki tudjuk értékelni merre kell továbblépni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Oktatáskutató és Fejlesztő Intézet: Oktatási modszerek (e-doc), url: http://ofi.hu/tudastar/problemak-kerdesek/oktatasi-modszerek
[2] Dr. Antal péter, dr. Forgó sándor: A pedagógus mesterség IKT alapjai (edoc), url: http://okt.ektf.hu/data/forgos/file/tananyag/forgo/732_mi_az_elearning.html
[3] Wikipedia: E-learning (e-doc), url: https://hu.wikipedia.org/wiki/E-learning
[4] Pannonhalmi Főapátság: Iskola (e-doc), url: https://bences.hu/cikk/iskola.html
[5] Ballér Endre, Golnhofer Erzsébet, Falus Iván, Kotschy Beáta, M. Nádasi Mária, Nahalka István, Petriné Feyér Judit, Réthy Endréné, Szivák Judit, Vámos Ágnes: Didaktika, (e-doc), url: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/2011_0001_519_42498_2/ch12s03.html
[6] Mészáros István: Mióta van Iskola? 1982
[7] Ábel Jenő: Egyetemek a középkorban 1881
[8] Heltai Gáspár: Krónika az magyaroknak dolgairól 1981
[9] Szalatnai Rezső: Comenius szülőföldjén 1971
[10] Vasvármegyei Tanügy 1897
[11] Szalatnai Rezső: Comenius Szeges János
[12] Révai Nagylexikon: Comenius
[13] Katona Béla: Negyvenkét esztendő
[14] Verédy Károly: Népiskoláink fölszerelése és a tanszermúzeumok 1882
[15] Dr. David Roberts: Life after Death by PowerPoint (e-doc), url: https://inspiringsocsci.pressbooks.com/chapter/life-after-death-by-powerpoint/
[16] Mousavi, S. Y., Low, R., & Sweller, J., "Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes," Journal of educational psychology
[17] Gerven, P. W., Paas, F., Merriënboer, J. J., Hendriks, M., & Schmidt, H. G., "The efficiency of multimedia learning into old age," British Journal of Educational Psychology,
[18] 1868. évi XXXVIII. törvénycikk Szentesítve: 1868. XII. 5. Kihirdetve: a képviselőházban 1868. XII. 5., a főrendek házában 1868. XII. 6. (e-doc), url: https://net.jogtar.hu/getpdf?docid=86800038.TV&targetdate=&printTitle=1868.+%C3%A9vi+XXXVIII.+t%C3%B6rv%C3%A9nycikk&referer=1000ev

APPLICATION OF AI IN EDUCATION

In the history of education, it has to be transformed several times or because of new challenges or because new technological opportunities have become available. At present, through the development of science, society is undergoing a major transformation. Currently, this process is just starting. The next generations, however, are faced with completely different social problems. Professional fields are disappearing, robotization will take over a significant among of work. The complexity of human work will be increasing. Those work that requires creativity will be needed mostly. This fact brings new challenges for education. At the same time, the underlying causes of significant technologies open up new opportunities in the field of education, as well. The technology that most transforming society in the near future is AI (artificial intelligence) and robotics. In this paper we discuss the relationship between AI and education and focuse on the development of education.

Keywords: *eLearning, AI, education*

Ady László hallgató Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet ady.laszlo@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-6702-6000	László Ady Student Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation ady.laszlo@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-6702-6000
Terpecz Gábor mérnöktanár Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet terpecz.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837	Gábor Terpecz Engineer Teacher Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation terpecz.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-08-0452_Ady_Laszlo-Terpecz_Gabor.pdf

Várkonyi Anikó, Kardos Péter

FELHŐALAP ÉS FELHŐBORÍTOTTSÁG RÖVID TÁVÚ ELŐREJELZÉSE NEURÁLIS HÁLÓZAT SEGÍTSÉGÉVEL

A numerikus előrejelzési modellek közvetlenül nem nyújtanak felhőzetre vonatkozó információkat, így ezeket kizárólag az utófeldolgozás során lehet – közvetett módon – előállítani. Ezek beválása azonban nem megfelelő, így az előrejelzők számára komoly kihívást jelent a felhőzet megfelelő pontosságú előrejelzése. Kutatásunk azt vizsgálja, hogy a felhőzet rövid távú előrejelzése vajon javítható-e modell kimeneti statisztikára épülő neurális hálózatokkal. Vizsgálatunk során a WRF modell háromévnyi operatív adatsorát vettük alapul. A neurális hálózatok által nyújtott teljesítmény nagy mértékben függ attól, hogy hogyan építjük fel a hálózatot. Különféle topológiával, aktivációs függvénnyel konstruált, más-más tanulási algoritmussal betanított neurális hálózatok közül a legjobban teljesítő hálózat kiválasztása vizsgálatunk legfontosabb feladata. A legjobban teljesítő neurális hálózatok eredményeit hasonlítottuk össze régebbi felhőzetmeghatározásra alkalmazott módszerekkel.

***Kulcsszavak**: neurális hálózatok, rövid távú előrejelzés, felhőalap magasság, repülésmeteorológia*

A FELHŐALAP MAGASSÁGÁNAK MEGHATÁROZÁSA ÉS ELŐREJELZÉSE

A légiközlekedés számára az időjárás sokkal nagyobb befolyásoló tényező, mint a többi közlekedési ágazat számára. A köd, alacsony szintű felhőzet és intenzív csapadék megváltoztathatja a repülőgép működésének szabályszerűségeit, és így akár a leszállás veszélyessé is válhat [1]. A felhőzet pontos ismerete nagyon fontos a pilóták számára, hiszen a leszállás során az alacsonyszintű felhőzet korlátozza a földi tereptárgyak láthatóságát, ezen kívül további veszélyt jelent, hogy néhány felhőfajtában jegesedés vagy turbulencia léphet fel [2]. A légiközlekedés szempontjából főként az 500 m alatti, 4 oktánál nagyobb borítottságú felhőzet jelent repülésbiztonsági kockázatot. Ilyenkor a pilóta a leszállás előtt röviddel látja csak meg a futópályát, így sokkal kevesebb ideje marad korrigálni, mint egy magasabb szintű felhőzet esetén. A fel- és leszállás során tehát a felhőzet az egyik kulcsfontosságú információ, ezért repülőtereken kiemelt fontosságú a felhőalap és a felhőborítottság pontos mérése és előrejelzése. A repülőtereken a felhőzettel kapcsolatos pontos adatokat felhőalap mérők, valamint repülésmeteorológiai észlelők biztosítják.

Számos tanulmány foglalkozik a szakirodalomban a felhőzet mennyiségének, illetve a felhőzet alapjának és a tetejének a meghatározásával. Rádiószondás [3] és műholdas adatokból [4][5] is egyaránt határozták már a meg a felhőzet szintjének a magasságát. A műholdas adatokból származtatott felhőalap magasság becslés kifejezetten fontos, mivel a ceilométerek, radarok és lidarok mérései elég költségesek, illetve nagy területek lefedetlenek föld felszínén [5].

A meteorológusok számára a felhőalap és a látástávolság előrejelzése egyaránt komoly nehézségekbe ütközik, hiszen ezeket a paramétereket gyakran mikro-, illetve mezoskálájú folyamatok befolyásolják, amíg a meglévő megfigyelési és előrejelzési rendszer főként szinoptikus skálájú folyamatok vizsgálatát teszi lehetővé [6]. További nehezítő tényező, hogy felhőzetre

vonatkozó információ egy olyan időjárási változó, amely nem áll elő numerikus előrejelzési modellek közvetlen outputjaként, csupán utófeldolgozás során lehet előállítani.

A felhőalap magasságának rövid távú előrejelzését többféle statisztikai módszerrel is megkísérelték már. A rövid távú előrejelzések szempontjából kulcsfontosságú az előrejelzés előtti utolsó időlépcsőből származó adatok felhasználása, tehát a légkör aktuális állapotának ismerete [7]. Ez különösen igaz a látástávolság és az alacsonyszintű felhőzet előrejelzésénél, mert ezek rövid idő alatt is igencsak gyorsan képesek megváltozni. A modell alapú statisztika (MOS) esetén is fontos az utolsó időlépcsőből származó állapothatározó értékek ismerete, mert így látható, hogy a modell outputjai és a tényleges felhőalap és a látástávolság között milyen a kapcsolat.

Az első modell alapú statisztikák egyike *Bocchieri & Glahn* (1972) munkája [6], amelyben megkísérelték a felhőalap előrejelzését. A módszer a lényege, hogy az előrejelző modell outputjai és az előrejelzendő állapothatározó közötti statisztikai kapcsolatot tárja fel, és a regresszió előtt megszűri a használható változókat statisztikai összefüggés segítségével. Kategorikus és számszerű előrejelzéssel egyaránt foglalkoztak. A tanulmányban regressziós becslést adtak a felhőalap magasságára és a látástávolságra.

Egy másik módszer az ún. analógiás előrejelző rendszer, amely a jelen helyzet értékeire múltbeli hasonlóságokat keres egy klimatológiai adatbázisból, és az alapján próbál következtetni a látástávolság és a felhőalap jövőbeli alakulására [8].

Több kutatás során is megkísérelték már a neurális hálózattal történő felhőalap magasság előrejelzést. Az Egyesült Államok parti részein például a nyári hónapokban kialakuló stratus felhőzet magasságának és a horizontális látástávolságban történő romlásának mértékének előrejelzésére használták ezt a nemlineáris statisztikai modellt [9]. Az előző témához hasonló kutatást végeztek a San Francisco-i Nemzetközi Repülőtéren is [10]. Az éjszaka képződő stratiform felhőzet feloszlásának pontos idejét határozták meg neurális hálózat segítségével.

NEURÁLIS HÁLÓZATOK

A neurális hálózat egy olyan számítási mechanizmus, amely a biológiai idegrendszer felépítésének és működésének analógiájára lett kialakítva [11]. A biológiai idegrendszer fő tulajdonsága, hogy kicsiny alapegységekből van felépítve, és az egységek között sok a kapcsolat. Ezen kívül még fontos a tanulás képessége is. A mesterséges neurális hálózatok is rendelkeznek ezekkel a főbb tulajdonságokkal.

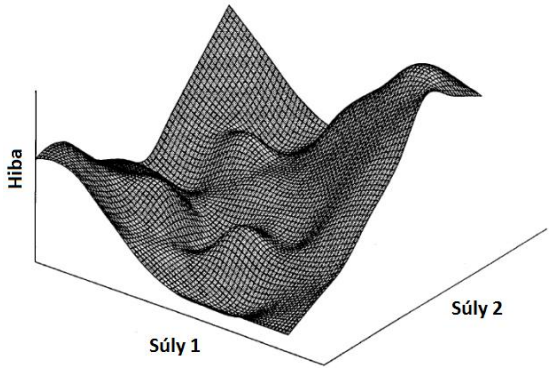
A neurális hálózatok lényege, hogy nem a jelenséget próbálják meg modellezni, hanem kizárólag a bemenő és a kimenő adatokat tekintik. Ez nagyon előnyös is lehet, hiszen adott esetben a jelenség megértésére nincs szükség, a működéshez elegendő csupán megfelelő mennyiségű adat.

A neurális hálózatok alkalmazása igen széles körben elterjedt. Felhasználási területe kiterjed az olyan közvetlen meteorológiai paraméterek, mint például a hőmérséklet [12], napi csapadék [13] vagy a felhőzet és látástávolság [9] meghatározásától, a légszennyezettségen [14] át, a megújuló energiákon alapuló energiatermelés [15] előrejelzéséig.

A neurális hálózat elsődleges jelentőséggel bíró tulajdonsága, hogy környezetéből képes tanulni, és a tanulási folyamaton keresztül javítható a teljesítménye. A tanulás folyamata során

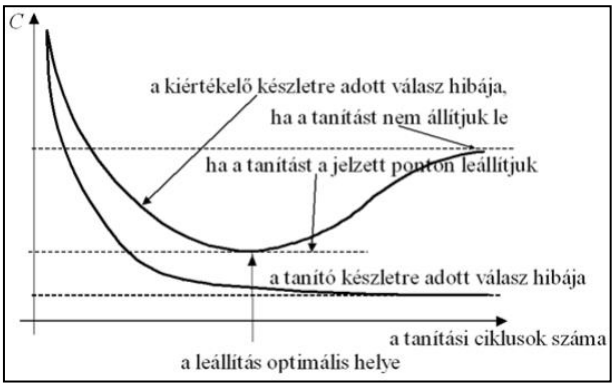
az egyes neuronokhoz tartozó súlyok kalibrációja történik úgy, hogy a hálózat a legjobb teljesítményre legyen képes. Ideális esetben a neurális hálózatnak a tanulási folyamat minden egyes ismétlése után jobbnak kell lennie [16].

A hálózat tanítása során első lépésként megadunk kezdeti súlyokat, majd az outputot végigáramoltatjuk a hálózaton a súlyok megváltoztatása nélkül. Az így kapott outputot összevetjük a tényleges kimeneti értékkel, és hibát végigáramoltatjuk a hálózaton, majd a súlyokat megváltoztatjuk úgy, hogy ennek a hibának az értéke a legkisebb legyen, tehát egy többdimenziós hibafüggvény minimumát keressük (1. ábra). Ezt a lépéssorozatot hiba visszaáramoltatási módszernek (back-propagation algorithm) nevezik.



1. ábra A neurális hálózat két súlyához tartozó hibafelület [17]

A tanulási folyamat során figyelni kell a túltanulás elkerülésére (2. ábra). A túltanulás azt jelenti, hogy a neurális hálózat túlzottan illeszkedik a tanító pontokhoz, ami rontja a hálózat általánosító-képességét. Ez főként akkor következhet be, ha a hálózat szabadságfoka a tanító pontokhoz képest túl nagy [18].



2. ábra A tanulás során a négyzetes hibákat ábrázoló görbék [18]

VERIFIKÁCIÓS INDEXEK

Az eredmények értékeléséhez a különböző kategóriákra verifikációs indexeket használtunk, amelyeket az ún. kontingencia táblázat segítségével lehet kiszámítani (3. ábra). Ebben a táblázatban négyféle variáció létezik: a referencia kategória (METAR, felhőalap mérős adatsor) egybeesik neurális hálózat által számított kategóriával (a: helyes találat), a referencia kategória más kategóriába esik, míg a neurális hálózattal számított érték megegyezik a vizsgált kategóriával (b: hibás riasztás, c: téves elvetés), és az utolsó variáció, az egyik szerint sem esett a vizsgált kategóriába (d: helyes elvetés).

		METAR/ felhőalap mérő adatai		
	Felhőzet kategória egyezik	igen	nem	
Neurális hálózat	igen	a	b	
	nem	c	d	
				$n=a+b+c+d$

3. ábra A vizsgálatban alkalmazott kontingencia táblázat

A tanulmány során az alábbi verifikációs indexeket használtuk fel [19][20]:

1. a POD (Probability Of Detection) index megmutatja, hogy a bekövetkezett események közül milyen arányban volt helyes az előrejelzés. Értéke 0 és 1 közötti lehet, az ideális értéke 1;

$$POD=a/(a+c) \quad (1)$$

2. a FAR (False Alarm Ratio) index arról az arányról tájékoztat, hogy az előrejelzett események milyen aránya volt téves (túlbiztosított). Értéke 0 és 1 között változhat, az ideális értéke a 0. A POD és a FAR indexet együtt kell vizsgálni;

$$FAR= b/(a+b) \quad (2)$$

3. az ETS (Equitable Threat Score) a TS index klimatológiai érzékenységét hivatott javítani egy random gyakoriság (*ar*) megadásával. Ezt a random értéket úgy adják meg, hogy feltételezik, az előrejelzések teljesen függetlenek a megfigyeléstől és az előrejelzés csak véletlenül fogja visszaadni a megfigyelést. Az ETS index értéke –1/3-tól 1-ig változik, ideális értéke 1;

$$ETS=(a-ar)/(a+b+c-ar) \quad (3)$$

$$ar=(a+b)(a+c)/n \quad (4)$$

4. a HSS (Heidke Skill Score) index az egyik leggyakrabban használt mutató ahhoz, hogy összefoglaljuk egyben a 2x2-es kontingencia táblázatot. A HSS megadja a helyes előrejelzések arányát, miután korrigálták azt a random helyes találatokkal. Nagyon érzékeny a túlbiztosított (b) és az alulbiztosított (c) prognózisok arányára. Értéke mínusz végtelentől 1-ig változik, a megfelelő értéke az 1.

$$HSS=2(ad-bc)/\{(a+c)(c+d)+(a+b)(b+d)\} \quad (5)$$

FELHASZNÁLT ADATOK ÉS MÓDSZEREK

Jelen kutatás során modell alapú statisztikai eljárást alkalmaztunk. A GFS globális modell adatai alapján inicializált WRF numerikus modell 2013-as, 2014-es és 2015-ös adatsora szolgált adatforrásként. Ezek utófeldolgozás-mentes, natív változói a modellnek. Napi két inicializációval indult modell adatait használtuk, minden időpontra 2 modellfutási adat állt rendelkezésre. Egy 00 és egy 12 UTS-s futás, órás időlépcsőben, minden futás esetén 96 óráig álltak rendelkezésre adatok. A WRF modell felfutási idejét figyelembe véve egy adott futás 4. és 28. időlépcső közti időszakát használtuk fel. A felhasznált három éves adatsor alatt a WRF konfigurációs beállításai nem változtak. Ez azért fontos információ számunkra, mert a neurális hálózat ilyen modellbeállítások mellett tanult, így változtatások esetén a neurális hálózat újratanítására lenne szükség.

A modell adatok közül felszíni és különböző modellszintbeli változókat egyaránt felhasználtunk a neurális hálózat tanuló adatsorának elkészítéséhez, majd a hálózat teszteléséhez. A felszíni változók közül 10 m-es szélsebesség u és v komponense, 2 m-es hőmérséklet, keverési

arány és felszíni légnyomás álltak rendelkezésre. Vertikálisan a 250 m-es és az 500 m-es szint adatait használtuk fel, hiszen ezek esnek az általunk vizsgált tartományba. Mindkét szinten a keverési arányt, szélsebesség u és v komponenst és hőmérsékletet használtuk fel.

A valós felhőzetről az információ két adatforrásból származott. Első esetben a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren a 13R pályaküszöbnél üzemelő felhőalapmérő nyers adatait használtuk fel. Ebben az esetben a felhőborítottságról nem, csupán a felhőzet alapjának a magasságáról kapunk információt.

Második esetben a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren dolgozó észlelők közreműködésével szolgáltatott METAR táviratban található felhőzetinformáció volt az adatforrás. Ez esetben a kategorizálás során a felhőzet borítottságát is figyelembe tudtuk venni, hiszem a táviratban a felhőalap magasság mellett a felhőzet mennyiségét is megadják. A METAR táviratban több szintre is találunk a felhőzetről információt, ilyen esetben mi a repülés szempontjából fontosabb információt vettük figyelembe, tehát az 5 okta feletti és az 1500 láb alatti felhőzetet, ha előfordult ilyen.

A felhőzet adatokat három kategóriába soroltuk az alábbi kritériumok szerint:

- 1-es kategória (1500 láb feletti felhőalap, METAR referencia adatok esetén 4 okta alatt);
- 2-es kategória (1500 és 900 láb közötti felhőalap, METAR referencia adatok esetén 5 okta felett);
- 3-as kategória (800 láb alatti felhőalap, METAR referencia adatok esetén 5 okta felett).

Első lépésként a tanulóadatsort építettük fel. Az input adatok a nap és az óra szinuszfüggvénnyel átalakított értékei, illetve a WRF modell outputjai (vertikálisan két szintre keverési arány, szél és hőmérséklet, illetve felszíni adatok) voltak. A tanulóadatsor kimenő adatai pedig a METAR, illetve a felhőalap mérő által mért értékek három kategóriába besorolva. A METAR és a felhőalap mérős adatsorra is külön-külön adatsor készült, hiszen a hiányzó adatok eltérőek voltak mindkét esetben. Az outputokat binomiális klasszifikációval is átalakítottuk a METAR-os adatsor esetén.

Ezután a hálózat megkonstruálása és betanítása következett. A tanulási algoritmusok és az aktivációs függvények különböző kombinálásával kellett a legjobban teljesítő, konvergens hibaértéket adó konstrukciókat kiválasztani. A két bevált tanulási algoritmus az RPROP és a QUICKPROP voltak, míg az aktivációs függvények közül a szimmetrikus Gauss és a szimmetrikus szigmoid függvények bizonyultak a legjobbnak. Az ezek segítségével konstruált hálózatok a következőek voltak:

- 1_Gauss_szimm_QUICKPROP/ 1_szigmoid_szimm_RPROP: Olyan hálózatok, amelyeknek tanulóadatsorában a felhőalap mérő adatai szerepeltek;
- 2_Gauss_szimm_QUICKPROP/ 2_szigmoid_szimm_RPROP: Olyan hálózatok, amelyeknek tanulóadatsorában a METAR-os adatok szerepeltek;
- 3_Gauss_szimm_RPROP/ 3_szigmoid_szimm_QUICPROP: Olyan hálózatok, amelyeknek tanulóadatsorában a METAR-os adatok szerepeltek binomiális klasszifikációval átalakítva;
- 4_szigmoid_szimm_RPROP: Olyan hálózat, amelynek tanulóadatsorában a 2-es és a 3-as kategória összevonásra került, tehát két kategóriát tanult hálózat.

A hálózat nevében az első számjegy a hálózat számát jelöli, amely az outputok alapján lett elkülönítve, a második és a harmadik tag jelöli az alkalmazott aktivációs függvényt, a negyedik tag pedig a tanulás során használt algoritmusról nyújt információt.

A hálózatok betanulását követően a vizsgálat a teszteléssel folytatódott. Jelen kutatás során két különböző időszakra teszteltük mind a 7 különböző neurális hálózatot. Két olyan időszak kiválasztása volt a cél, amelyek során a felhőzet általánosságban eltérően szokott alakulni. Az első időszak egy január elsejétől február végéig, a második időszak egy augusztus elsejétől november elejéig tartó tesztidőszak volt.

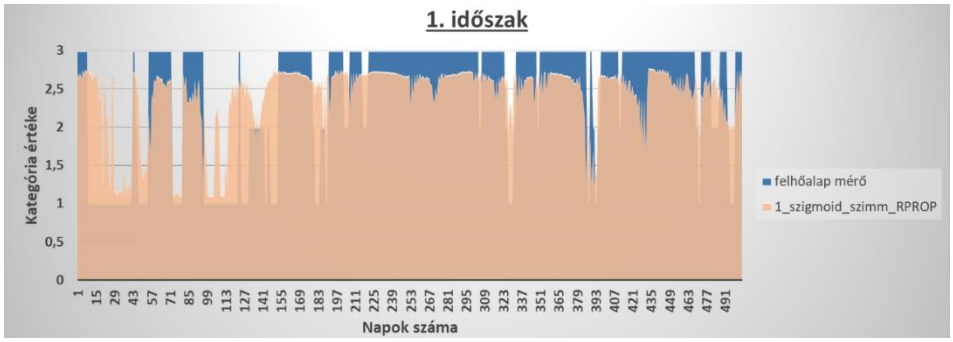
A kapott értékeket a 3. fejezetben említett verifikációs indexek segítségével értékeltük ki. Az így kapott eredményeket a szakirodalomban fellelhető felhőzetbecslési módszerek által nyújtott adatok, illetve a részecskemódszerrel kiszámított felhőalap magasságokra kapott verifikációs indexek értékeihez hasonlítottuk.

Elsőként a harmatpont és a hőmérséklet különbségét alapul vevő képletet számítottuk ki, amely a hőmérséklet függvényében írja le a felhőképződéshez szükséges harmatpont deficitet [21]. Ennek az összefüggésnek egy közelítését is használtuk, amely a harmatpont deficit helyett a relatív nedvességet használja fel a felhőzet meghatározásához. Egy másik összefüggést is alkalmaztunk a felhőalap magasságának meghatározására, amely nem a hőmérséklet alapján ír le kritériumot a felhőzet megjelenésére, hanem a levegő nyomása alapján.

Ezen kívül a neurális hálózat eredményeit még a részecske módszer segítségével számított felhőalapokkal is összevetettük. A módszer lényege, hogy azt feltételezzük, hogy a felszínről induló részecske száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens mentén mozog mindaddig, amíg nincs kondenzáció, tehát telítetlen a levegő [22]. Mivel a levegő a felfelé emelkedés közben hűl, ezért a relatív nedvessége növekszik, majd amikor eléri a telítettség állapotát, akkor megindul a gőz cseppfolyós állapotba való átmenete. Ezt a szintet, ahol ez az átmenet bekövetkezik, emelési kondenzációs szintnek nevezzük, és itt jelenik meg a felhőzet.

EREDMÉNYEK

Az első időszak (téli) vizsgálatához a felhőalap mérő adatait, és az 1_szigmoid_szimm_RPROP hálózat (4. ábra) kalkulált értékeit használtuk fel. Az ábrán szemléletesen látható a hálózat jó teljesítménye különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a feladata csupán a kategória előrejelzése volt, azaz annak meghatározása, hogy a 0–1, 1–2, vagy a 2–3 tartományba esik a felhőzet magassága.

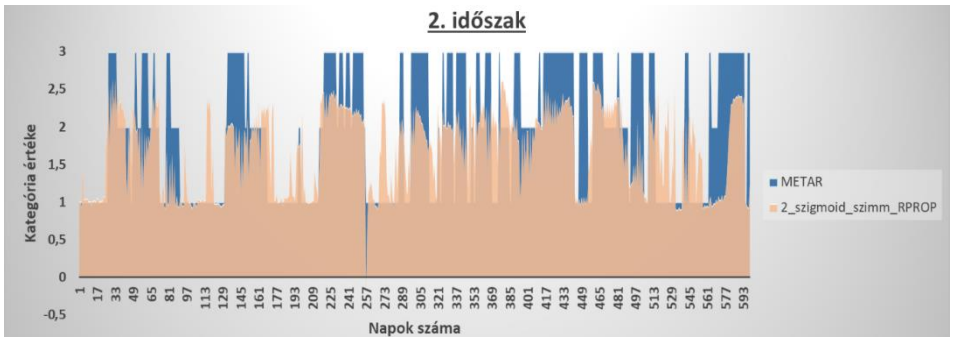


4. ábra Az 1_szigmoid_szimm_RPROP hálózat által számított értékek összehasonlítása a felhőalap mérő által mért értékekkel az 1. időszakra

A következő diagramon a második időszakra (nyári végi-őszi) figyelhetjük meg a 2_szigmoid_szimm_RPROP hálózat (5. ábra) eredményeit a METAR-ban található

felhőzetinformáció kategorizált értékeivel összevetve. Ebben az időszakban sokkal kevesebb esetben volt 3-as kategóriába eső felhőalap magasság az első időszakhoz képest.

A diagramokon látható, hogy a neurális hálózat által szolgáltatott nyers eredmények jól követik a felhőzet időbeli alakulásának tendenciáját. Amikor a 3-as kategóriába esett a felhőalap mérő által mért érték vagy a METAR-os felhőzetinformáció, akkor a neurális hálózat által kalkulált értékek is magasabbak voltak.



5. ábra A 2_szigmoid_szimm_RPROP hálózat által számított értékek összehasonlítása a METAR-ban található felhőalap értékekkel a 2. időszakra

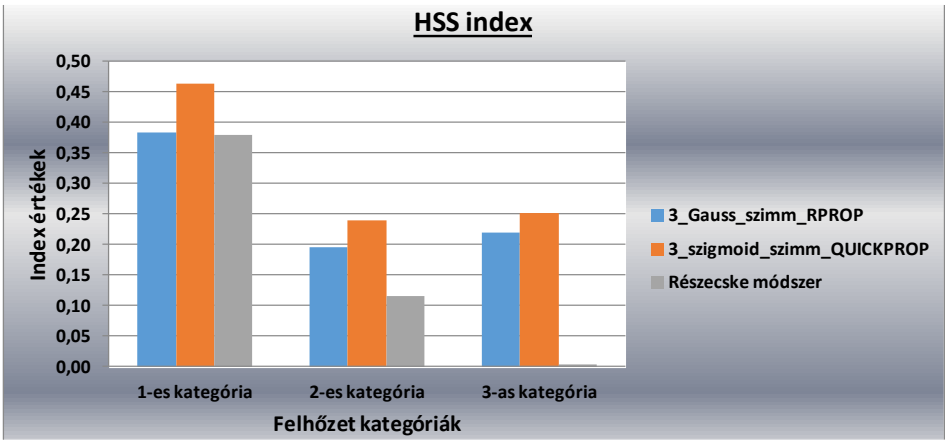
A feljebb ismertetett két hálózat verifikációs indexeit megvizsgálva az látszik, hogy a 2-es kategória elkülönítése esetén teljesített mind a két hálózat a leggyengébben. A következőben két olyan hálózat bemutatása következik, amelyek viszonylag egyenletesen teljesítettek mind a három kategória esetén. Ilyen hálózatok a 3_Gauss_szimm_RPROP és a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP. Ezek olyan neurális hálózatok, amelyek outputjai binomiális klasszifikáció segítségével át lettek alakítva, így a modellnek három outputja volt. A kategorizálás ebben az esetben úgy történt, hogy a maximális érték kiválasztása a három output közül döntött a felhőzet kategóriáról. A második időszakra vonatkozó verifikációs indexeket szemlélve (6. ábra) látható, hogy 3_Gauss_szigmoid_QUICKPROP hálózat eredményei jobbnak bizonyultak erre az időszakra. Itt az 1-es kategória esetén 0,45 feletti, még a 2-es és a 3-as kategória esetén 0,24–0,25 körüli HSS index értékek jöttek ki.

	2. időszakra számított indexek értékei		
	3_Gauss_szimm_RPROP a maximum értékeket véve		
	1-es kategória	2-es kategória	3-as kategória
HSS	0,38	0,20	0,22
POD	0,94	0,27	0,31
FAR	0,45	0,56	0,37
ETS	0,24	0,11	0,12
	3_szigmoid_szimm_QUICKPROP a maximum értékeket véve		
	1-es kategória	2-es kategória	3-as kategória
HSS	0,46	0,24	0,25
POD	0,89	0,38	0,36
FAR	0,39	0,58	0,37
ETS	0,30	0,14	0,14

6. ábra A 3_Gauss_szimm_RPROP és a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózatok eredményeire számított verifikációs indexek értékei az 2. időszakra

Ezen hálózatok esetén már egyértelműen látszik a verifikációs indexek vizsgálatánál, hogy a neurális hálózat mind a három kategória esetén sokkal pontosabb előrejelzést szolgáltatott az előző fejezetben ismertetett négy összehasonlításra használt módszer bármelyikénél. Ezek közül a legjobban a részecske módszer teljesített (7. ábra), amelynek a második időszak során az 1-es kategóriára kalkulált HSS index értéke megegyezik a 3_Gauss_szimm_RPROP hálózat eredményeire számított

HSS indexével, azonban a másik két kategória esetén alacsonyabbak a HSS index értékei. A repülés szempontjából legfontosabb legalacsonyabb szintű felhőzet esetén (3-as kategória) kifejezetten alacsony, 0 körüli a részecske módszer eredményeire számított HSS index értéke.



7. ábra A 3_Gauss_szimm_RPROP, 3_szgmoid_szimm_QUICKPROP és a részecske módszer eredményeire számított HSS index értékei a 2. időszakra

Az eddigi esetekben a neurális hálózatok számára a legnagyobb problémát a 2-es és a 3-as kategória elkülönítése jelentette. A továbbiakban ezt a két kategóriát összevontan kezeljük, mert így a légiközlekedési szempontból kritikus 1500 láb alatti felhőzetről tudunk információt szolgáltatni. A következőkben áttekintjük, hogy ebben a feladatban melyik hálózatok teljesítettek a legjobban.

Az első időszak vizsgálata során a 3_Gauss_szimm_RPROP esetén kifejezetten magas HSS index értékek láthatóak (8. ábra), mind a két kategória esetén a 0,6 körüli. Ennél a hálózatnál mind a négy vizsgált index értéke kiemelkedően jó. A repülés szempontjából meghatározóbb 2-es kategória esetén 0,95 körüli a POD index, 0,1 alatti a FAR index, és 0,42-es az ETS index értéke a téli időszakra nézve.

A 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózat csak kicsivel teljesített rosszabbul, mint az előbb említett 3_Gauss_szimm_RPROP, a HSS és a POD index esetén egy tizedes eltérés, a FAR és a ETS index esetén csupán pár százados a különbség. A HSS index értékei mind a két kategóriára 0,5 körüliek voltak. Itt is a 2-es kategória esetén optimálisabbak a vizsgált indexek értékei.

Ugyanezen hálózatokat a nyár végi-őszi időszakra is megvizsgáltuk. Ebben az időszakban a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózat (9. ábra) verifikációs indexeinek értékei jobbnak bizonyultak, mint a téli időszakban kiemelkedően jól teljesítő 3_Gauss_szimm_RPROP hálózat index értékei. A 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózat esetén a téli és a nyári időszakban is hasonló HSS index értéket kaptunk (a téli időszakra 0,49, nyár végi-őszi időszakra 0,46), csupán 3 százados volt mind a két kategória esetén az eltérés. Tehát ez a hálózat egyenletesebben teljesített a két vizsgált időszakra, mint a 3_Gauss_szimm_RPROP hálózat, ahol több mint 2 tizedes az eltérés a két időszakra vizsgált HSS index értékek esetén (téli időszakra 0,59, nyár végi-őszi időszakra 0,38). A másik négy összehasonlító módszerrel kalkulált felhőalapra számolt indexekkel összevetve megállapítható, a neurális hálózatok jobban teljesítettek ebben az esetben is. A négy módszer közül most is a részecske módszer teljesített a legjobban. A HSS és ETS indexekre kapott értékei (10. ábra) az első időszak során körülbelül 0,1-el maradtak el a 3_Gauss_szimm_RPROP hálózatétól, a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózatéval pedig közel megegyeztek. A második időszak

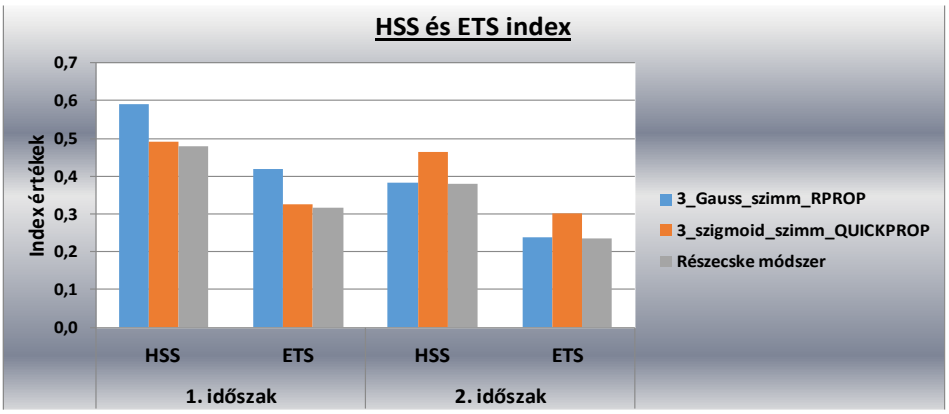
során a részecske módszer szintén 0,1-el maradt el a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózat eredményeire számított indexek értékeinél, és a 3_Gauss_szimm_RPROP hálózatéval majdnem megegyező index értékei voltak. Összességében mind a két időszak során az egyik hálózat felülmúlta az összehasonlító módszerek közül legjobban teljesítő részecske módszert, a másik hálózatra számított indexek értékei pedig majdnem megegyezőek voltak vele.

	1. időszakra számított indexek értékei			
	3_Gauss_szimm_RPROP a maximum értékeket véve		3_szigmoid_szimm_QUICKPROP a maximum értékeket véve	
	1-es kategória	2-es kategória	1-es kategória	2-es kategória
HSS	0,59	0,59	0,49	0,49
POD	0,61	0,94	0,56	0,91
FAR	0,26	0,10	0,37	0,11
ETS	0,42	0,42	0,32	0,32

8. ábra A 3_Gauss_szimm_RPROP és a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózatok eredményeire számított verifikációs indexek értékei az 1. időszakra

	2. időszakra számított indexek értékei			
	3_Gauss_szimm_RPROP a maximum értékeket véve		3_szigmoid_szimm_QUICKPROP a maximum értékeket véve	
	1-es kategória	2-es kategória	1-es kategória	2-es kategória
HSS	0,38	0,38	0,46	0,46
POD	0,94	0,49	0,89	0,61
FAR	0,45	0,08	0,39	0,11
ETS	0,24	0,24	0,30	0,30

9. ábra A 3_Gauss_szimm_RPROP és a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózatok eredményeire számított verifikációs indexek értékei az 2. időszakra

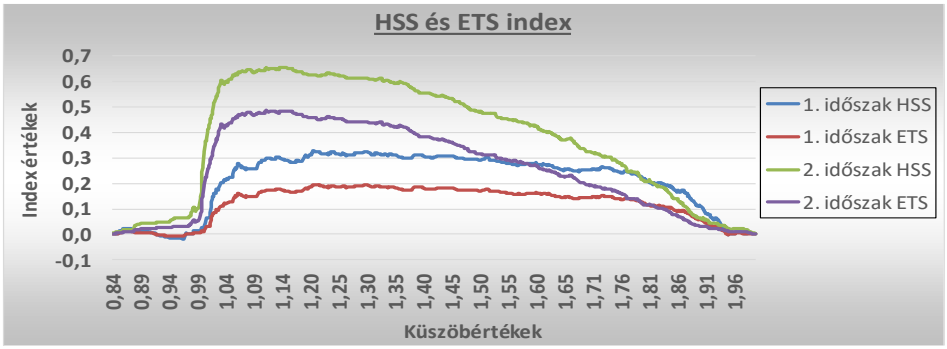


10. ábra A 3_Gauss_szimm_RPROP, 3_szgmoid_szimm_QUICKPROP és a részecske módszer eredményeire számított HSS és ETS index értékei az 1. és a 2. időszakra

A 4_szigmoid_szimm_RPROP hálózat tanulóadatsorában csak két kategória szerepelt. A verifikációs indexek kalkulálása során nem konkrét küszöbértékekre történt a számítás, hanem azt vizsgáltuk, hogy a küszöbérték megválasztásától hogyan függenek a verifikációs indexek értékei.

A küszöbértékek variálása során az ETS és a HSS indexeket vizsgáltuk (11. ábra). Látható, hogy a két index értékei hasonló tendenciát mutatnak a küszöbértékek függvényében. A maximum értéküket is ugyanannál a küszöbértéknél veszik fel. Ez az első időszakban mindkét index esetén körülbelül 1,2-nél (pontosan 1,199-nél) található. Itt a HSS index értéke 0,33 körüli, az ETS index értéke 0,2 körüli. A második időszak indexeinek vizsgálatakor szembetűnő, hogy az indexek értékeinek a küszöbértékektől való függésének tendenciája teljesen eltérően alakult az első időszakétól. Ebben az esetben az 1-es küszöbérték környékén egy nagy ugrás következik be mind a két index értékében. A HSS index 0,98-as küszöbértéknél 0,08-as értéket vett fel,

majd 3 századdal növelve a küszöbértéket, 1,01-nél már 0,4 feletti értéke volt. Ez jól érzékelteti, hogy az eredmények mennyire érzékenyek a küszöbértékek megválasztására. A második időszak során a HSS és az ETS index is a maximumát 1,116-nál vette fel. Itt a HSS index értéke 0,65 és az ETS index értéke pedig 0,48 volt. Tehát a téli időszakhoz képest a HSS és az ETS index értéke is körülbelül 0,3-el volt magasabb, ezért általánosságban elmondható, hogy ez a hálózat a nyári időszak során jobban teljesített.



11. ábra A 4_szigmoid_szimm_RPROP hálózat eredményeire számított verifikációs indexek értékei az 1. és 2. időszakra a küszöbérték megválasztásától függően

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredményekből egyértelműen látszik, hogy a neurális hálózat által szolgáltatott értékek mindig jobban közelítették a valóságot, mint a szakirodalomban fellelhető módszerek segítségével számított értékek. Miután modell alapú statisztikára építettük fel a hálózatot, ezért fontos szem előtt tartani, hogy a modell hibája is befolyásolhatta a számítások eredményeit. A neurális hálózattal történő előrejelzés egyik nagy előnye, hogy a modell szisztematikus hibáit a hálózat képes megtanulni, és így képes a nyers előrejelzésen javítani. A legtöbb általunk vizsgált hálózat egészen megbízható információt adott a felhőzetre vonatkozóan, továbbá a diagramokon látható volt, hogy a neurális hálózat képes lekövetni a felhőzet időbeli változásait is. A 2-es és 3-as kategóriájú felhőzet esetén a hálózat által számított értékek is átlagosan magasabb voltak, mint az 1-es kategóriájú felhőzet esetén.

A különböző topológiával rendelkező, eltérő tanulási algoritmust és aktivációs függvényt alkalmazott neurális hálózatok vizsgálatakor kiderült, hogy a két különböző vizsgált időszakban más-más hálózat teljesített a jobban, illetve rosszabbul. A három különböző kategóriára történt számítás esetén a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózat bizonyult a legjobbnak, de ez is főként csak a nyár végi-őszi időszakban adott elfogadhatóan jó eredményeket mind a három kategóriára egyaránt. Minden hálózat esetén a 2-es kategóriához tartozó verifikációs index értékek voltak a legrosszabbak, hiszen ezt nehezen tudta a hálózat elkülöníteni a 3-as kategóriától, és gyakran nagyon hasonló értékeket számított erre a két kategóriára.

A 2-es és a 3-as kategória összevonása szinte az összes hálózat esetén javulást hozott a verifikációs indexek értékeiben. A legjobban teljesítő hálózatnak ebben az esetben 3_Gauss_szimm_RPROP hálózat bizonyult, amelynek a téli időszak vizsgálata során az eredményeire számított HSS index 0,6 körüli értéket vett fel mind a két kategória esetén. Említésre méltó még a 3_szigmoid_szimm_QUICKPROP hálózat is, amely mind a két időszak esetén viszonylag jól és egyenletesen teljesített.

4_szigmoid_szimm_RPROP hálózat értékeire számított verifikációs indexek értékeinek a küszöbértékektől való függésének vizsgálatakor szembetűnő volt, hogy a téli és a nyári időszak során eltérő tendenciát mutattak a verifikációs indexek értékei. Máshol vették fel a maximumot, illetve amíg a téli időszak során egy viszonylag egyenletesen felfutó majd lecsengő görbét kaptunk, addig a nyári időszakban ugyanez a görbe egy hirtelen felfutást, majd egyenletes leívelést mutatott. Ebből látszik, hogy érdemes nem egy fix küszöbérték megválasztása az egész év során, hanem mindig egy évszaktól függő küszöbérték kiválasztása.

A további terveink közt szerepel még a cikkben szereplő hálózatkonstrukciók előrecsatolt változatainak a vizsgálata és eredményeik értékelése.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Gaumet, J.L., Heinrich, J.C., Cluzeau, M., Pierrard, P., Prieur, J., 1997: Cloud-Base Height Measurements with a Single-Pulse Erbium-Glass Laser Ceilometer, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 15, 37-45.

[2] Sándor, V., és Wantuch, F., 2005: Repülésmeteorológia, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 272 p.

[3] Chernykh, I.V., Eskridge, R.E., 1996: Notes and correspondence, Determination of Cloud Amount and Level from Radiosonde Soundings, Journal of Applied Meteorology, Vol. 35, 1362-1369.

[4] Hanel, R.A., 1961: Determination of Cloud Altitude from a Satellite, Journal of Geophysical Research, Vol. 66, No. 4, 1300.

[5] Kassianov, E., Long, C.N., Christy, J., 2005: Cloud-Base_Height Estimation from Paired Ground-Based Hemispherical Observations, Journal of Applied Meteorology, Vol. 44, 1221-1233.

[6] Bocchieri, J.R., Glahn, H.R., 1972: Use of Model Output Statistics for Predicting Ceiling Height, Monthly Weather Review, Vol. 100, No. 12, 869-881.

[7] Vislocky, R.L., Fritsch, J.M., 1997: An Automated, Observations-Based System for Short-Term Prediction of Ceiling and Visibility, Weather and Forecasting, Vol. 12, 31-43.

[8] Hansen, B., 2007: A Fuzzy Logic-Based Analog Forecasting System for Ceiling and Visibility, Weather and Forecasting, Vol. 22, 1319-1330.

[9] Marzban, C., Leyton, S., Colman, B., 2006: Ceiling and Visibility Forecasts via Neural Networks, Weather and Forecasting, Vol. 22, 466-479.

[10] Dean, A.R., Fiedler, B.H., 2001: Forecasting Warm-Season Burnoff of Low Clouds at the San Francisco International Airport Using Linear Regression and a Neural Network, Journal of Applied Meteorology, Vol. 41, 629-639.

[11] Fazekas, I., 2013: Neurális hálózatok, Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, Debrecen, 204 p.

[12] Hayati, M., Mohebi, Z., 2007: Application of Artificial Neural Networks for Temperature Forecasting, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol:1, No:4, 662-666.

[13] Hall, T., Brooks, H.E., Doswell III, C.A., 1999: Precipitation Forecasting Using a Neural Network, Weather and Forecasting, Vol. 14., 338-345.

[14] Fernando, H.J.S., Mammarella, M.C., Grandoni, G., Fedele, R., Di Marco, R., Dimitrova, R., Hyde, P., 2012: Forecasting PM10 in metropolitan areas: Efficacy of neural networks, Environmental Pollution, 163 (2012), 62-67.

[15] Filik, Ü.B., Filik, T., 2016: Wind Speed Prediction Using Artificial Neural Networks Based on Multiple Local Measurments in Eskisehir, 3rd International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2016, 7-11 September 2016, Barcelona, Spain, Energy Procedia, 107 (2017), 264-269.

[16] Haykin, S., 1995: Neural networks, A comprehensive foundation, 2nd Edition, Pearson Education, Delhi, 823 p.

[17] Gardner, M., és Dorling, S., 1998: Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—a review of applications in the atmospheric sciences, Atmospheric Environment, 32, 2627–2636.

[18] Altrichter, M., Horváth, G., Pataki, B., Strausz, Gy., Takács, G., Valyon, J., 2006: Neurális hálózatok, Hungarian Edition Panem Könyvkiadó Kft., Budapest, 433 p.

[19] Ebert, E.E., McBride, J.L., 1997: Methods for verifying quantitative precipitation forecast: application to the BMRC LAPS model 24–hour precipitation forecast. BMRC Techniques development report No. 2., Melbourne, Australia, 87 p.

[20] Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF Technical Memorandum, 430, 18 p.

[21] Costa-Surós, M., Calbó, J.,González, J.A., Long, C.N.,2014:Comparing the cloud vertical structure derived from several methods based on radiosonde profiles and ground-based remote sensing measurement, Atmospheric Measurement Techniques, 7, 2757-2773.
[22] Götz, G., Rákóczi, F., 1988: A dinamikus meteorológiai alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest, 484 p.

SHORT TERM FORECASTING OF CLOUD CEILING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Numerical weather prediction systems does not provide cloud information directly, these information can be assessed during post processing only in an indirect manner. However accuracy of these forecasts is not sufficient for operational usage, therefore appropriate prediction of cloud ceiling is a real challenge for the forecasters. Our research focuses on whether short term forecasts of cloud ceiling could be improved using model outputs statistic based artificial neural network method. Our research based on three years of WRF numerical model output which was initiated by GFS forecast as initial boundary and lateral condition. The performance of artificial neural network highly depends on network configuration, therefore choosing the appropriate topology, transfer function and the right learning algorithm is a crucial element. The results of the best artificial neural network configurations have been compared to some old cloud assessments methods.

Keywords: *cloud ceiling, short term forecasting, neural networks, aviation meteorology*

Várkonyi Anikó (MSc) Hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Meteorológiai Tanszék kisaaa93@gmail.com orcid.org/0000-0003-4319-2375	Várkonyi Anikó (MSc) Student Eötvös Loránd University Faculty of Science Department of Meteorology kisaaa93@gmail.com orcid.org/0000-0003-4319-2375
Kardos Péter Csoportvezető HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. Repülésmeteorológiai 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/2018_1/2018-1-09-0464_Varkonyi_Aniko-Kardos_Peter.pdf

Farkas Márton, Vanek Bálint, Rózsa Szabolcs

PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP POZÍCIÓJÁNAK ÉS ORIENTÁCIÓJÁNAK MEGHATÁROZÁSA LOW-COST GNSS, INERCIÁLIS ÉS MÁGNESES SZENZOROK TIGHTLY COUPLED INTEGRÁCIÓJÁVAL

A cikkben bemutatunk egy műholdas (GNSS), inerciális (IMU) és mágneses szenzorokat integráló eljárást, melynek feladata pilóta nélküli repülőgépek (UAV) pozíciójának és orientációs Euler-szögeinek becslése. Ismertetjük a számításokhoz szükséges koordinátarendszereket és az ezekhez kapcsolódó transzformációkat és a felhasznált GNSS-es, gyorsulásmérő, szögsebességmérő és magnetométer szenzoregyenleteket. A becslést kiterjesztett Kálmán-szűrő (EKF) felhasználásával valósítjuk meg, melynek számítási lépéseit szintén bemutatjuk. A szenzorfúziós algoritmust valódi repülési teszt adatsoron offline teszteltük. Az becslés eredményeit a repülőgép fedélzeti számítógépéből származó referencia adatokkal hasonlítjuk össze.

Kulcsszavak: *UAV, GNSS, IMU, szenzorfúzió, EKF, pozícióbecslés, orientációbecslés*

BEVEZETÉS

Szenzorfúziós eljárások egyre fontosabbá válnak a kereskedelmi repülésben, különösen a kritikus repülési fázisokban, például landolási során. A navigációs rendszerek komplexitásának folyamatos növekedése mellett is biztosítani kell a megbízhatóságot és a performanciát. Ez a bonyolultság növekedésével egyre nehézkesebb, mivel az egyes szenzortípusok más-más hibajelenségeket mutatnak a különböző környezeti feltételek mellett. A VISION[1] (EU H2020 690811) projekt [1] célja a repülésbiztonság fejlesztése integrált, biztonsági szempontból továbbfejlesztett intelligens repülési szabályozó és navigációs rendszerek validálásával.

A pilóta nélküli légi járművek napjainkban egyre elterjedtebbek. Az UAV[2]-k a hadi felhasználás mellett egyre több polgári célú feladatot is képesek ellátni. Az elmúlt években, ahogy ezek a járművek egyre elérhetőbbek lettek, úgy fejlődtek olyan alkalmazási területek, mint a precíziós mezőgazdaság, a fotogrammetria, a térképészet, a földmérés, a különböző ipari folyamatok monitorozása és elemzése. Ahhoz, hogy ezen járművek megbízhatóan és biztonságosan végezhessék a különböző feladataikat, elengedhetetlen a pozícionálási rendszereik folyamatos fejlesztése. Low-cost[3] hardverek felhasználásával ezek a navigációs eszközök is alacsonyabb költségűek lehetnek. Azonban a low-cost MEMS[4] alapú szenzorok pontossága elmarad a taktikai minőségű érzékelőkéhez képest. A gyorsulásmérő és szögsebességmérő szenzorok olyan hibajelenségekkel terheltek, mint a bias, drift, skálázás. Az inerciális (IMU[5]) szenzorok méréseit egyszeresen vagy kétszeresen is integrálni kell. A rosszul becsült hibák az integráció során jelentősen rontják

[1] A kutatás, amely ezekhez az eredményekhez vezetett a VISION projekt része. Ez a projekt az Európai Unió Horizon 2020 kutatási és innovációs programjából kapja a támogatást (grant agreement No 690811).
[2] UAV: Pilóta nélküli légi jármű (Unmanned Aerial Vehicle).
[3] Low-cost: Alacsony árú.
[4] MEMS: Mikroelektromechanikai rendszerek (Micro-Electro-Mechanical Systems).
[5] IMU: Inerciális mérőegység (Inertial measurement unit).

a pontosságot. Azonban az inerciális szenzorok mintavételezési frekvenciái magasak (50–200 Hz). A low-cost GNSS[6] vevők csak egy mérési frekvencián működnek, a kódmérési eljárással pedig 3–5 méteres pozíciópontosság érhető el. A legnagyobb mintavételezési frekvencia alacsonyabb, mint az IMU-k esetén, általában 5 Hz. Azonban a műholdas mérések abszolút megoldást adnak, az eredmények további integrálására nincs szükség. A szenzorok fúziójának célja, hogy a különböző hibajelenségek hatásait csökkentsük és előálljon a megbízható, magas frekvenciájú navigációs információ, melyet irányításra lehet alkalmazni.

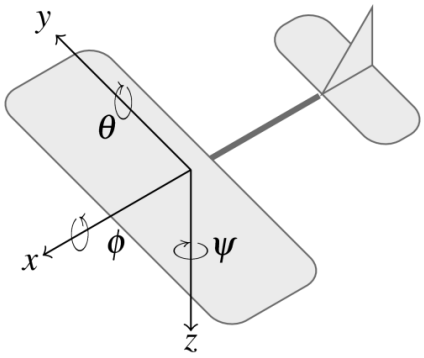
Szenzorfúzió esetén két megvalósítás jöhet szóba, az egyik a loosely coupled megoldás. Ebben az esetben a különböző részrendszerek előfeldolgozott megoldásait, és azok megbízhatóságát kombináljuk. A megoldás során a részrendszerek által szolgáltatott információkat használjuk, magukról a rendszerekről kevés információ is elegendő. A másik, összetettebb megoldás a tightly coupled integráció, amikor részrendszerek nyers méréseit integráljuk. A cikkben szereplő számítási eljárás a második integrációs típust alkalmazza. A GNSS vevőkből származó kódmérések, Doppler-mérések, az inerciális érzékelőkből származó gyorsulások, szögsebességek és a magnetométerből kapott a mágneses térerősség mérések kerülnek alkalmazásra a szenzorfúziós eljárás során.

A cikkben bemutatjuk a különböző koordinátarendszereket és a közöttük értelmezett transzformációkat, a méréseket végző szenzorok modelljeit, valamint a becslést végző kiterjesztett Kálmán-szűrő (EKF[7]) algoritmust. Az ezt követő részben pedig egy valós mérési adatsor feldolgozásának eredményeit mutatjuk be.

KOORDINÁTARENDSZEREK

A különböző mérések más-más koordinátarendszerben vannak értelmezve. Ahhoz, hogy a szenzorok fúziója megfelelően működhessen, ezeket a koordinátarendszereket és a transzformációkat megfelelően kell definiálni.

Test-koordinátarendszer



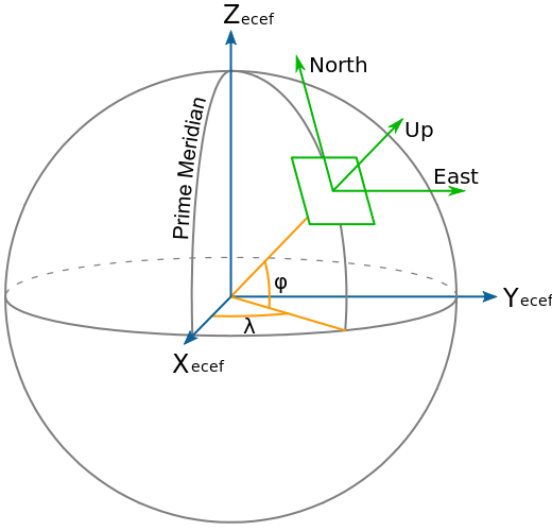
1. ábra Test-koordinátarendszer és Euler-szögek (ϕ orsózó, θ bólintó, ψ legyező)

[6] GNSS: Globális navigációs műholdrendszerek (Global Navigation Satellite Systems), GPS, GLONASS, Galileo, BEIDOU, SBAS, QZSS.
[7] EKF: Kiterjesztett Kálmán-szűrő (Extended Kálmán Filter).

A testhez rögzített koordinátarendszer origója a jármű egy tetszőleges pontja, általában az x tengely előre, z tengely lefelé, y tengely pedig az $x-z$ síkra merőlegesen jobbra mutat. Ezen tengelyek körüli elfordulások határozzák meg a jármű Euler-szögeit (x – orsózó, y – bólintó, z – legyező). Az inerciális szenzorok mérései ebben a koordinátarendszerben vannak értelmezve.

Navigációs-koordinátarendszer

Ebben a koordinátarendszerben értelmezhető a jármű navigációs feladata. A Föld egy tetszőleges pontjára érintősíkot helyezve, az érintési pontban kapjuk a rendszer origóját. Kétféle tengelyelhelyezés terjedt el ennél a koordinátarendszer típusnál az egyik az ENU[8], a másik pedig a NED[9]. A cikkben és a számítási algoritmusban is a továbbiakban a navigációs-koordinátarendszer NED-ben van értelmezve.



2. ábra Navigációs- és Földközéppontú, Földhöz rögzített koordinátarendszerek [1]

Föld középpontú, Földhöz rögzített koordinátarendszer (ECEF)

Ennek a koordinátarendszernek az origója a Föld középpontjához van rögzítve, az X tengely a fő meridiánon halad át, a Z tengely az északi pólusba mutat, Y tengely pedig az $X-Z$ síkra merőleges úgy, hogy balsodrású rendszert alkosson. Ez a koordinátarendszer a Földhöz rögzítve, azzal együtt forog. A GNSS-es mérések ebben a koordinátarendszerben vannak értelmezve.

Koordinátarendszerek közötti transzformációk

A koordinátarendszerek közötti transzformációt egy-egy forgatási mátrix írja le, R_a^b forgatási mátrix a-ból b rendszerbe forgat. Ezen mátrixoknak a transzponáltjai írják le a fordított irányú transzformációt.

$$R_b^a = R_a^{b^T} \tag{1}$$

A test-koordinátarendszerből a navigációs-koordinátarendszerbe történő transzformációt az Euler-szögek határozzák meg a következőképpen [3],

[8] ENU: Kelet-Észak-Fel (East-North-Up).
[9] NED: Észak-Kelet-Le (North-East-Down).

$$R_b^n = \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & \sin(-\psi) & 0 \\ -\sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & 0 & -\sin(-\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\theta) & 0 & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\phi) & \sin(-\phi) \\ 0 & -\sin(-\phi) & \cos(-\phi) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Ez három forgatás szorzata, egy z körüli $-\psi$ legyezőszögű, egy y körüli $-\theta$ bólintószögű és egy x körüli $-\phi$ orsózószögű forgatásé.
ECEF rendszerből a navigációs-koordinátarendszerbe történő forgatás

$$R_e^n = \begin{bmatrix} \cos(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(-\phi_e - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\lambda_e & \sin\lambda_e & 0 \\ -\sin\lambda_e & \cos\lambda_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

alakú [3]. Ez egy y körüli és egy z körüli forgatás szorzata, ahol ϕ_e az adott földrajzi pont szélessége λ_e pedig a hosszúsága.

A test-koordinátarendszerből az ECEF rendszerbe történő transzformáció

$$R_b^e = R_e^{nT} R_b^n \quad (4)$$

alakban írható fel.

A GNSS antenna és az inerciális szenzorok között található test-koordinátarendszerben értelmezett kart jelölje $\vec{b}_{IMU}^{GNSS}$, ekkor az antenna pozíciója ($\vec{X}_r$) és sebessége ($\vec{V}_r$) megadható az inerciális szenzor pozíciójának ($\vec{p}_e$), sebességének ($\vec{v}_e$) és szögsebességéből képzett ferdén szimmetrikus mátrixának (Ω_b) az ismeretében [3].

$$\vec{X}_r = \vec{p}_e + R_b^e \vec{b}_{IMU}^{GNSS} \quad (5)$$

$$\vec{V}_r = \vec{v}_e + R_b^e \Omega_b \vec{b}_{IMU}^{GNSS} \quad (6)$$

SZENZOR MODELLEK

A GNSS vevő kódméréséhez tartozó egyenlet

$$\rho_r^S = \vec{E}_r^{S\,T} \left(\vec{X}_r - \vec{X}^S \right) + c(\delta_r - \delta^S) + I_r^S + T_r^S - cD_{rel}^S - cD_{GD}^S + \eta_r^S \quad (7)$$

alakban írható fel [4]. Ahol ρ_r^S a vevő és a műhold között mért távolság,

$$\vec{E}_r^S = \frac{(\vec{X}_r - \vec{X}^S)}{\|(\vec{X}_r - \vec{X}^S)\|} \quad (8)$$

a vevő-műhold irányú egységvektor, $\vec{X}^S$ a műhold pozíciójának vektora ECEF koordinátarendszerben. A vevő- és a műholdóra hibákat δ_r és δ^S jelöli, az ionoszféra és a troposzféra késleltetéseket pedig I_r^S és T_r^S, melyeket Klobuchar és Saastamoinen légköri modellek felhasználásával számítunk ki. A relativisztikus hatások korrekcióját D_{rel}^S, a csoportkésés különbséget D_{GD}^S, a mérési zajt pedig η_r^S jelöli. Egyes modellezett tagok időben vannak értel-

mezve, ezeket meg kell szorozni a jel terjedésének sebességével (fénysebesség, c), hogy távolságként jelentkezzenek az egyenletben.

A GNSS vevő Doppler-méréséhez tartozó egyenlet

$$-\lambda^S d_r^S = \vec{E}_r^{S^T}\left(\overrightarrow{V_r} - \vec{V}^S\right) + c\left(\dot{\delta}_r - \dot{\delta}^S\right) + \eta_{d_r}^S \tag{9}$$

alakú [5], ahol λ^S a műhold sugárzási frekvenciájához tartozó hullámhossz, d_r^S a vevő és a műhold között mért Doppler-érték, $\vec{V}^S$ a műhold sebessége ECEF rendszerben, w_e^i a Föld forgási sebessége, $\dot{\delta}^S$ a műholdóra drift, $\dot{\delta}_r$ a vevőóra drift, $\eta_{d_r}^S$ pedig a mérési zaj.

A gyorsulásmérő-szenzor egyenlete

$$\vec{f}^b = R_b^{e^T}(\vec{a}^e) + \vec{b}_a^b - R_b^{n^T}\begin{bmatrix}0\\0\\g\end{bmatrix} + R_b^{e^T}\left(\Omega_e^i \vec{v}_e\right) + \eta_f \tag{10}$$

alakban írható fel [3], melyben $\vec{f}^b$ a gyorsulásmérő által mért értékek test-koordinátarendszerben. A sebesség- és gyorsulásvektor $\vec{v}_e$ és $\vec{a}_e$, $\vec{b}_a^b$ a gyorsulásmérő-bias vektora, g a nehézségi gyorsulás, Ω_e^i a Föld szögsebesség-vektorából képzett ferdén szimmetrikus mátrix, η_f a mérési zaj.

A szögsebességmérő-szenzor egyenlete

$$\vec{\omega}^b = \underbrace{\begin{bmatrix}1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta\\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi\\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta\end{bmatrix}^{-1}}_{R_{Euler}^{-1}}\begin{bmatrix}\dot{\phi}\\ \dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix} + \vec{b}_\omega^b + R_b^{e^T}\left(\begin{bmatrix}0\\0\\\omega_e^i\end{bmatrix} + \vec{\omega}_{en}^e\right) + \eta_\omega \tag{11}$$

alakú [3], amelyben $\vec{\omega}^b$ a szenzor által mért értékeket tartalmazza, R_{Euler} mátrix a nemlineáris kapcsolatot írja le a test-koordinátarendszer szögsebessége és a navigációs-koordinátarendszer között. A szögsebességek $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$, $\vec{b}_a^b$ pedig a szögsebességmérő-bias vektora, η_ω a mérési zaj. A navigációs-koordinátarendszer és az ECEF koordinátarendszer szögsebessége közötti kapcsolatot írja le az

$$\vec{\omega}_{en}^e = \begin{bmatrix}\frac{\sin\lambda_e\left[\sin\phi\left(v_x\cos\lambda_e + v_y\sin\lambda_e\right) - v_z\cos\phi_e\right]}{R_M + h_e}\\ \frac{\cos\lambda_e\left[\sin\phi\left(v_x\cos\lambda_e + v_y\sin\lambda_e\right) - v_z\cos\phi_e\right]}{R_M + h_e}\\ -\frac{v_x\sin\lambda_e - v_y\cos\lambda_e}{\cos\phi\left(R_N + h_e\right)}\end{bmatrix} \tag{12}$$

összefüggés, ahol h_e a forgási ellipszoid feletti magasság, valamint

$$R_N = \frac{a}{\left(1 - e^2\sin^2\phi_e\right)^{\frac{1}{2}}}, \tag{13}$$

$$R_M = \frac{a\left(1 - e^2\right)}{\left(1 - e^2\sin^2\phi_e\right)^{\frac{3}{2}}}. \tag{14}$$

A fenti egyenletekben a az ellipszoid excentricitása, e a fél nagytengelyének hossza.

A magnetométer-szenzor egyenlete

$$\vec{m}^b = R_b^{n^T}\vec{H}^n + \eta_m, \tag{15}$$

amelyben $\vec{m}^b$ vektor a szenzor által mért értékeket tartalmazza, $\vec{H}^n$ a Föld lokális mágnesestér vektora navigációs-koordinátarendszerben értelmezve, η_m a mérési zaj.

KITERJESZTETT KÁLMÁN-SZŰRŐN ALAPULÓ BECSLŐ ALGORITMUS FELÉPÍTÉSE

A tightly coupled szenzorfúzió megvalósítása egy kiterjesztett Kálmán-szűrő felhasználásával történik [6]. Az állapotvektor

$$x = \left[\vec{p}^{e^T}\ \ \vec{v}^{e^T}\ \ \vec{a}^{e^T}\ \ \underbrace{\phi\ \ \theta\ \ \psi}_{\vec{\varphi}_x^T}\ \ \underbrace{\dot{\phi}\ \ \dot{\theta}\ \ \dot{\psi}}_{\vec{\omega}_x^T}\ \ \vec{b}_a^{b^T}\ \ \vec{b}_\omega^{b^T}\ \ \vec{b}_{GNSS}^T\ \ \vec{d}_{GNSS}^T\right]^T, \tag{16}$$

melyben a paraméterek:

- $\vec{p}^e$: ECEF koordinátarendszerben vett IMU pozíció $[m]$;
- $\vec{v}^e$: ECEF koordinátarendszerben vett IMU sebesség $[m/s]$;
- $\vec{a}^e$: ECEF koordinátarendszerben vett IMU gyorsulás $[m/s^2]$;
- ϕ: orsózószög $[rad]$;
- θ: bólintószög $[rad]$;
- ψ: legyezőszög $[rad]$;
- $\dot{\phi}$: Orsózó-szögsebesség $[rad/s]$;
- $\dot{\theta}$: bólintó-szögsebesség $[rad/s]$;
- $\dot{\psi}$: legyező-szögsebesség $[rad/s]$;
- $\vec{b}_a^b$: gyorsulásmérő-bias $[m/s^2]$;
- $\vec{b}_\omega^b$: szögsebességmérő-bias $[rad/s]$;
- $\vec{b}_{GNSS}$: GNSS vevő órahiba vevőkre és konstellációkra bontva $[m]$;
- $\vec{d}_{GNSS}$: GNSS vevő óradrift vevőkre és konstellációkra bontva $[m/s]$.

Diszkrét időben a predikciós lépés során az állapotvektor az előző időpontban vett állapot (x_{t-1}^+) és az állapot átmeneti mátrix (Φ_{t-1}^t) felhasználásával módosul. A két mérési időpont között eltelt időt Δt jelöli. Az x_{t-1}^+ és Φ_{t-1}^t értékek a

$$\Phi_{t-1}^t = \begin{bmatrix} I_3 & \Delta t I_3 & \frac{\Delta t^2}{2} I_3 & & & & & & \\ & I_3 & \Delta t I_3 & & & & & & \\ & & I_3 & & & & & & \\ & & & I_3 & \Delta t I_3 & & & & \\ & & & & I_3 & & & & \\ & & & & & I_3 & & & \\ & & & & & & I_3 & & \\ & & & & & & & I_6 & \Delta t I_6 \\ & & & & & & & & I_6 \end{bmatrix}, \tag{17}$$

$$x_t^- = \Phi_{t-1}^t x_{t-1}^+ \tag{18}$$

egyenletek segítségével határozhatóak meg. Az állapotvektorhoz tartozó kovariancia mátrix (P) is módosul

$$P_t^- = \Phi_{t-1}^t P_{t-1}^+ {\Phi_{t-1}^t}^T + Q_{t-1}^t \tag{19}$$

alapján, ahol Q_{t-1}^t a folyamatzaj kovariancia mátrix

$$Q_{t-1}^t = \begin{bmatrix} \sigma_p^2 I_3 & & & & & & & & & \\ & \sigma_v^2 I_3 & & & & & & & & \\ & & \sigma_a^2 I_3 & & & & & & & \\ & & & \sigma_{\varphi_x}^2 I_3 & & & & & & \\ & & & & \sigma_{\omega_x}^2 I_3 & & & & & \\ & & & & & \sigma_{b_a}^2 I_3 & & & & \\ & & & & & & \sigma_{b_\omega}^2 I_3 & & & \\ & & & & & & & \sigma_{b_{GNSS}}^2 I_6 & & \\ & & & & & & & & \sigma_{d_{GNSS}}^2 I_6 & \end{bmatrix} \Delta t. \tag{20}$$

A különböző σ értékek az egyes állapotok folyamatzajainak szórásait jelölik.
A Kálmán-erősítés mátrix számítható

$$K_t = P_t^- H(x_t^-)(H(x_t^-)P_t^- H(x_t^-)^T + R_t)^{-1} \tag{21}$$

összefüggés alapján, ahol R_t a mérési zaj kovariancia mátrix,

$$H(x_t^-) = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x_t^-} \tag{22}$$

pedig a mérési egyenletekből származó Jacobi-mátrix. Ezután a szűrő frissíti az állapotvektort és a kovariancia mátrixot az aktuális időpontbeli becslési értékekre [6]. A mérési vektorban (y_t) találhatóak a gyorsulások, szögsebességek, mágneses térerősségek, valamint a GNSS vevők által mért kódtávolságok és Doppler-értékek.

$$x_t^+ = x_t^- + K_t(y_t - h(x_t^-)) \tag{23}$$

$$P_t^+ = \left(I - K_t H(x_t^-)\right)P_t^- \tag{24}$$

TESZTELÉS VALÓS MÉRÉSI ADATOKON

Ebben a fejezetben a tesztmérés és az algoritmus által adott eredményeket mutatjuk be. Ezek az eredmények a valós mérési adatok utófeldolgozásából származnak.

A mérés bemutatása

Az MTA SZTAKI által fejlesztett 3 méter szárnyfesztávolságú pilótanélküli repülőgép fedélzetén elhelyezésre került egy U-blox LEA-6T GPS, két U-blox NEO-M8T GNSS vevő, egy LIS331DLH gyorsulásmérő, egy L3G4200D szögsebességmérő és egy HMC5883 magnetométer. A két NEO-M8T GNSS vevő 5 Hz-es mérési frekvencián, Tallysman TW4721 antennák felhasználásával rögzítették a GPS, GLONASS és Galileo műholdak jeleit. Az inerciális

és magnetométer szenzorok 100 Hz-es mérési frekvencián rögzítették a méréseiket. A szenzorfúziós algoritmus a felsorolt szenzorok által rögzített méréseket dolgozza fel.

3. ábra A mérést végző UAV és a felhelyezett szenzorok

Az UAV fedélzetén megtalálható egy FCC[10], mely a LEA-6T vevő, a gyorsulásmérő, a szögsebességmérő és a magnetométer adatait felhasználva számítja az Euler-szögeket, melyek a kiértékelésben referenciaként szerepelnek majd. A pozíció referencia pontok pedig a LEA-6T vevőből származó koordináták lesznek.

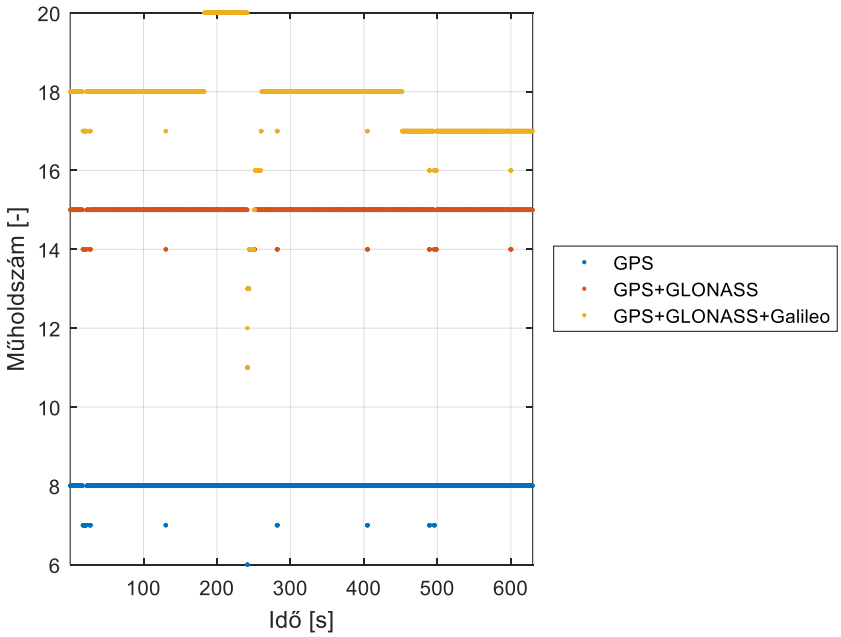
A VISION projekt keretén belül a repülés adott magassági eltolással rendelkező szimulált leszállásokat tartalmazott, melyeket az FCC szabályozott. A köztes időszakokban pedig kézi vezérlésben repült az UAV.

Mérés kiértékelése

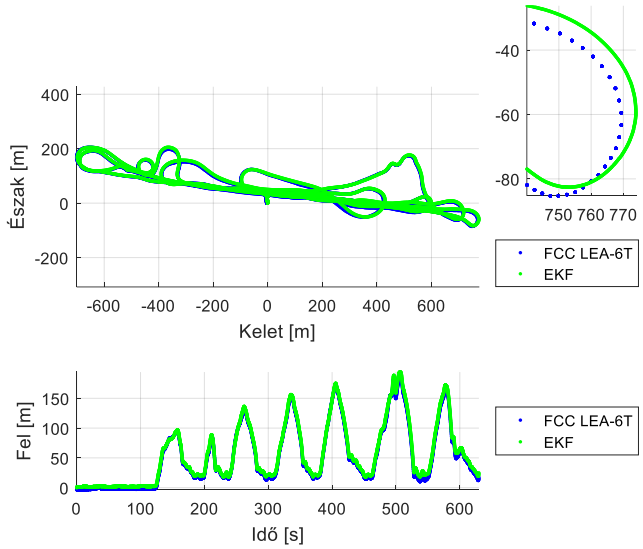
A repülés során a két U-blox NEO-M8T vevő rögzítette a GPS, a GLONASS és a Galileo műholdakhoz tartozó nyers kód- és Doppler-méréseket. Az EKF algoritmus számításába csak azok a műholdak kerülhettek bele, amelyeknek magassági szöge 15 fok felett volt és adott időpontban mindkét vevő rögzített hozzá méréseket. A 4. ábrán látható a konstellációkra bontott műholdszám az idő függvényében.

A szenzorok adatait rögzítve és az utólagos feldolgozásukat követően az eredmények a következők. Az EKF algoritmus GLONASS és Galileo műholdak jeleit is felhasználja, minden műholdhoz mindkét vevőből származnak mérések. Ezekből következik, hogy az EKF algoritmus biztosabb információt ad a repülőgép koordinátáiról, mint a LEA-6T GPS vevő. A pozíciókat vizsgálva egy fontos különbség, hogy a csak GPS-es mérésekhez képest sokkal sűrűbb megoldást kapunk. Látható az 5. ábrán is, hogy az 5 Hz-en működő LEA-6T vevő megoldásai között is van információnk az UAV pozíciójáról az inerciális adatok integrációjának köszönhetően. A kiemelt részleten egy fordulót vizsgálva olvasható le a két megoldás közötti különbség. A fordulókban a gép nagyobb bedöntési szögei miatt rosszabb lehet a műhold-vevő kapcsolat, emiatt romolhat a műholdas helymeghatározás pontossága. Ebben az esetben az inerciális szenzorokból származó információ növeli a megbízhatóságot.

[10] FCC: Fedélzeti számítógép (Flight Control Computer).



4. ábra GNSS műholdak száma a mérés során



5. ábra Pozíciók navigációs-koordinátarendszerben

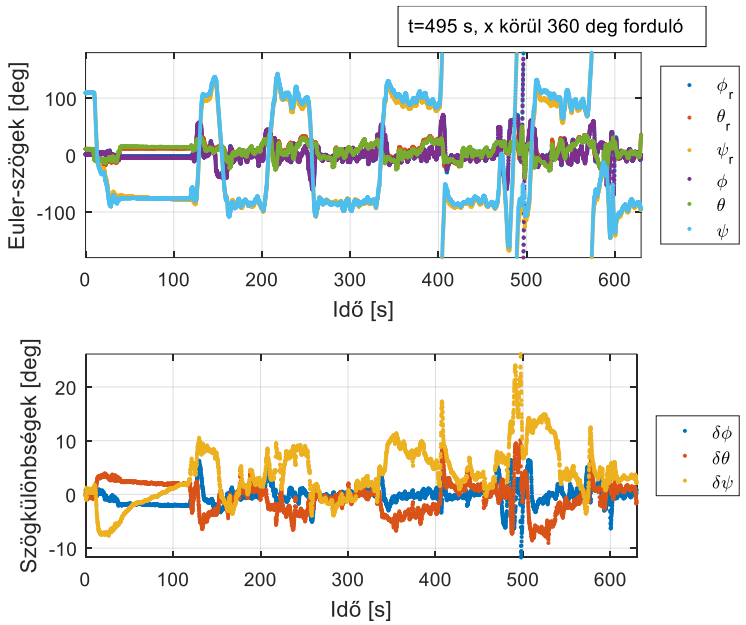
Azokban az időpontokban, amikor a LEA-6T illetve az EKF algoritmus is adott pozíció információt, kiszámítjuk a pozíció eltéréseket. Ezeknek az értékeknek az átlagos eltérését és szórását adja meg az 1. táblázat. Több méteres eltérések láthatók mindhárom koordináta komponensnél. Ez származhat a vevők által használt GNSS rendszer különbségekből, a mérésben felhasznált nagyobb műhold számból, a két külön vevő alkalmazásából, illetve az inerciális szenzor integrációból.

	Észak	Kelet	Le
Átlagos eltérés [m]	3,047	1,581	–3,997
Szórás [m]	3,057	2,033	2,202

1. táblázat Átlagos eltérések és szórások a NED koordináták között

Az 6. ábra bemutatja az FCC és az EKF algoritmus által számított Euler-szögeket, illetve az ezek közötti eltéréseket. A felső diagramon jól látható, hogy a trendek hasonlóak mindkét megoldás esetén. Bővebb információt a két megoldás közötti különbség ad. A mérés 30. és

130. másodperce között a földön állt az UAV. A referencia megoldásban itt megjelenik egy drift a legyezőszögben, ami az EKF-es megoldásban nincsen. Ebben az intervallumban ezért látható folyamatos változás. Az ezt követő repülési szakaszban 10 fok alatt maradnak a szögeltérések, kivéve a mérés 495. másodpercének környékét, amikor az UAV egy teljes fordulatot tett meg az x tengelye körül. Itt szintén a legyezőszögben látható egy nagyobb, 20 fokos eltérés. Biztosra mondható, hogy mindkét megoldás rendelkezik valamekkora hibával a valódi értékekhez képest. A különböző szűrő dinamikák és számítási eljárások miatt azonban más eredményt ad a két algoritmus. Nagy pontosságú referencia hiányában nehezen megállapítható, hogy melyik algoritmus megoldása áll közelebb a valódi értékhez.



6. ábra Referencia szögek(ϕ_r, θ_r, ψ_r), az EKF algoritmus által adott Euler-szögek(ϕ, θ, ψ) és azok különbségei($\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi$)

A szögeltérések átlagos eltéréseit és szórásait foglalja össze a 2. táblázat. Az orsózó- és bólintószögekhez tartozó átlagos eltérések 1 fok alattiak, a legyezőszögnél ez az érték 3,71 fok. A szórások szintén az x és az y tengely körüli elfordulásoknál alacsonyabbak.

	Orsózószög	Bólintószög	Legyezőszög
Átlagos eltérés [deg]	–0,264	–0,46	3,71
Szórás [deg]	1,771	2,866	5,078

2. táblázat Átlagos eltérések és szórások az Euler-szögek között

ÖSSZEGZÉS ÉS TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A cikkben bemutattuk a GNSS, inerciális és mágneses szenzorok tightly coupled integrációjához kapcsolódó koordinátarendszereket és a köztük levő transzformációkat. Ismertettük az egyes szenzorokhoz tartozó mérési modelleket. A bemutatott szenzorfúziós eljárást egy kiterjesztett Kálmán-szűrő felhasználásával valósítottuk meg és ezt követően az EKF algoritmust egy valós repülési adatsoron teszteltük. A tesztmérés utólagos feldolgozásából kapott eredményeket összehasonlítottuk az UAV fedélzeti számítógépe által számított adatokkal. Itt látható volt, hogy a szenzorfúzió a pozíció megoldásban abszolút javulást hozott. A csak GPS rend-

szert felhasználó LEA-6T vevő pozíciójához képest sokkal sűrűbb és feltehetően megbízhatóbb eredményt adott az EKF algoritmus a több GNSS konstellációt használó két NEO-M8T vevőnek és az inerciális szenzorok integrációjának köszönhetően. Az orientációbecslés eredménye nagyon hasonló volt a referencia és az EKF megoldás között. A legnagyobb eltérések leginkább a legyezőszögben voltak megfigyelhetőek.

A jövőbeli tervek között szerepel, hogy ezt a számítási eljárást kibővítjük egy már működő két antennás, differenciális műholdas fázismméréseken alapuló RTK[11] orientációbecsléssel [7], ezzel növelve a becslés megbízhatóságát. Egy másik fejlesztési lépés pedig a pozíció számítás RTK alapokra való helyezése. A mozgó és a telepített GNSS bázisállomás közötti differenciális fázismméréseket felhasználva növelnénk a szenzorfúziós algoritmus pozíció megoldásának pontosságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] VISION PROJECT (Validation of Integrated Safety-enhanced Intelligent flight cONtrol), (online) url: http://w3.onera.fr/h2020_vision/ (2017.03.17.)

[2] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA North east down, (online) url: https://en.wikipedia.org/wiki/North_east_down (2017.03.17.)

[3] Michele IAFRANCESCO: GPS/INS Tightly coupled position and attitude determination with low-cost sensors. MSc tézis, (online) url: https://anavs.de/pdfs/Iafrancesco-Michele-Tightly-coupled-position-and-attitude-determination-with-low-cost-sensors.pdf (2017.03.17.)

[4] ÁDÁM József - RÓZSA Szabolcs - TAKÁCS Bence: GNSS elmélete és alkalmazása. Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

[5] Dr. Bernhard HOFMANN-WELLENHOF - Dr. Herbert LICHTENEGGER - Dr. Elmar WASLE: GNSS - Global Navigation Satellite Systems. 2008, ISBN: 9783211730126

[6] Gary BISHOP, Greg WELCH: An introduction to the Kálmán Filter. (2001) Proc of SIGGRAPH, Course 8(27599-23175):41

[7] Márton FARKAS - Szabolcs RÓZSA - Bálint VANEK: Multi-GNSS attitude estimation of UAVs during landing. International Association of Geodesy Symposia, Elbírálás alatt, beküldve: 2017. október 29.

[11] RTK: Real Time Kinematic pozícionálási eljárás, mely felhasználja a GNSS-es kód- és fázismméréseket is.

UNMANNED AERIAL VEHICLES POSITION AND ATTITUDE ESTIMATION USING TIGHTLY COUPLED SENSOR FUSION OF LOW-COST GNSS, INERTIAL AND MAGNETIC SENSORS

This paper presents a tightly coupled sensor fusion method based on low-cost GNSS, inertial (IMU) and magnetic sensors. This method is used to estimate UAVs position and attitude. Different coordinate systems and transformations are presented. The used GNSS, accelerometer, gyroscope, magnetometer sensor model equations are described in details. The estimation is based on an Extended Kalman Filter (EKF), which equations are also explained. The algorithm is tested on a real UAV flight data, and the results of the post-processing are compared to the reference data.

Keywords: *UAV, GNSS, IMU, sensor fusion, EKF, position estimation, attitude estimation*

Farkas Márton (MSc) Tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium farkas.marton@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-6739-4989	Márton Farkas (MSc) Research associate Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab farkas.marton@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0001-6739-4989
Vanek Bálint (PhD) Tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725	Bálint Vanek (PhD) Senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab vanek@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0002-2458-2725
Rózsa Szabolcs (PhD) Egyetemi docens, Tanszékvezető Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Általános- és Felsőgeodézia Tanszék rozsa.szabolcs@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-5335-6455	Szabolcs Rózsa (PhD) Associate Professor, Head of Department Budapest University of Technology and Economics Faculty of Civil Engineering Department of Geodesy and Surveying rozsa.szabolcs@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-5335-6455

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-10-0459_Farkas_M-Vanek_B-Rozsa_Sz.pdf

Schuster György, Ady László

BIZTONSÁGKRITIKUS SZOFTVER FEJLESZTÉS

A szoftver kritikus sikertényező. Manapság nincs olyan bonyolultabb műszaki alkotás, amelyben nincs szoftver támogatás. Ez a kijelentés a közlekedésben résztvevő járművekre fokozottan igaz, akármelyik területet is nézzük. Ezek a szoftver elemek megjelennek minden területen a szórakoztató rendszerektől az intelligens forgalomirányítások keresztül a kritikus fedélzeti rendszerekig. Minél több biztonságkritikus feladatot bízunk ezekre a fedélzeti rendszerekre, annál kevesebb feladat hárul a folyamatokban résztvevő emberekre, illetve olyan funkciókat is meg tudunk valósítani, amelyek korábban elképzelhetetlenek voltak. Sajnos a rendszerek növekvő bonyolultsága növeli a hibák előfordulásának lehetőségét. Ebben a cikkben azt mutatjuk be, hogy milyen szempontokat és szabályokat kell betartani, ha olyan beágyazott rendszerek szoftvereit kell előállítani, amelyek kritikus biztonsági feladatokat látnak el.

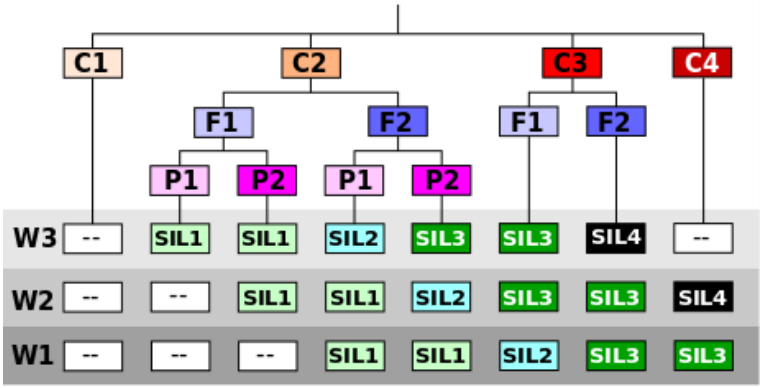
***Kulcsszavak**: szoftver, biztonság, fejlesztés*

BIZTONSÁGI SZINTEK

A fentiek alapján számos olyan terület van, ahol a felhasználás, illetve a működés biztonsága rendkívül lényeges. Minél nagyobb a működési biztonság, annál ritkábban következik be káresemény. A műszaki eszközök biztonsági szempontból négy osztályba sorolhatók. Ezek a SIL (Safety Integrity Level) szintek. A SIL1 a legalacsonyabb a SIL4 a legmagasabb szint. A meghibásodások megengedett valószínűsége az 1. táblázatban látható. A táblázatban látható valószínűségi értékek a vizsgált termék teljes életciklusára vonatkoznak.

SIL szint	A hiba bekövetkezési valószínűsége
SIL1	$10^{-2} \leqslant p < 10^{-1}$
SIL2	$10^{-3} \leqslant p < 10^{-2}$
SIL3	$10^{-4} \leqslant p < 10^{-3}$
SIL4	$10^{-5} \leqslant p < 10^{-4}$

1. táblázat SIL szintek IEC61508 szerint [1]



1. ábra Kockázati gráf [saját szerkesztés]

A megbízhatósági igényt sok tényező befolyásolja. Nem mindegy milyen jellegű a kezelőszemélyzet képzettsége, milyen jellegű a meghibásodás mértéke és előfordulásának jellege és végül, de nem utolsósorban milyen a keletkezett kár és a hiba elháríthatósága.

Az IEC 61 508 [1] és az IEC 61 511 [2] szabványok megadnak egy kockázati gráfot, amely a fenti szempontokat és megbízhatósági igényt mutatja be (1. ábra).

A jelölések magyarázata:

- a káresemény besorolása:
  - **C1** egy, vagy néhány személy könnyű sérülése, illetve a környezet kismértékű terhelése;
  - **C2** egy, vagy több személy súlyos nem gyógyítható sérülése, esetleg egy személy halála, illetve a környezet átmeneti súlyosabb terhelése;
  - **C3** több személy halála, illetve a környezet súlyos terhelése;
  - **C4** tömeges halálos baleset és egyéb katasztrofális hatások;
- az események gyakorisága:
  - **F1** ritkán, szórványosan bekövetkező esemény;
  - **F2** gyakran bekövetkező és tartós hatású esemény;
- a kár elháríthatósága:
  - **P1** elhárítható káresemény;
  - **P2** nem elhárítható káresemény;
- a személyzet képzettsége:
  - **W1** teljesen felkészült személyzet;
  - **W2** felkészült, de nem a „legjobb” személyzet;
  - **W3** teljesen járatlan személyzet.

A kockázatot a lehetőségekhez mérten minimalizálni kell, ennek érdekében a következő intézkedéseket és szabályokat kell betartani:

1. a megvalósítandó rendszer minden elemére el kell végezni a kockázat elemzését, tehát összetett rendszer esetén a mechanikai elemekre, az elektronikára és szoftver elemekre is;
2. meg kell vizsgálni az elkészült (elkészülendő) rendszert és meg kell valósítani a maradék kockázatot minimalizáló intézkedéseket;
3. minősíteni kell azokat a felszereléseket is, amelyekkel a fenti intézkedéseket végzik;
4. ismétlődő funkcionális teszteket kell végrehajtani, hogy a biztonsági előírások végrehajtása korrekt módon történt.

Ha biztosítani akarjuk a rendszer fokozott megbízhatóságát, akkor a rendszernek hibatűrő képességgel kell rendelkeznie ez a HFT (Hardware Fault Tolerance/Hardver Hiba Tolerancia) mutató. A HFT szintek a következők:

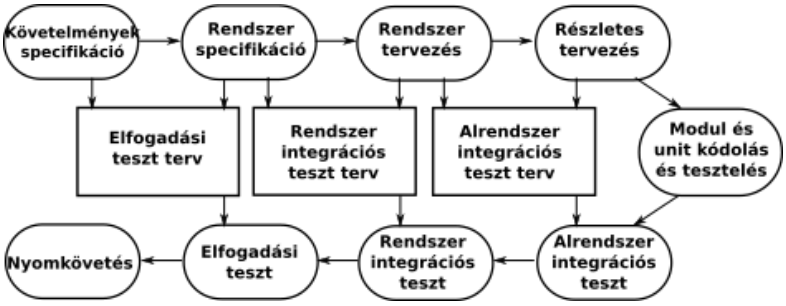
HFT0 nincs biztonsági funkció az adott elem meghibásodására,

HFT1 az elem egy működési hibát „elvisel”, legalább két hibának kell bekövetkeznie a működési funkció elvesztéséhez,

HFT2 az elem két működési hibát „elvisel”, legalább három hibának kell bekövetkeznie a működési funkció elvesztéséhez.

ÉLETCIKLUS ÉS FEJLESZTÉSI MODELL

Biztonságkritikus fejlesztéseknél a legelterjedtebb életciklus modell az úgynevezett V-modell. A szakirodalomban a modellnek számos ábrázolása található, de ezek az ábrázolások filozófiájukat tekintve nem, csak lépéseik felbontását tekintve különböznek. A 2. ábra a V életciklus modell egy ábrázolást mutatja.



2. ábra A V életciklus modell [saját szerkesztés]

Az életciklus modell elemei:

- **követelmények és specifikáció**, a szoftver tervezés kiinduló lépése ebben a fázisban kerülnek meghatározásra az alapvető funkciók és rögzítésre kerülnek a részletes specifikációk. Ebben a fázisban történik az átfogó kockázatelemzés is;
- **rendszer specifikáció**, ez a lépés a rendszer logikai szintű specifikálása, meghatározásra kerülnek a szoftver összetevői, ezek kapcsolata;
- **rendszer tervezés**, az életciklus ezen fázisában az előző specifikációk alapján kerül sor a rendszer logikai szintű tervezésére;
- **részletes tervezés**, modul és unit szintű tervezés. Itt már vannak algoritmusok, adatszerkezetek és kommunikációs protokollok;
- **modul és unit kódolás és tesztelés**, a modulok és az unit-ok kódolása és ezek tesztelése;
- **alrendszer integrációs teszt**, az elkészült unit-ok és a részmodulok összeépítésének tesztelése;
- **rendszer integrációs teszt**, a rendszer integrálása utáni tesztelés;
- **elfogadási teszt**, a szoftver utolsó tesztelési lépése, ahol a fejlesztő(k) a tesztelési terv alapján lépésről lépésre bizonyítja a megrendelőnek a szoftver működőképességét;
- **elfogadási teszt terv**, forrása a követelmény specifikáció és a rendszer specifikáció, ez alapján történik az elfogadási teszt;
- **integrációs teszt terv**, a rendszer összeépítésének tesztelési terve, ez biztosítja a rendszer elemeinek hibátlan együttműködését. Forrása a rendszer specifikáció és a rendszer terv;
- **alintegrációs teszt terv**, a kisebb elemek összeépítésének teszt terve. Forrása a rendszer terv és a részletes terv.

Biztonságkritikus rendszerek esetén a tesztelésről a hangsúly nagyrészt áttevődött a tervezésre. A tervezési és tesztelési szempontok és konvenciók az életciklus alapján kerülnek alkalmazásra.

Tervezési szempontok az életciklus fázisai alapján

Mielőtt egy szoftver projekt elindul egy részletes funkcionális specifikációra van szükség. Első közelítésben ez egy viszonylag egyszerű probléma, azonban ez egyáltalán nincs így. Többéves tapasztalatunk azt mutatja, hogy a megrendelő által megadott funkció terv, amely a funkcionális specifikációt tartalmazza szinte minden esetben hiányos, vagy erősen hiányos. Ezért ebben a lépésben a tapasztalt fejlesztőknek mindenképpen részt kell venni ebben a fázisban. Ezek a résztvevők tapasztalataik alapján számos szempontot kiemelhetnek, illetve figyelmeztethetik a megrendelőt, hogy egy kérdéses funkció nincs teljesen definiálva. Ezért a kiindulási funkcionális specifikáció elkészítése egy iterációs folyamat.

Az első fázisban megtörténik a kockázatelemzés is. Itt ne a gazdasági kockázatra gondoljunk, hanem szigorúan műszakira. Szerencsés esetben a szoftveren kívüli alkotó elemek már olyan készültségi szinten vannak, hogy számos tulajdonság előre látható. Azonban többször az ilyen projektek minden alkotó elemének fejlesztése egy időben kezdődik[1]. Ilyen a műszaki kockázatelemzése lényegesen bonyolultabb és előre meg nem jósolható tulajdonságok és hatások befolyásolhatja.

A funkcionális specifikáció és kockázatelemzés után a rendszer-specifikáció kerül sorra. Ekkor készítik el a rendszer felépítésének az előző lépés alapján eldöntik a megfelelő SIL szintet, meghatározzák a megfelelő szoftver eszközöket. Ebbe a fázisba be lehet vonni a megrendelőt, de nem okvetlenül szükséges. A fázis kimenetén a fejlesztők megkapják a rendszer tervezéshez szükséges irányelveket, szabványokat és a fejlesztői csoportra jellemző eljárásokat és a fejlesztő eszközök körét.

A rendszer tervezése már a rendszer logikai felépítésének és főbb részeinek tervezését jelenti. Ebben a fázisban már konkrétan a szoftver tervezése történik. Ekkor már meghatározzák a modulokat és a feladatok is szétosztásra kerülnek a különböző csoportok között. Ezek a csoportok léphetnek át a következő fázisba, ahol megtörténik a részletes tervezés.

Ebben fázisában már részletekbe menően tervezik meg a megfelelő szoftver egységeket. Itt kerülnek elő a megfelelő adatszerkezetek, függvények, algoritmusok és egyéb részletekbe menő architekturális elemek.

A unit kódolás és tesztelés fázisban a szoftver elemek programkódjainak előállítása történik a megfelelő programozási nyelvvel, a meghatározott programozási környezetben és a meghatározott kódolási konvenciókkal, ilyen például a megfelelő MISRA szabályok alkalmazása.

A kiválasztott programozási nyelv az esetek többségében a C és az ADA. Kisebb biztonsági követelmények esetén (egyelőre SIL2-ig) kezdenek a script nyelvek terjedni, mint például a MicroPython.

Ehhez a fázishoz rendeltük az unit tesztelést is. Ez első ránézésre egyszerűnek tűnik, de a szoftver helyességének a 80%-a körülbelül itt történik meg, hiszen itt kerülnek megírásra a kódok. Ez a tesztelési fázis nagyon alapos, mind statikus, mind dinamikus tesztelési módszereket tekintve. Ebben a fázisban gyakran alkalmaznak teszt automatákat a minél kiterjedtebb teszt esetek vizsgálatára.

1 Sokkal egyszerűbb egy már meglévő repülőszerkezethez avionikát tervezni, mint egy most kezdődő fejlesztéshez.

A következő – az alrendszer integrációs – fázisban a már megírt tesztelt és helyesnek talált szoftver egységeket integrálják és az integráció minőségét tesztelik. Ez a lépés sem tűnik bonyolultnak, azonban több, mint 20 hibalehetőséget szoktak erre a fázisra felsorolni. A hibás integrációra kiváló mintapélda a Mars Climate Orbiter és a Mars Polar Lander emlékezetes esete [4][5][6]. Mars Climate Orbiter a Mars időjárásának feltérképezésére 1998-ban indított szonda sikeresen elért a vörös bolygóhoz, ahol azonban leszállás közben darabokra szakadt. A problémát az okozta, hogy a földi vezérlőrendszerek imperiális mértékegységekkel számoltak, míg a szonda fedélzeti számítógépei metrikus egységekben várták volna az adatokat [16].

Mars Polar Lander Szintén a Naprendszer negyedik bolygójára indult 1999-ben ez a leszálló-egység, ahova meg is érkezett, de sajnos nem a szándékolt módon. Sima leszállást helyett ugyanis nagy sebességgel a Mars felszínébe csapódott, minekután a vezérlését végző szoftver a leszállólábak süllyedés közbeni rezgését - nyilván valamilyen a jeltüskéket kiszűrő algoritmus hiányában - a felszínre érkezés jeleként értelmezte, és kikapcsolta a lassító rakétákat [16].

A továbbiakban ezt az integrációs folyamatot addig ismétlik a tesztelésekkel együtt, amíg a teljes rendszer nem készül el.

Utolsó előtti fázis az elfogadási teszt, amely legalább két szintre bontható. Az első szint a fejlesztők által elvégzett részletes funkcionális teszt, amely a lehetőségekhez mérten a két első lépés minden követelménye szerinti megfelelőséget vizsgálja. A második szint, ahol a fejlesztők csapat a követelmény specifikációnak megfelelően a „megrendelő" felé bizonyítja a szoftver működőképességét és a specifikáció maradéktalan teljesítését. Ez egy komolyabb szoftver esetén akár hónapokat is igénybe vehet.

Az utolsó fázis a nyomkövetés. A szoftver további viselkedését is érdemes követni, illetőleg a fejlesztőnek vannak garanciális kötelezettségei. Volt már arra példa, hogy egy későbbi projektben modul újra felhasználáskor derült ki olyan programhiba, ami már egy előző szoftverben is szerepelt. Ekkor az első dolog, hogy a „megrendelőt" értesíteni kell és ki kell kérdezni szándékáról[2].

FEJLESZTŐI KÖRNYEZETEK

Ha biztonságos rendszer építése a cél, akkor azt minősített eszközökkel kell megtenni. Ez a szoftverek esetében fokozottan igaz. Ha az alkalmazott eszközök nem megfelelőek az előállított bináris kódok hibásak lehetnek.

A tervezés során minden lépésben informatikai támogatást vesznek igénybe. Ez részben kockázatot jelent, részben növeli a biztonságot. A kockázat az informatikai segédeszközök lehetséges hibáiban rejlenek, viszont ezen eszközök használata lehetővé teszi a rendszer biztonságos tervezését, előállítását és tesztelését.

Minden mérnök ismeri azt az érzést, amikor egy műszaki alkotás elindul „Mit felejthettem még el?". Ennek a hatásnak a csökkentésére az integrált tervezői és fejlesztő rendszerek alkalmazása egy jó megoldása. Azonban biztonságkritikus fejlesztésben a rendszernek, vagy minimum a rendszer kritikus részeinek minősítettnek kell lenni.

2 Lényeges, hogy ne kezdjünk kapkodni. Ha javítást kell végrehajtani a már leszállított rendszeren. A javított szoftvert újra validálni kell. Az is előfordulhat, hogy a javítás túl nagy kockázatot jelent és nem engedélyezik.

A teljesség igénye nélkül milyen elemei lehetnek egy ilyen integrált rendszernek:

- verzió követő;
- dokumentáció készítő;
- grafikus tervező felület;
- fordító és szerkesztő programok;
- teszt generátorok;
- szimulátorok és emulátorok;
- nyomkövető eszközök.

Adott feladattól függően az alkalmazott eszközök listája még bővülhet.

KORLÁTOZÁSOK ÉS SZABVÁNYOK

A korszerű fejlesztések nagy többsége igen terjedelmes, ami azt jelenti, hogy számos szakember dolgozik az adott feladaton. Az ilyen fejlesztések nagy része C programozási nyelven történik. Sajnos a C túl szabad programozási nyelv, ami félreértéseket és hibákat okozhat. Ezért nem csak C nyelvre bevezettek egy korlátozás csomagot a C90 és C99 szabványra, amit a MISRA (Motor Industry Software Reliability Association) bocsájtott ki, amely irányelveket és szabályokat fektet le. Egy irányelv lehet kötelező, ekkor ezt maradéktalanul be kell tartani, lehet megkövetelt, ekkor kismértékű formális eltérések megengedettek és lehetnek javasoltak, ekkor célszerű ezeknek a betartása, de nem kötelező.

Amennyiben a fejlesztők ezeket az előírásokat betartják, kisebb valószínűséggel hibáznak, vagy írnak félreérthető kódokat. Azt viszont nem biztosítja, hogy az előállított kód helyes lesz.

Az előzőekben már említettük az IEC 61 508 szabványt. Az IEC 61 508 egy „általános” szabvány, amely gyakorlatilag minden iparágban használható. Hét részből áll és egy „alap szabványként” kezelendő. Adott ágazatokban közvetlenül használható, illetve ebből kiindulva ágazat és alkalmazás specifikus szabványok forrásaként használható. A részei:

1. meghatározza az elvégzendő tevékenységeket a teljes biztonsági életciklus minden szakaszában, valamint a dokumentáció követelményei, a szabványnak való megfelelés, irányítási és biztonsági értékelés szempontjából;
2. elektromos, elektronikus, programozható berendezése követelményeket foglalja össze;
3. a szoftver követelmények értelmezi az 1. rész általános követelményeit figyelembe véve elemzi a hardver és a szoftver összefüggéseit;
4. definíciók és használt rövidítések magyarázata;
5. példák a biztonsági szint meghatározásához szükséges módszerekről, kockázat elemzési példák és SIL szintek bemutatása;
6. iránymutatások a 2. és 3. szintek alkalmazásáról;
7. biztonságtechnikai és szoftverfejlesztési technikák leírása és a hivatkozások a forrásokra.

A szabvány rendkívül részletes, terjedelme közel 400 oldal.

BIZTONSÁGKRITIKUS SZOFTVER FEJLESZTÉS KOCKÁZATAI

A biztonságkritikus szoftver fejlesztés nagy mértékben meg van támogatva szabványokkal és eszközökkel, módszertanokkal. Ezek betartása ugyanakkor nem garantálja a megfelelő biztonsági szint elérését.

A kockázatok az alábbiak szerint sorolhatók be [3]:

- program hibák (dokumentált szoftver hibák)
  - belső hibák;
  - interfész hibák (Mars Climate Orbiter [6]);
  - funkcionális hibák;
- emberi hibák
  - kódolási és szerkesztési hibák (Mariner 1 [7][8]);
  - kommunikációs hibák a csapaton belül;
  - kommunikációs hibák a csapatok között (Mars Climate Orbiter [6], Mars Polar Lander [4][5]);
  - hiba a követelmények felismerésében;
  - hiba a követelmények feldolgozása során;
- folyamat hibák
  - nem megfelelő kód vizsgálat és tesztelési módszereket (Therac-25 [9]);
  - nem megfelelő interfész specifikációk, nem megfelelő kommunikáció a szoftver fejlesztés lépései között;
  - nem megfelelő interfész specifikációk, nem megfelelő kommunikáció a szoftver/hardver fejlesztés között;
  - nem azonosított, vagy megértett követelmények, hiányos dokumentáció;
  - nem azonosított, vagy megértett követelmények, nem megfelelő tervezés.

A biztonságkritikus szoftver funkció gazdagságának a növekedésével és a piaci igények által megkövetelt kiadási gyakoriság mellet a biztonságkritikus szoftver fejlesztés járulékos eszköz parkjának mérete és komplexitása nagyra nőtt. Eközben a fejlesztő szervezetek nagysága és összetettsége is jelentős méretűvé vált. A biztonságkritikus fejlesztés egy komplex rendszerré fejlődött, aminek a fejlesztő csoportok csak kis részére vannak rálátással. Jelentősen mennyiségű az elérhető, megvásárolható eszközök, elemek száma. Ugyan akkor az igények kielégítéséhez munkaerőhiány alakult ki. Így biztonságkritikus fejlesztésben nem jártas szakembereket is be kell vonni ilyen projektekbe. Ezek a tendenciák szükségessé teszik az emberi viselkedés és az IT rendszerek üzemeltetésének vizsgálatát a biztonságkritikus fejlesztés folyamatában.

A hamis biztonság definíciója: az, hogy valami felől meg vagyunk győződve, hogy biztonságos, miközben veszélyben vagyunk.

„Zóna" állapot definíciója: „arról a rendkívüli összpontosítást eredményező, elmélyült tudatállapotról van szó, amelybe a programozók például akkor kerülnek, amikor kódot írnak. Ebben az állapotban érezzük hatékonynak a munkánkat. Ebben az állapotban hisszük azt, hogy tévedhetetlenek vagyunk. Ezért törekszünk mindig ennek az állapotnak az elérésére és értékeljük magunkat aszerint, hogy mennyit időt vagyunk képesek az áramlási zónában eltölteni." [11]

A hamis biztonságérzet kialakulása és a „zóna" állapot jelentős mértékű jelenleg alacsonyan kezelt kockázat.

A biztonságkritikus szoftver fejlesztést megkönnyítik és felgyorsítják az automatizált folyamatok, eszközök. Ezek segítségével rendszeresen ellenőrzött és egyenletes szoftver minőség tartható, azonban ezek használata könnyen hamis biztonságérzet kialakulásához vezet. Ennek a megelőzése történhet rendszeres egyedileg injektált hibával. Ebben az esetben egy erre a célra megbízott személy vagy csoport titokban hibát helyez el a fejlesztési folyamat különböző részeiben és vizsgálják, hogy a hiba a tervezett módon az automata rendszerek detektálják-e. Ennek a folyamatnak a kritikus része az injektált hiba termékbe kerülésének korlátozása. Ez elérhető amennyiben a IT környezet fel van készítve erre. Az éles fejlesztői környezet automatizált klónozásával egy elszeparált környezetbe injektált hibákkal tesztelhető a fejlesztői környezet. Így az automatizált folyamatok működő képessége az éles forrás kódok érintése nélkül minősíthetőek.

Hamis biztonság érzetek:

- a(z) X szabványt betartjuk;
- a(z) X modell szerint dolgozunk;
- van automata tesztünk;
- van tesztelőnk;
- egyszer már működött használjuk fel újra;
- tartunk rendszeres review-t.

A „zóna” állapot elkerülésére használható a páros programozás.

A **páros programozás** definíciója szerint a programozók párban dolgoznak a szoftverfejlesztés alatt. A munkatársak együtt dolgoznak egy közös munkaállomás mellett [12][13]. A párban való programozásnak a következő előnyei vannak:

- megnövekedett fegyelemérzet;
- rugalmas munkafolyamatok, megszakítástűrés;
- jobb kódminőséget eredményez;
- mentorszellem, tudás és tapasztalatterjesztés;
- a munkatársak gyorsabban megismerik egymást;
- „zóna” állapot elkerülése.

Az IT rendszer üzemeltetése során jellemző a hamis biztonságérzet kialakulása. Ez jellemzően a helyes működés, a rendelkezésre állás és a sértetlenség körül alakul ki. Miniszterelnöki Hivatal Informatikai Koordinációs Iroda szerint egy kiadott rendelete alapján „Olyan előírások, szabványok betartásának eredménye, amelyek az információk elérhetőségét, sérthetetlenségét és megbízhatóságát érintik és amelyeket az informatikai rendszerekben vagy komponenseikben, valamint az informatikai rendszerek vagy komponenseik alkalmazása során megelőző biztonsági intézkedésekkel lehet elérni.” Az informatikai rendszerek hamis biztonság érzetének kockázata ellen fontos, hogy szervezeteknél olyan munkatárs, aki kidolgozza és rendszeresen végrehajtja a IT rendszer minősítését. Ez a minősítés magába kell, hogy foglalja az alapnak tekinthető C.I.A. és a biztonság kritikus fejlesztés támogató rendszerek kifogásolhatatlan működőképességét. Szükséges, mint az IT mind a biztonság kritikus fejlesztés monitorozása, pillanatnyi adatok megjelenítése, a tendenciák követése és a folyamatok minőségi ellőre jelzése. A monitorozás elengedhetetlen feltétele továbbá a CMMI szinteknek.

CMMI (**C**apability **M**aturity **M**odel **I**ntegration) egy szoftverfolyamat-fejlesztési modell, mely két megközelítésben (lépcsős és folytonos) mutatja meg az IT folyamatokat. A Carnegie Mellon

University fejlesztette ki, az Amerikai Védelmi Minisztérium és az USA kormányzati szerződései kötelezően elvárják [15].

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Wikipédia: IEC 61 508 (e-dok), url: https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61508
[2] Wikipédia: IEC 61 511 (e-dok), url: https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61511
[3] Robyn R. Lutz: Analyzing Software Requirements Errors in Safety-Critical, Embedded Systems ISBN:0-8186-3120-1
[4] JPL: Report on the Loss of the Mars Polar Lander and Deep Space 2 Missions2000.03.22
[5] SG: A Polar Lander sztori (e-dok), url: https://sg.hu/cikkek/it-tech/10313/a-polar-lander-sztori
[6] NASA: Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board Phase I Report 1999.11.10
[7] Wikipedia: Mariner 1(e-dok), url: https://en.wikipedia.org/wiki/Mariner_1
[8] NASA: Mariner 1 / NSSDCA ID: MARIN1 /
[9] Nancy Leveson: Medical Devices The Therac-25
[10] MISRA Compliance:2016 Achieving compliance with MISRA Coding Guidelines
[11] Robert C. Martin: Túlélőkönyv programozóknak ISBN:9789639637863
[12] Puskás Béla: A hamis biztonságérzet kialakulásának megelőzése az informatikai rendszerek üzemeltetése során 2012.11.15 ÓE Tézis füzet 2017
[13] Dr. Ulbert Zsolt: Szoftverfejlesztési folyamatok és szoftver minőségbiztosítás 2014
[14] Tóth Géza: (e-dok), url: http://astro.u-szeged.hu/szakdolg/tothgeza/fokep.html
[15] Wikipédia: CMMI (e-dok), url: https://en.wikipedia.org/wiki/Capability_Maturity_Model_Integration
[16] Prog.hu: 9 híres programozási hiba, ami katasztrófát okozott az űrben (e-dok), url: https://prog.hu/hirek/3995/9-hires-programozasi-hiba-ami-katasztrofat-okozott-az-urben

SAFETY CRITICAL SOFTWARE DEVELOPMENT

Software is a critical success factor. Nowadays, there is no more complicated technical work without hard software support. This statement is true in case of vehicles involved in transport independent of the examined area. These software elements appeared in all areas from board entertainment systems through intelligent traffic management to critical board control systems. If we apply larger number of onboard intelligent and smart systems, the crew will have less tasks and we will be able to implement such functions that were previously impossible. Unfortunately, the increasing complexity of systems increases the possibility of errors occurrence. This article describes the aspects and rules that must be followed when producing embedded systems software that performs safety critical tasks.

Keywords: *software, safety critical, development*

Dr. Schuster György (PhD) Egyetemi docens, főiskolai tanár Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670	György Schuster (PhD) College professor Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670
Ady László Hallgató Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Műszertechnikai és Automatizálási Intézet ady.laszlo@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-6702-6000	László Ady Student Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Instrumentation and automation ady.laszlo@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-6702-6000

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-11-0453_Schuster_Gyorgy-Ady_Laszlo.pdf

Baár Tamás, Bauer Péter

A REPÜLÉSI BIZTONSÁG NÖVELÉSE LEVEGŐHÖZ KÉPESTI SEBESSÉG MÁS SZENZOROKRA TÁMASZKODÓ BECSLÉSÉVEL

A cikk egy lehetséges sebességbecslő eljárást mutat be, mely a levegőhöz képesti sebesség mellett pontos információkat szolgáltat a háromdimenziós szélvektorról, állásszögről és csúszási szögről is. A módszer a repülőgép különböző repülési sebességek mellett elkészített lineáris időinvariáns egyensúlyi modelljein alapul. A sebességbecslés alapját a több modellen alapuló eljárások szolgáltatják. Az algoritmus valósághű tesztelése érdekében a bemutatott eljárás kiértékelése a NASA Airstar repülőgép számítógépes modelljén végzett szimulációk segítségével történt, mely során egy kétkörös szabályzás megvalósításával a repülőgép útvonalpont-követésre is képes. A külső kör egy PID a belső egy Lineáris Paraméter Változós (LPV) szabályozóból áll. Az utóbbi ütemezése a levegőhöz képesti sebesség mért vagy becsült értéke alapján is lehetséges. Ezáltal egy olyan, a Pitot-cső mérésétől teljesen független szabályozó rendszer alkotható meg, mely képes manőverező útvonalpont követés végrehajtására a Pitot-csöves sebességmérő rendszer teljes kiesése esetén is.

Kulcsszavak: *sebességbecslés, szélbecslés, Pitot-cső jegesedés, útvonalpont-követés, lineáris paraméter változó*

BEVEZETÉS

A repülőgépre ható aerodinamikai erők a test körüli légréteg áramlási sebességének négyzetével arányosak, ezért a sebesség pontos ismerete kulcsfontosságú a biztonságos repülés szempontjából. Az áramlás sebességét leggyakrabban Pitot-csövek segítségével mérik, melyek azonban érzékenyek a különböző fizikai behatásokra, például jegesedésre. Ezért általában több Pitot-cső felszerelése mellett döntenek, melyek egymással párhuzamos méréseket szolgáltatnak, ezáltal növelve a pontos információ rendelkezésre állásának valószínűségét. A jegesedés elkerülése érdekében fűthető Pitot-csöveket alkalmaznak. Az eddig említett fizikai megoldások mellett, az úgynevezett analitikus redundancia is egy járható út, melynek segítségével a rendszer meghibásodások elleni robosztussága tovább növelhető. A módszer alkalmazása során a repülőgép fedélzetén rendelkezésre álló számítási kapacitás kerül felhasználásra a szükséges információk meghatározása érdekében, különböző számítási algoritmusok alapján.

Levegőhöz képesti sebesség becslésére számos megoldás létezik az irodalomban. A szerzők egy modell alapú megközelítést mutatnak be [11]-ben, amely alkalmas a levegőhöz képesti sebesség, az állásszög és a csúszási szög becslésére. A módszer GPS[1], IMU[2] méréseken, és a repülőgép matematikai modelljének ismeretén alapul, ismertnek feltételezve a különböző repülőgép specifikus aerodinamikai együtthatókat. Egy nemlineáris Kalman-szűrésen alapuló eljárást ismertet [12], IMU, GPS és egy speciális szélirány szenzor segítségével. Az eljárás szenzorkinematikai

[1] GPS: Globális Pozícionáló Rendszer (Global Positioning System)
[2] IMU: Inerciális mérőegység, amely gyorsulás és szögsebesség adatokat szolgáltat (Inertial Measurement Unit)

egyenleteken alapul, és független a repülőgép modelljétől. Egy hasonló harmadik megoldást szolgáltat [8], ami szintén kinematikai összefüggéseket alkalmaz. GNSS[3], IMU, és Pitot-cső mérések segítségével képes szélsebesség, állásszög és csúszási szög becsléseket szolgáltatni.

A RECONFIGURE („REconfiguration of CONtrol in Flight for Integral Global Upset REcovery") programban (részletekért lásd [4]), a sebességbecslési eljárást úgy kellett megvalósítani, hogy a Pitot-cső, állásszög, csúszási szög mérések nem elérhetőek, valamint a repülőgép dinamikája csak adott trimm pontokban ismert, lineáris időinvariáns (LTI[4]) modellekként. Ezen megkötések alapján a korábban említett megoldások nem alkalmazhatóak, azonban egy több modellen alapuló becslő eljárás (MMAE[5]) segítségével a probléma megoldható. A megközelítés a repülésben már széles körben bizonyított a hibadetekció és identifikáció témakörében. [10]-ben repülőgép hajtómű szenzorainak meghibásodását detektálták a felhasználásával, míg [3]-ban a VISTA F-16 aktuátorainak a meghibásodását észlelték a segítségével konstans Mach szám és magasság mellett.

Hassani [5]–[7]-ben átfogóan formalizálta az MMAE megközelítést arra az esetre, amikor a rendszer LTI modellként modellezhető mely egy ismeretlen, de konstans paramétervektortól függ. Mind a mai napig főleg konstans ismeretlen paraméterek becslésére alkalmazták az MMAE megközelítést LTI rendszerek esetében. Csupán egyetlen cikk [14]és annak az alkalmazási példája [13] foglalkozik a megközelítés kidolgozásával LPV rendszerek esetére. Ezen két munkában a szerzők repülőgép jegesedési állapotának becslésével foglalkoznak. A repülőgépet LPV rendszerként modellezik, melynek dinamikája az ismert hosszirányú állapotokat tartalmazza (beleértve a sebesség komponenseket is), a modell ütemezési paramétere az ismertnek feltételezett levegőhöz képesti sebesség, valamint az ismeretlen jegesedési állapot. Ebben az esetben az ismeretlen jegesedést leíró paraméter konstans, vagy pedig lassan változó.

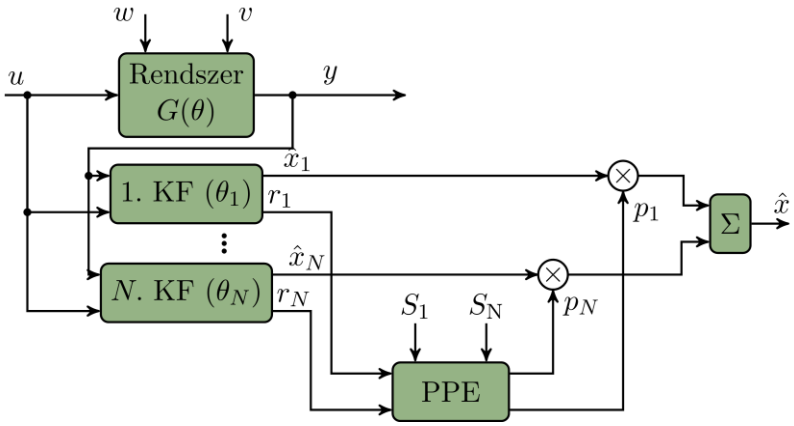
Jelen cikkben a szerzők azt vizsgálják, hogy hogyan alkalmazható az MMAE megoldás egy folytonosan változó ismeretlen paraméternek a becslésére egy repülőgépes alkalmazási példán keresztül, ahol az ismeretlen paraméter a repülőgép levegőhöz képesti sebessége. A második fejezetben bemutatásra kerül az MMAE becslő eljárás, míg a harmadik fejezet bemutatja ennek alkalmazhatóságát a levegőhöz képesti sebesség becslésére. A negyedik fejezet bemutat egy útvonalkövető robotpilóta rendszert, melyet felhasználva az ötödik fejezetben részletes szimulációk segítségével történik a becslő algoritmus kiértékelése. A hatodik fejezetben kerül összegzésre a bemutatott munka, és a fejezet egyben ki is jelöli a továbblépési irányokat.

A TÖBB MODELLRE TÁMASZKODÓ BECSLŐ MEGKÖZELÍTÉS BEMUTATÁSA

A fejezet célja, hogy áttekintést nyújtson az MMAE megközelítésről. Az érdeklődő olvasó a téma mélyebb kidolgozását többek között az [5], és [6] publikációkban találhatja. Tekintsünk egy G(θ)-val jelölt rendszert, ami az ismeretlen θ paraméter függvényében változik. Becslési feladatként a rendszer ismeretlen x_t állapotvektorát, valamint az ismeretlen paraméter értékét szeretnénk

[3]GNSS: Globális navigációs műholdrendszerek (Global Navigation Satellite Systems), GPS, GLONASS, Galileo, BEIDOU, SBAS, QZSS.
[4]LTI: Linear Time Invariant
[5]MMAE: Multiple Model Adaptive Estimation

meghatározni. Abban az esetben, ha a rendszerdinamika ismert az ismert (u_t) bemenetek és (y_t) kimenetek függvényében egy adott θ érték mellett, akkor lehetőségünk van LTI modellek készítésére az adott θ paraméterértékek mellett. N darab eltérő θ érték mellett elkészített LTI modell segítségével a rendszerdinamika egy kiválasztott tartománya lefedhető. Így állapot megfigyelők tervezésével lehetségessé válik az ismeretlen G(θ) rendszer állapotainak és a θ paraméter értékének a becslése. Az 1. ábra részletesen bemutatja a több modellen alapuló becslő felépítését.



1 ábra A több modellen alapuló becslő felépítése

A paraméterfüggő MIMO[6] LTI rendszerek adott θ paraméterérték mellett a következő egyenletekkel írhatóak le

$$\begin{aligned} x_{i,t+1} &= A_i x_{i,t} + B_i u_t + W_i w_t, \\ y_{i,t} &= C_i x_{i,t} + D_i u_t + V_i v_t, \end{aligned} \tag{1}$$

ahol $x_{i,t} \in \mathbb{R}^n$ jelöli a rendszer állapotait, $u_t \in \mathbb{R}^m$ a rendszer bemenete, $y_{i,t} \in \mathbb{R}^p$ a mért zajos kimenet, $w_t \in \mathbb{R}^r$ a rendszer nem mérhető bemeneti zavarása, és $v_t \in \mathbb{R}^q$ a mérési zaj. A w_t és v_t vektorok nulla várható értékű Gauss eloszlású sorozatok, amik egymással korrelálatlanok, $E[w_t; w_\tau] = Q_{t\tau}$ és $E[v_t; v_\tau] = R_{t\tau}$ kovarianciákkal. Az $x_{i,0}$ kezdeti feltétele (1)-nek egy Gauss eloszlású véletlen vektor $E\{x_{i,0}\} = x_{i_0}$ átlaggal és $E\{x_{i,0}x_{i,0}^T\} = P_i(0)$ kovarianciával. Az A_i, B_i, W_i, C_i, D_i, és V_i az ismeretlen (θ_i) paraméter függvényei i indexeléssel. Számos esetben a $W_i = I$ és $V_i = I$ feltételezés megtehető. A t és $t+1$ jelölések egymás után következő diszkrét időlépéseket jelölnek.

A becslési feladat megoldásához állandósult állapotú Kálmán-szűrőket (KF) használunk, melyek egyenletei az alábbi alakot öltik

$$\begin{aligned} \bar{x}_{i,t+1} &= A_i \hat{x}_{i,t} + B_i u_t, \\ \hat{x}_{i,t+1} &= \bar{x}_{i,t+1} + L[y_{t+1} - C_i \bar{x}_{i,t+1}]. \end{aligned} \tag{2}$$

Minden becslő egy $\hat{x}_{i,t}$ állapotbecslést szolgáltat ahol $i = 1 \ldots N$. Ahogy az 1. ábra szemlélteti a végleges állapotbecslést ($\hat{x}_t$) a (3)-mal adott összefüggés szolgáltatja, mint az $\hat{x}_{i,t}$ állapotbecslések súlyozott összege

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^{N} p_{i,t} \hat{x}_{i,t}. \tag{3}$$

[6]MIMO: Több bemenetű, több kimenetű rendszer (Multiple – Input, Multiple – Output)

A $p_{i,t}$, $i = 1 \ldots N$ súlyok a posteriori valószínűség számító blokkban (PPE[7]) kerülnek kiszámításra. Ahogy az 1. ábra is mutatja a blokk bemeneteit az $r_{i,t+1} = y_{t+1} - \bar{y}_{i,t+1|t}$ i=1...N reziduál vektorok (ahol $\bar{y}_{i,t+1|t} = C_i \bar{x}_{i,t+1}$), valamint az S_i reziduál kovarianciák szolgáltatják az egyes becslőre voatkozóan. [5]–ben a dinamikus súlyok egy rekurzív formulával számíthatóak

$$p_{i,t+1} = \frac{\beta_i e^{-f_{t+1}^i}}{\sum_{j=1}^{N} p_{j,t} \beta_j e^{-f_{t+1}^j}} p_{i,t}, \tag{4}$$

ahol $p_{i,t}$ az a-priori modell valószínűségeket jelöli ($p_{i_0} = 1/N$ kezdeti értékkel), és f_t^i valamint β_i az

$$\begin{aligned} f_{t+1}^i &= \\ &= \left[y_{t+1} - \bar{y}_{i,t+1|t}\right]^T S_i^{-1} \underbrace{\left[y_{t+1} - \bar{y}_{i,t+1|t}\right]}_{r_{i,t+1}} = \\ &= r_{i,t+1}^T S_i^{-1} r_{i,t+1}, \end{aligned} \tag{5}$$

$$\beta_i = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{p}{2}} \sqrt{|S_i|}} \tag{6}$$

öszefüggésekkel adhatóak meg, ahol p az $y(t)$ dimenziója és S_i az állandósult állapotban vett reziduál kovariancia mátrixa az i. Kálmán-szűrőnek. S_i a következőképp definiálható

$$S_i = C_i P_i C_i^T + R_i. \tag{7}$$

Itt P_i a kapcsolódó Riccati egyenletből számított állandósult állapotbeli állapotbecslési hiba kovariancia mátrixát jelöli az i. Kálmán-szűrőnek. A reziduál vektorok az állandósult állapotban vett kovariancia mátrixuk inverzével kerülnek skálázásra. A $\beta_i e^{-f_{t+1}^i}$ tag egy többváltozós Gauss eloszlású valószínűségi sűrűségfüggvényt jelöl. [5]-ben a szerzők bebizonyítják, hogy a p_i feltételes valószínűsége annak a becslőnek fog 1-hez konvergálni, amelyikhez tartozó θ_i paraméter a legközelebb esik a vizsgált valós rendszer ismeretlen θ paraméteréhez. Ezzel párhuzamosan a többi becslő valószínűsége 0-ba fog konvergálni állandósult állapotban.

A TÖBB MODELLRE TÁMASZKODÓ BECSLŐ ALKALMAZÁSA SEBESSÉGBECSLÉSRE

Általános áttekintés

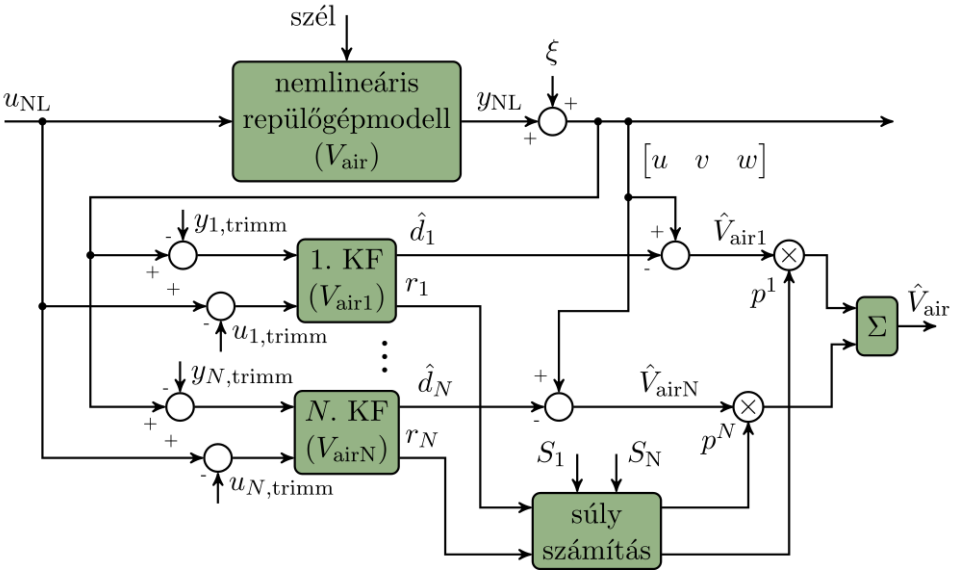
Ez a fejezet azt mutatja be, hogy hogyan lehet a korábban ismertetett MMAE eljárást felhasználni repülőgép levegőhöz képesti sebességének becslésére. Az aerodinamikai felületeken ébredő erők a dinamikus nyomással, és ezen keresztül a levegőhöz képesti sebesség négyzetével arányosak. A kapcsolatot a levegőhöz képesti (V_{air}) és a földhöz képesti (a GPS által mért, V_{ground}) sebesség között a szélháromszög teremti meg, figyelembe véve a szél (V_{wind}) zavaró hatását

$$V_{\text{air}} = V_{\text{ground}} - V_{\text{wind}}. \tag{8}$$

Az elkövetkezőkben mindhárom sebességet háromdimenziós vektorokként vesszük figyelembe. A 2. ábra szemlélteti a sebességbecslő felépítését. A repülőgépet egy nemlineáris rendszerként

[7]PPE: Posterior Probability Evaluator

modellezzük, ami az aktuális levegőhöz képesti sebességtől függ. A modell egy később bemutatott nemlineáris szabályozótól kapja az irányító bemeneteket (u_{NL}), és egy ismeretlen háromdimenziós szélzavarás is hat rá. A modell kimeneteit (y_{NL}) valamekkora mérési zaj (ξ) terheli.



2. ábra Több modellen alapuló becslő levegőhöz képesti sebesség becslésére

A becslés során a vizsgált sebességtartományt N részre osztottuk. A bemutatott megközelítésben az intervallumok egyenletes lépésközzel kerültek kiosztásra, azonban a későbbiekben az intervallumhatárok figyelembevételére kifinomultabb megközelítések ajánlatosak a jobb teljesítmény elérése érdekében, például ahogy [6]-ban is bemutatják. Minden intervallumhoz tartozik egy LTI Kálmán-szűrő, amely az adott sebesség mellett a legjobban írja le a repülőgép dinamikáját. Mivel a szélzavarást háromdimenziós vektorként szeretnénk megbecsülni, ezért a becsléshez felhasznált modellek a repülőgép hossz- és keresztdinamikáját egyaránt tartalmazzák. A szűrőket (1) alapján terveztük, figyelembe véve az ismeretlen $\hat{d}_i$ szélvektort

$$\begin{aligned} x_{i,t+1} &= A_i x_{i,t} + B_i u_t + G_i d_t + W_i w_t \\ y_{i,t} &= C_i x_{i,t} + D_i u_t + H_i d_t + V_i v_t. \end{aligned} \tag{9}$$

Az egyenletben G_i és H_i paraméterfüggő mátrixok, amelyek a szél hatását írják le az állapotokra és a mérésekre vonatkozóan. A szelet lassan változó zavarásként vesszük figyelembe, ami a rendszerdinamika alábbi kibővítésével modellezhető:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{i,t+1} \\ d_{i,t+1} \end{bmatrix} &= \overbrace{\begin{bmatrix} A_i & G_i \\ 0 & I \end{bmatrix}}^{\tilde{A}_i} \begin{bmatrix} x_{i,t} \\ d_{i,t} \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix}}^{\tilde{B}_i} u_t + \overbrace{\begin{bmatrix} W_i & 0 \\ 0 & W_{d_i} \end{bmatrix}}^{\tilde{W}_i} \begin{bmatrix} w_{i,t} \\ w_{d_i,t} \end{bmatrix}, \\ y_t &= \overbrace{\begin{bmatrix} C_i & H_i \end{bmatrix}}^{\tilde{C}_i} \begin{bmatrix} x_{i,t} \\ d_{i,t} \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} V_i & 0 \\ 0 & V_{d_i} \end{bmatrix}}^{\tilde{V}_i} \begin{bmatrix} v_{i,t} \\ v_{d_i,t} \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{10}$$

Az LTI Kálmán-szűrőket (2) alapján tervezhetjük meg, $\tilde{A}_i$, $\tilde{B}_i$, $\tilde{C}_i$, $\tilde{W}_i$, $\tilde{V}_i$ behelyettesítésével a megfelelő mátrixokba. A szélsebesség becslések ($\hat{d}_i$) birtokában, az egyes szűrők levegőhöz képesti sebesség becslései a (8)-ban bemutatott szélháromszög alapján a $\hat{V}_{\mathrm{air,i}} = V_{\mathrm{ground}} - \hat{d}_i$ összefüggéssel számíthatóak. Az algoritmus által becsült sebesség ($\hat{V}_{\mathrm{air}}$), az egyes sebesség

becslések valószínűségekkel súlyozott összege, hasonlóan ahhoz ahogyan ez (3) - ban is történt. A szűrőkhöz tartozó valószínűségeket a megfelelő reziduálok és kovariancia mátrixok segítségével számítjuk. A súlyozó algoritmus stabilabb konvergenciája érdekében a (4)–(6) egyenletek módosításra kerültek. Az elkövetkező alfejezetek megmutatják, hogy miből áll a módosítás és, hogy a korábban említett konvergencia kritériumok a rendszer állandósult állapota esetében a módosított összefüggésekre is teljesülnek.

Állandósult állapotbeli konvergencia

A korábbi fejezetekben bemutatásra került az (5) becslési hibát jellemző függvény, illetve a súlyok rekurzív számítását leíró (4) összefüggés. Ezen összefüggések felhasznált, módosított alakja

$$\begin{aligned} f_t^i &= \frac{1}{2} q r_{i,t}^T S_i^{-1} r_{i,t}, \\ p_{t+1}^i &= \frac{e^{-f_t^i}}{\sum_{j=1}^N p_t^j e^{-f_t^j}} p_t^i, \end{aligned} \tag{11}$$

ahol q egy súlyozó konstans, $r_{i,t}$ az i. szűrő reziduál vektora, és S_i^{-1} egy pozitív definit súlyozó mátrix. f_t^i továbbra is a becslési hibákat jellemző függvény, p_t^i pedig azt a valószínűséget jelöli, hogy az adott időpillanatban az i. szűrő a legvalószínűbb. A reziduálok a következőképp számíthatóak

$$r_{i,t} = y_{NL,t} - \bar{y}_{i,t+1|t} - y_{i_{trim}}, \tag{12}$$

ahol $y_{NL,t}$ a nemlineáris rendszer mérés vektora, $\bar{y}_{i,t+1|t}$ az i. szűrő prediktált kimenete, $y_{i_{trim}}$ pedig az adott szűrőhöz tartozó trimm ponti korrekciós érték. Az elkövetkezőkben a már létező szakirodalom alapján bemutatásra kerül, hogy a (11)-el jellemzett összefüggések szintén alkalmazhatóak. A szakirodalommal összhangban feltételezzük, hogy a repülőgép a tranziensek lecsengése után stabil egyensúlyi állapotba kerül (vízszintes konstans sebességű repülés), és így az ismeretlen paraméter értéke konstans lesz. Ezekben az esetekben a $\lim_{t\to\infty}$ határérték vizsgálható a levezetések során. Későbbi kutatási terület annak vizsgálata, hogy folyamatosan változó paraméter esetén milyen konvergencia kritériumok adhatóak meg a rendszerre vonatkozóan.

A tény, hogy a szűrőkhöz tartozó valószínűségek összege 1 minden időpillanatban, ha ez a kezdeti értékeikre is teljesült egyszerűen belátható az [5]-ben található első tétel segítségével, így ez itt nem kerül bizonyításra.

Az állítás, hogy a (11)-ben bemutatott f_t^i felhasználható a számítások során, az alábbiak szerint bizonyítható.

Első megközelítés a valószínűségek álandósult állapotbeli konvergenciájának bizonyítására

Az első megközelítés [5]-ön alapszik. A hivatkozott cikkben a szerzők feltételezik, hogy az egyik szűrő az ismeretlen paraméter aktuális értéke mellett készült. Egy repülőgép esetében ez a megkötés csak abban az esetben érvényes, ha a repülőgép az egyik szűrőtervezéshez kiválasztott trimm pontban repül. A cikkben kimondott 2. tétel a következőképp módosítható.

Tétel:

Jelölje $i^* \in \{1,2,\dots,N\}$ index a θ különböző értékeihez tartozó parameterértékeket, és legyen $\Upsilon := \{1,2,\dots N\}\backslash i^*$ egy index halmaz. Tegyük fel hogy léteznek n_1, t_1, ε pozitív konstansok, hogy minden $t > t_1$ és $n > n_1$ esetén az alábbi feltétel teljesül

$$\frac{1}{n}\sum_{\tau=t}^{t+n-1}\left(f_\tau^{i*}+\varepsilon\right) < \frac{1}{n}\sum_{\tau=t}^{t+n-1}\min_{j\in\Upsilon} f_\tau^j. \tag{13}$$

Ekkor ha $t \to \infty$, akkor $p_t^{i*} \to 1$ a (11) összefüggésben.

A (13) egyenletet átrendezve az alábbi összefüggést kapjuk,

$$\frac{1}{n}\left[\sum_{\tau=t}^{t+n-1}\left(f_\tau^{i*}+\varepsilon\right) - \sum_{\tau=t}^{t+n-1}\min_{j\in\Upsilon} f_\tau^j\right] < -\gamma < 0, \tag{14}$$

ahol γ egy létező pozitív szám, ami felső korlátként szolgál.
Bizonyítás:

Jelölje a paraméter aktuális értékéhez tartozó szűrőt $*$ index. Definiáljuk a j. ($j \in \Upsilon$) és az aktuális paraméterhez tartozó szűrők valószínűségeinek arányát a következőképp

$$P_{i_t^*}^j = \frac{p_t^j}{p_t^{i*}}. \tag{15}$$

Mivel $*$ a legpontosabb szűrőhöz tartozik, ezért a p_t^{i*} valószínűség értékének mindig a legmagasabbnak kell lennie, és így $P_{i_t^*}^j$ mindig 1 alatti érték. A (11) összefüggés alapján

$$p_t^i = p_0^i \prod_{\tau=0}^{t-1} \frac{e^{-f_\tau^i}}{\sum_{j=1}^N p_\tau^j e^{-f_\tau^j}} p_\tau^i \tag{16}$$

amiből következik hogy

$$P_{i_{t+n}^*}^j = \left[\prod_{\tau=t}^{t+n-1} \frac{e^{-f_\tau^j}}{e^{-f_\tau^{i*}}}\right] P_{i_t^*}^j. \tag{17}$$

Mindkét oldal logaritmusát véve,

$$\begin{aligned} & ln\frac{P_{i_{t+n}^*}^j}{P_{i_t^*}^j} = \sum_{\tau=t}^{t+n-1} ln(e^{-f_\tau^j}) - \sum_{\tau=t}^{t+n-1} ln(e^{-f_\tau^{i*}}) = \\ = \quad & \sum_{\tau=t}^{t+n-1} f_\tau^{i*} - \sum_{\tau=t}^{t+n-1} f_\tau^j \le \sum_{\tau=t}^{t+n-1}\left(f_\tau^{i*}+\varepsilon\right) - \sum_{\tau=t}^{t+n-1} f_\tau^j \le \\ & \le -n\gamma < 0. \end{aligned} \tag{18}$$

A (14) egyenlet egy felső határt szolgáltat arra az esetre ha az f_τ^{i*} függvényt a Υ halmazból hozzá legközelebb eső f_τ^j függvénnyel hasonlítjuk össze. Az ε tag bevezetésével (18) hasonló alakú lesz (14)-hez, de a különbség nagyobb lehet mint $-\gamma$ mert a minimum feltételt nem alkalmaztuk f_τ^j-re. Ezek alapján (18) állítása az alábbiak szerint fogalmazható meg

$$ln\frac{P_{i_{t+n}^*}^j}{P_{i_t^*}^j} \le -n\gamma \tag{19}$$

vagy

$$P^{j}_{i^*_{t+n}} \leq e^{-n\gamma} P^{j}_{i^*_t}. \tag{20}$$

Ennek oka, hogy (13)-ban a különbség a jobb és bal oldal között legalább γ, amíg (18) ennek n szeres értékét írja le.

Ez azt jelenti hogy $P^{j}_{i^*_t} = \frac{p^j_t}{p^{i^*}_t}$ nullához konvergál minden $j \in \Upsilon$ esetén, ahogy $n \to \infty$. Mivel a kezdeti $\sum_{i=1}^{N} p^i_0 = 1$ ezért a valószínűségek említett konvergencia tétele szerint $p^j_t \to 0$ és $p^{i*}_t \to 1$. Ez a megközelítés bemutatta, hogy az aktuális paraméterértékre tervezett szűrőhöz tartozó valószínűség a becslők állandósult állapotában egyhez fog konvergálni. A következő megközelítés feloldja azt a megkötést hogy a megtervezett szűrőcsaládnak tartalmaznia kell az aktuális paraméterértékhez tartozó szűrőt, és azt bizonyítja be, hogy a legközelebbi paraméterérték mellett megtervezett becslőhöz tartozó valószínűség fog egyhez konvergálni.

Második megközelítés a valószínűségek álandósult állapotbeli konvergenciájának bizonyítására

A második megközelítés a [7] cikken alapul. A szerzők a becslő algoritmus konvergenciáját valószínűségi sűrűségfüggvények segítségével elemzik. Ebben az alfejezetben az említett cikk alapján bemutatásra kerül, hogy a valószínűségi sűrűségfüggvények helyett egy általánosabb exponenciális függvény is megfelelő választás lehet a súlyozó algoritmus számára, abban az esetben ha magasabb értékeket rendel a pontosabb becslőkhöz. Az előbb elmondottakat szem előtt tartva, (11) felhasználásával minden becslőhöz meghatározhatunk egy L_i tényezőt az alábbiak szerint

$$L_i = \prod_{\tau=1}^{t} e^{-\frac{1}{2} q r^T_{i,\tau} S_i^{-1} r_{i,\tau}} = \prod_{\tau=1}^{t} e^{-f^i_\tau}. \tag{21}$$

Az elkövetkezőkben tegyük fel hogy a j. becslő pontosabb az i. becslőnél. Ezek után (11) és (21) felhasználásával meghatározhatjuk a k^j_i és K^j_i arányokat

$$\begin{aligned} k^j_i &= \frac{e^{-\frac{1}{2} q r^T_{j,t} S_j^{-1} r_{j,t}}}{e^{-\frac{1}{2} q r^T_{i,t} S_i^{-1} r_{i,t}}}, \\ K^j_i &= \frac{L_j}{L_i} = \prod_{\tau=1}^{t} \frac{e^{-\frac{1}{2} q r^T_{j,\tau} S_j^{-1} r_{j,\tau}}}{e^{-\frac{1}{2} q r^T_{i,\tau}) S_i^{-1} r_{i,\tau}}}. \end{aligned} \tag{22}$$

Ha a j. becslő a nagyobb valószínűséggel pontos, akkor ezen arányok értéke magasabb mint 1. Mindkét oldal logaritmusát véve

$$\begin{aligned} log(k^j_i) &= log(e^{-\frac{1}{2} q r^T_{j,t} S_j^{-1} r_{j,t}}) - log(e^{-\frac{1}{2} q r^T_{i,t} S_i^{-1} r_{i,t}}), \\ log(K^j_i) &= log(L_j) - log(L_i), \end{aligned} \tag{23}$$

miközben

$$log K^j_i = \sum_1^t log k^j_i. \tag{24}$$

A következő lépésben határozzuk meg a (23)-ban szereplő első egyenlet várható értékét

$$\lim_{t\to\infty} \frac{1}{t} \sum_1^t log k^j_i = E\{log(k^j_i)\} = -\overbrace{\frac{q}{2} tr(S_j^{-1} S_j^*)}^{\Gamma^*_j} + \overbrace{\frac{q}{2} tr(S_i^{-1} S_i^*)}^{\Gamma^*_i} = \Gamma^*_i - \Gamma^*_j. \tag{25}$$

A $*$ jelölés ismét a paraméter pontos értékét szimbolizálja, és S_i^* a becslés kovarianciája amikor a pontos paraméter a $*$, de a becslőt az i. paraméter értékére terveztük. Az S_j^* hasonlóan értendő, további részletek [7]-ben találhatóak. A q paraméter egy hangoló konstans, melynek értéke minden becslő esetében azonos. Γ_i^* egyfajta logaritmikus távolságként is értelmezhető a helyes * és az i. paraméterérték között, és így (25) egy logaritmikus távolságot ad meg az i. és j. paraméter között.

Tétel:

Az előbieket szem előtt tartva az alábbi állítást tehetjük:

$$\lim_{t\to\infty} K_i^j = 0 \quad ha \quad \Gamma_i^* \leq \Gamma_j^*. \tag{26}$$

Az állítás úgy foglalható össze, hogy a K_i^j által definiált arány akkor és csak akkor tart nullához ha az i. paraméterérték közelebb van a valóshoz (kisebb a távolsága) mint a j. paraméter.

Bizonyítás:

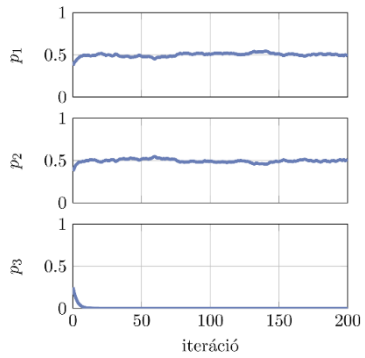
$$\lim_{t\to\infty} logK_i^j = \lim_{t\to\infty} \sum_{n=1}^{t} logk_i^j = \lim_{t\to\infty} t \overbrace{\lim_{t\to\infty} \frac{1}{t}\sum_{n=1}^{t} logk_i^j}^{E\{logk_i^j\}} = \lim_{t\to\infty} tE\{logk_i^j\} =$$

$$= \lim_{t\to\infty} t\left(\Gamma_i^* - \Gamma_j^*\right) = -\infty \tag{27}$$

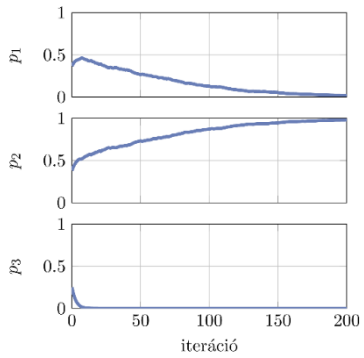
A bizonyítás könnyen megadható a K_i^j végtelenben vett határértékének meghatározásával. A logaritmus tulajdonságai alapján felhasználjuk a (24) összefüggést, majd (25)-el összehasonlítva a kapott eredmény t szerese a $logk_i^j$ várható értékének. Ha az i. paraméter pontosabb, akkor a Γ_i^* kisebb, és így egy negatív értéknek vesszük a végtelen szeresét.

Az előbbi bizonyítás értelmében $K_i^j = 0$ ha az i. becslő a pontosabb. Az f_t^j függvénynek csak pozitív értékei lehetnek (mivel egy kvadratikus alakú függvényről van szó, melyben egy pozitív definit súlyozó mátrix is szerepel), valamint a K_i^j tag csak akkor konvergálhat nullába, ha a számlálója nullába konvergál ($\lim_{t\to\infty} e^{-f_t^j} = 0$). Ez akkor lehetséges ha a j. becslőnek magasabb reziduál értékei vannak. Ha az $e^{-f_t^j}$ nullába tart, akkor a (11) alapján a hozzá tartozó p_t^j valószínűség is nullába fog tartani. Ebben az esetben a legpontosabb becslőhöz tartozó valószínűség egyhez fog tartani.

A fenti két levezetés megmutatja, hogy a módosított becslő algoritmus a megfelelő súlyokat fogja az adott becslőkhöz rendelni ahogy $t \to \infty$. Azonban ez csak akkor igaz, ha az f_t^j függvények különböző becslők esetében eltérő értékeket vesznek fel. A becslő algoritmus egyensúlyt találhat és azonos 0,5; 0,5 valószínűséget rendelhet két eltérő becslőhöz, ha a hozzájuk tartozó f_t^j függvények közel azonos értéket vesznek fel egy hosszabb időtávon keresztül. Ez valós repülések során is megtörténhet, ahogy a 19. ábra szemlélteti később. Ez a jelenség könnyen reprodukálható szimulációk segítségével ami a (11) egyenletet iterálja, $f_t^1 = 0{,}2 + rand_1$, $f_t^2 = 0{,}2 + rand_2$, $f_t^3 = 0{,}6 + rand_3$ értékekkel, ahol rand egy egyenletes eloszlású véletlen szám a [0; 0,05] intervallumban. Abban az esetben ha a függvények értékét módosítjuk, hogy egy jelentősebb különbség legyen köztük ($f_t^1 = 0{,}21 + rand_1$, $f_t^2 = 0{,}19 + rand_2$, $f_t^3 = 0{,}6 + rand_3$), az algoritmus már konvergálni fog. A 3. és 4. ábra szemlélteti az előbb elmondottakat.



3. ábra A valószínűségek azonos konvergenciája



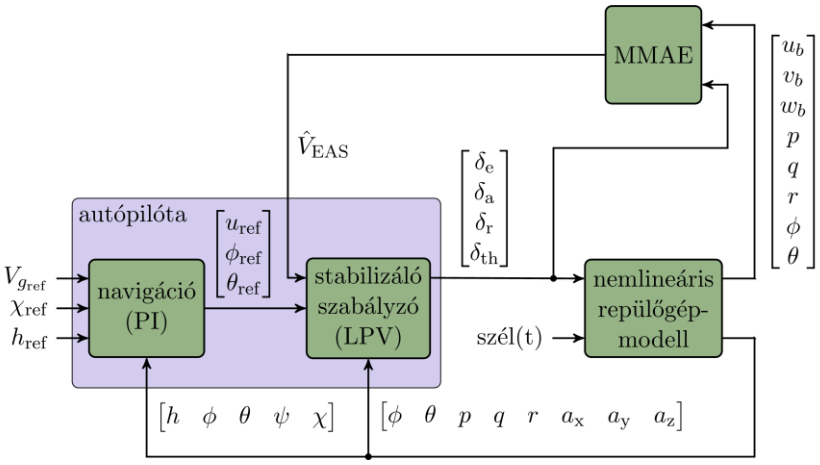
4. ábra A valószínűségek konvergenciája

Amikor a repülőgép gyorsul, az ismeretlen paraméter értéke folyamatosan változik. Későbbi munkákban egy performancia korlátot szeretnénk adni a becslő pontosságára a repülőgép gyorsulása alapján.

ÚTVONAPLONT KÖVETŐ SZABÁLYZÁS

Általános áttekintés

A repülőgép robotpilóta rendszerek általában sebesség függőek, mivel eltérő repülési sebesség mellett változik a repülőgép kívánt viselkedéséhez szükséges bemenőjel nagysága. Ez azt jelenti, hogy a robotpilóta rendszernek szüksége van a pontos levegőhöz képesti sebesség visszacsatolására. A következőkben egy útvonalpont követést megvalósító robotpilóta rendszer kerül bemutatásra. A korábbi fejezetekben ismertetett sebességbecslést sikeresnek tekintjük, ha a mért, visszacsatolt sebességet a visszacsatoló ágban helyettesíteni lehet a becsült sebességgel.



5. ábra Az robotpilóta rendszer felépítése

A rendszer teljes felépítését az 5. ábra szemlélteti. A repülőgép irányító bemenetét a stabilizáló LPV[8] szabályozó szolgáltatja. A szabályozó ütemezése az Ekvivalens levegőhöz képesti sebesség (EAS[9]) alapján történik. Az LPV szabályozó és a repülőgép modell összekapcsolását belső körnek nevezzük a későbbiekben.

[8]LPV: Lineáris Paraméter Változós rendszer (Linear Parameter-varying)
[9]EAS: Ekvivalens levegőhöz képesti sebesség (Equialent airspeed)

6. ábra A NASA Airstar repülőgép [15]

A navigációs szabályozó földhöz képesti sebesség ($V_{\mathrm{g\,ref}}$), irányszög (χ_{ref}) és magasság (h_{ref}) referenciát követ és orientáció valamint sebesség referenciákat szolgáltat az LPV szabályozó részére. A navigációs szabályozó és a belső kör összekapcsolását külső körnek nevezzük a későbbiekben.

Szimulációs környezetnek a NASA által kifejlesztett Airstar repülőgépmodellt használtuk. Ez, a 6. ábrán látható repülőgép a Boeing 757 utasszállító egy dinamikusan kicsinyített változata. A modell 46 000 szélcsatorna mérés alapján készült, és egy részletes nagy megbízhatóságú nemlineáris szimulációval rendelkezik, MATLAB Simulink környezetben. Az érdeklődők a modell részletes leírását [9]-ben találják.

A navigációs szabályozó

Ez a fejezet a külső kör felépítésébe enged bepillantást, amely az útvonalpont követésért felelős. A szabályozó 3 referencia jelet követ és referenciákat szolgáltat a belső kör számára. Minden útvonalpontot 4 koordináta ír le, három térbeli és egy földhöz képesti sebesség referencia.

Földhöz képesti sebesség referencia számítása

Az robotpilóta rendszer a repülőgép test koordinátarendszerben értett földhöz képesti sebességének hosszirányú komponensét (u) szabályozza. A referencia bemenet az útvonalponthoz rendelt földhöz képesti sebesség referencia. A repülőgép aktuális orientációja és kívánt repülési iránya alapján a belső kör számára a sebességreferencia a következőképp számítható.

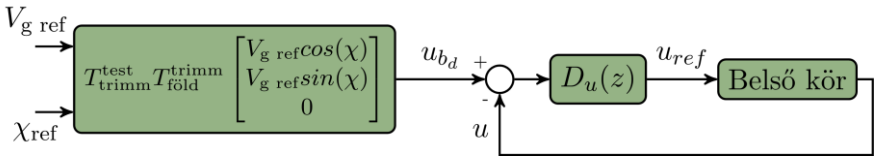
Az aktuális irány (χ) és sebességreferencia ($V_{\mathrm{g\,ref}}$) alapján a kívánt test koordináta rendszeren lévő sebességreferencia vektor az

$$\begin{bmatrix} u_{b_d} \\ v_{b_d} \\ w_{b_d} \end{bmatrix} = T_{\mathrm{trimm}}^{\mathrm{test}} T_{\mathrm{föld}}^{\mathrm{trimm}} \begin{bmatrix} V_{\mathrm{g\,ref}} cos(\chi) \\ V_{\mathrm{g\,ref}} sin(\chi) \\ 0 \end{bmatrix}, \tag{28}$$

összefüggéssel adható meg, ahol $T_{\mathrm{trimm}}^{\mathrm{test}}$ és $T_{\mathrm{föld}}^{\mathrm{trimm}}$ forgatási mátrixokat jelölnek a trimmből a test, valamint a földből a trimm koordinátarendszerekbe. A forgatásokról részletek [2]-ben találhatóak. A fent említett egyenletben kis pályaszöget vettünk figyelembe, ezért annak hatását elhanyagoltuk. A földhöz képesti sebességvektor test rendszerbe transzformált első elemét kiválasztva kapható meg a külső kör által követendő sebesség referencia, melynek követését egy PI szabályozó végzi, ami az alábbi diszkrét átviteli függvénnyel adott

$$D_u(z) = K_{p,v} + \frac{TK_{i,v}}{1-z^{-1}}. \tag{29}$$

A $K_{p,v}$, $K_{i,v}$ paraméterek az arányos és integráló tagok erősítését jelölik, míg T a mintavételi időt. A belső körben lévő H_∞ LPV szabályozó önmagában nem alkalmas referenciajel követésre, ezért a külső körben kellett egy PI integráló szabályozót alkalmazni. A szabályozó kimenete egy sebesség referencia a belső kör számára. A nem kívánt túl nagy sebességreferencia értékek elkerülése érdekében a PI szabályozó egy anti-windup struktúrával lett kiegészítve. Mivel így a földhöz képesti sebességet szabályozzuk a levegőhöz képesti helyett, így ez a megközelítés nem nyújt védelmet az átesés ellen. A későbbiekben további védelmeket kellhet beépíteni elkerülendő a repülőgép átesését. A sebességreferencia követés összegzése a 7. ábrán látható.



7. ábra Földhözképesti sebesség referencia követés

Irányszög referencia követés

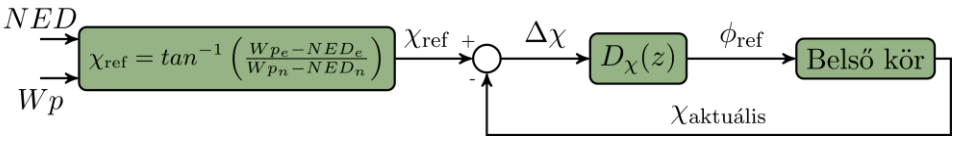
A navigációs szabályozó irányszög követésért felelős alrendszere bedöntési szög referenciát (ϕ_{ref}) szolgáltat a belső kör számára, az aktuális irányszög és az elérendő útvonalpont elhelyezkedése alapján. Ez a kör felelős az útvonalpontok vízszintes síkban történő követéséért. Első lépésként egy irányszög referencia (χ_{ref}) kerül meghatározásra az aktuális pozíció és az elérendő útvonalpont alapján, ami megmutatja, hogy milyen irányba kell repülni az útvonalpont felé. Ez a

$$\chi_{\text{ref}} = tan^{-1}\left(\frac{Wp_e - NED_e}{Wp_n - NED_n}\right), \tag{30}$$

összefüggéssel tehető meg, ahol Wp az útvonalpont (Waypoint), NED a repülőgép pozíció North, East, Down koordináta rendszerben[10], az e, n indexek a keleti és északi komponenseket jelölik. Ezt követően egy irányszög eltérés ($\Delta\chi$) kerül kiszámításra az aktuális és a referencia irány közt, $\pm 180^o$ közé konvertálva. A kívánt bedöntési szöget (ϕ_{ref}) egy diszkrét PI szabályozó számítja ki, mely az alábbi átviteli függvénnyel jellemezhető

$$D_\chi(z) = K_{p,\chi} + \frac{TK_{i,\chi}}{1 - z^{-1}}. \tag{31}$$

Itt $K_{p,\chi}$, $K_{i,\chi}$ az arányos és integráló tagok erősítései, T pedig az időállandó. A túl nagy bedöntési szögek elkerülése érdekében, anti-windup került alkalmazásra. A folyamatot a 8. ábra szemlélteti.

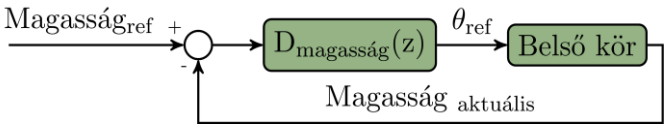


8. ábra Földhözképesti sebesség referencia követés

[10]North, East, Down koordinátarendszer: A repülésben általánosan elfogadott Észak, Kelet, Le irányítású koordinátarendszer

Magasság referencia követés

A magasság referenciát egy egyszerű PI szabályozó követi, ahol a referenciajel az útvonalponthoz rendelt magasság. Az integráló tag szintén anti-windup segítségével kerül korlátozásra, és a szabályozó bólintási szög referenciát szolgáltat, mely a 9. ábrán látható.



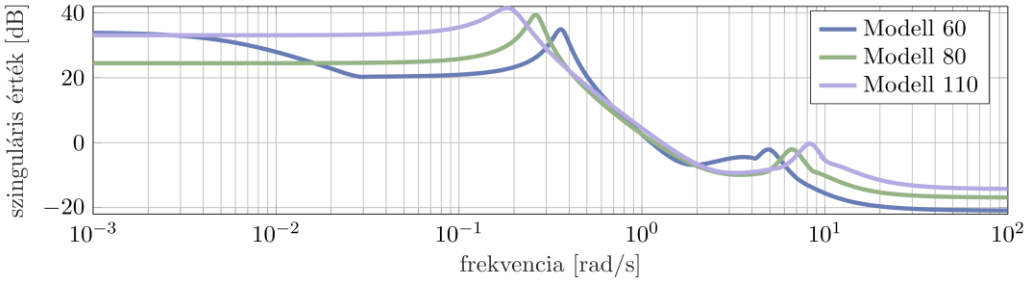
9. ábra Földhözképesti sebesség referencia követés

Stabilizáló belső szabályozó

A stabilizáló szabályozó egy a paraméter tartomány felosztásával elkészített LPV szabályozó. A kívánt sebességtartomány 60 és 110 kts között terül el, ami három modell segítségével került lefedésre 60, 80 és 110 kts melletti vízszintes, egyenes vonalú repülés mellett kitrimmelve. A modellek a hossz- és keresztdinamikát is tartalmazzák, azonban a kereszthatások eltávolításra kerültek. Az állapot (x), a bemenet (u) valamint a mérési (y) vektorok az egyes LTI rendszerekre a következőek

$$\begin{aligned} x = \quad & [u_b \quad v_b \quad w_b \quad p \quad q \quad r \quad \phi \quad \theta]^T, \\ u = \quad & [\delta_{\text{magassági}} \quad \delta_{\text{csűrő}} \quad \delta_{\text{oldal}} \quad \delta_{gázkar} \quad d_u \quad d_v \quad d_w]^T, \\ y = \quad & [a_x \quad a_y \quad a_z \quad p \quad q \quad r \quad \phi \quad \theta]^T. \end{aligned} \tag{32}$$

Az állapotvektor tartalmazza a háromdimenziós földhöz képesti sebesség koordinátákat test koordináta rendszerben, a szögsebességeket valamint az orsózási és bólintási Euler szögeket. Az ismert bemenetek a magassági kormány, a csűrőkormány, oldalkormány és gázkar állás pozíciók, amiket a három ismeretlen, test-koordinátarendszerben értelmezett szélsebesség komponenssel egészítünk ki. A mérési vektor a repülőgép három tengely irányú gyorsulásait, szögsebességeit, valamint az orsózási és bólintási Euler szögeit tartalmazza. A 10. ábra összehasonlítja a három repülőgépmodell szinguláris érték görbéit. Az egyes görbék a MATLAB *sigma* függvényének segítségével kerültek kiszámításra, minden egyes frekvenciapontban az adott modellhez tartozó görbesereg maximumát kiválasztva. A modellezet repülőgép egy dinamikusan kicsinyített változata egy utasszállító repülőgépnek, és ebből eredően lassabb dinamikával rendelkezik. Az ábrán egy rezonanciacsúcs figyelhető meg $3 \cdot 10^{-1}$ rad/s körül. A szabályozótervezés során a referenciamodellek úgy kerültek kiválasztásra, hogy azok vágási körfrekvenciája alacsonyabb legyen a rezonanciacsúcs frekvenciájánál.

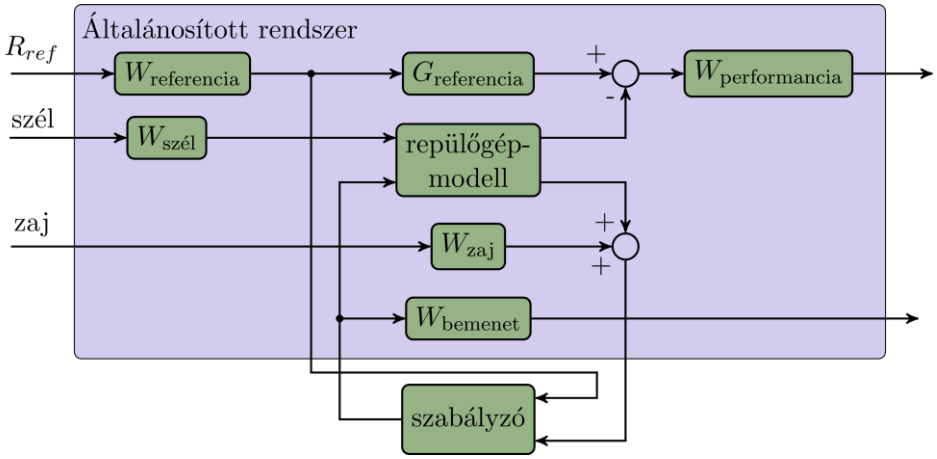


10. ábra A repülőgép modellek sigma görbéi

Az LPV szabályozó az *lpvsyn* függvény segítségével került megtervezésre MATLAB környezetben, a 11. ábrán bemutatott általánosított rendszer alapján. Az $R_{ref}^{T} = [u_{\text{ref}} \quad \phi_{\text{ref}} \quad \theta_{\text{ref}}]$ vektor a külső hurokból érkező referenciajeleket tartalmazza. A $W_{\text{referencia}} = \text{diag}\left(2, \frac{\pi}{180}, \frac{\pi}{180}\right)$, $W_{\text{szél}} = \text{diag}(0{,}1;\ 0{,}1;\ 0{,}1)$ és $W_{\text{zaj}} = I \cdot 10^{-2}$ mátrixok konstans diagonális súlyozó mátrixok a referenciajelek, szélzavarások illetve szenzorzajokra vonatkozóan, ahol I az egységmátrixot jelöli. A repülés közbeni szélzavarások hatásainak elnyomását nagyobbrészt a külső szabályozási kör végzi, így a belső kör szabályozójának tervezése során ezen zavarások kisebb súlyokkal lettek figyelembe véve.

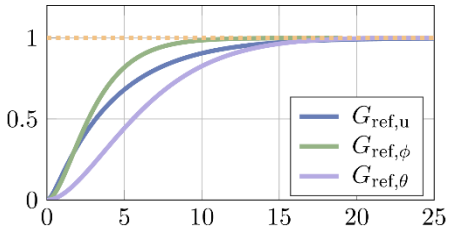
A referenciajelek követéséhez felhasznált referencia modellek a diagonális $G_{referencia}$ mátrixban lettek összegyűjtve, melynek elemei

$$G_{\text{ref,u}} = \frac{1}{1{,}21s^2+4{,}4s+1},\ G_{\text{ref},\phi} = \frac{1}{2{,}56s^2+3{,}2s+1},\ G_{\text{ref},\theta} = \frac{1}{12{,}25s^2+6{,}3s+1}. \tag{33}$$

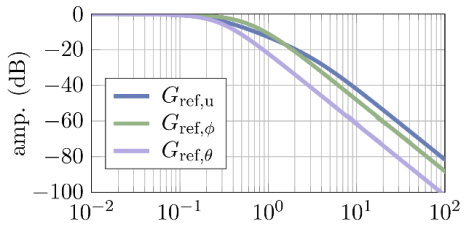


11. ábra A szabályozótervezéshez felhasznált általánosított rendszer

A 13. ábra szemlélteti a referenciamodellek Bode amplitúdó diagramját. Az egyes modellek vágási körfrekvenciája úgy lett megválasztva, hogy a szinguláris érték görbéken látható rezonanciacsúcsok frekvenciájánál alacsonyabbak legyenek, a biztos referenciakövetés érdekében. Ez ugyanakkor egy lassabb referenciakövetést is eredményez, ahogyan ez a 12. ábrán is látható, ami lassabb tranziensekhez vezet a zárt rendszerben, így egy „nyugodtabb" kisebb tranziensekkel jellemezhető környezetet teremtve a becslő számára.



12. ábra A referenciamodellek egységugrás válasza

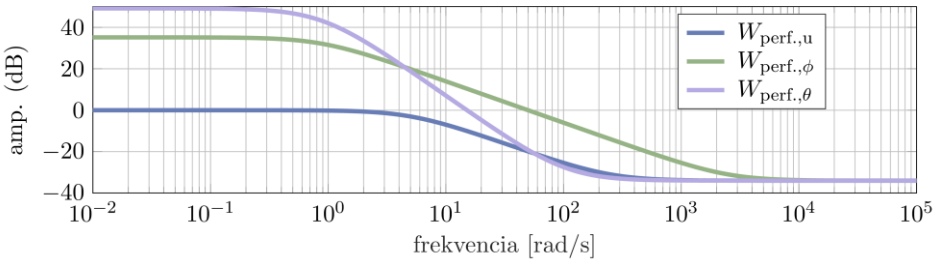


13. ábra A referenciamodellek Bode amplitúdó diagramja

A szabályozó jelkövetési tulajdonságai a repülőgépmodell vágási körfrekvenciájáig hangsúlyosak. A követési hibákra vonatkozó súlyok ennek megfelelően kerültek megállapításra, és a $W_{\text{performancia}}$ súlyozó mátrixban kaptak helyet, az alábbi értékekkel

$$W_{\text{perf.,u}} = \frac{0{,}02s+5}{s+5},\ W_{\text{perf.,}\phi} = \frac{0{,}02s+50}{s+0{,}8727},\ W_{\text{perf.,}\theta}\ \frac{0{,}02s^2+4{,}243s+225}{s^2+1{,}772s+0{,}7854}. \quad (34)$$

A kapcsolódó Bode diagram a 14. ábrán látható.

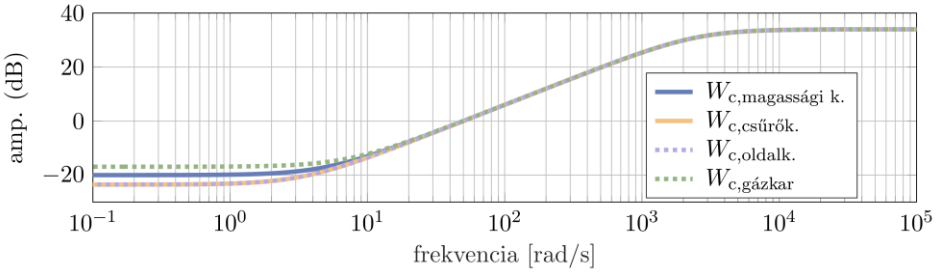


14. ábra A jelkövetési hibákra vonatkozó súlyok Bode amplitúdó diagramjai

Az irányító bemenetek úgy lettek meghatározva, hogy teljesítsék a fent elvárt performanciát. A bemenetek diagonális súlyozó mátrixának 4 eleme van

$$W_{\text{c,magassági}} = \frac{s+5}{0{,}02s+50}, W_{\text{c,csűrő}} = \frac{s+3{,}333}{0{,}02s+50}, W_{\text{c,oldal}} = \frac{s+3{,}333}{0{,}02s+50}, W_{\text{c,gázkar}} = \frac{s+7{,}143}{0{,}02s+50}. \quad (35)$$

A hozzájuk tartozó Bode amplitúdó diagram pedig 15. ábrán látható.



15. ábra A bemenetek Bode amplitúdó diagramjai

A becsült levegőhöz képesti sebesség visszacsatolása

A becslő a korábbi fejezetekben már bemutatásra került, és a levegőhöz képesti sebesség háromdimenziós vektorát, valamint annak abszolút értékét (TAS[11]) szolgáltatja. Azonban az LPV szabályozóban szereplő modellek eltérő Ekvivalens levegőhöz képesti sebességek (EAS) mellett kerültek linearizálásra. A két mennyiség egymásból származtatható megfelelő skálázással

$$EAS = TAS\sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}, \quad (36)$$

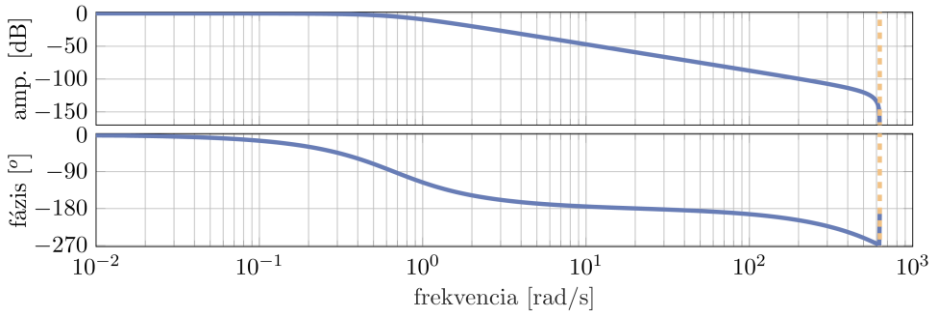
ahol ρ a levegő adott repülési magasságon vett sűrűsége, ρ_0 pedig a nemzetközi egyezményes légkör (ISA) szerinti tengerszinten vett levegősűrűség. Mivel ez az UAV 1500 láb magasságban repül, így ez a skálázás egy egyhez közeli szám.

Annak érdekében, hogy egy megfelelően sima ütemezési jelet kapjon a belső körben elhelyezett LPV szabályozó, a becsült sebesség visszacsatolása során egy aluláteresztő szűrőt alkalmazunk

$$D_{LP}(z) = \frac{5{,}5451e{-}06(z+0{,}9981)}{z^2-1{,}994z+0{,}9943}, \quad (37)$$

[11]TAS: True Airspeed

diszkrét átviteli függvénnyel, 0,005 s-os mintavételezési idő mellett, ami a hivatalos NASA Airstar Simulink modell mintavételezési ideje. A szűrő Bode diagramja a 16. ábrán látható.



16. ábra Az aluláteresztő szűrő Bode diagramja

SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

Ez a fejezet mutatja be a sebességbecslő valamint az útvonalpont-követő szabályozás nemlineáris szimulációk során elért eredményeit. Két eset került részletes vizsgálatra. Az elsőben a repülőgép egy egyenes útvonalon repül, miközben a teljes sebességtartományon végiggyorsít, majd lassít. Ebben az esetben az LPV szabályozó ütemezése a mért pontos EAS felhasználásával történt, és a külső navigációs szabályozó nem került aktiválásra. A második eset során az összes részrendszer csatlakoztatva van, és a repülőgép egy háromdimenziós iskolakört repül, miközben a belső kör LPV szabályozóját egyszer a mért, egyszer a becsült EAS segítségével ütemezzük.

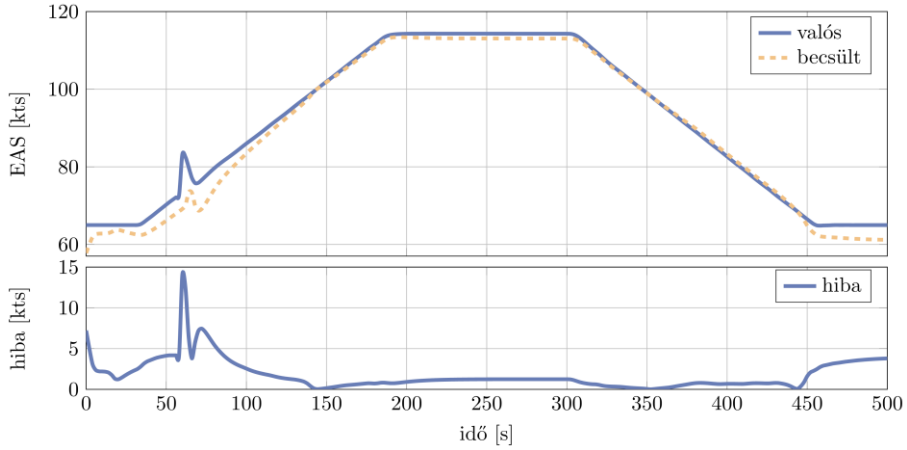
Az Airstar szimulációs környezet egy nagy részletességgel kidolgozott szimulációs modell, azonban a mi alkalmazásunkat tekintve egy nagy hátránya, hogy csak 60 és 110 kts között sikerült linearizált modelleket kinyerni belőle. Az aerodinamikából származó erők négyzetesen arányosak a levegőhöz képesti sebességgel, és mivel a repülőgép egy szűk sebességtartományon üzemel, ezért a dinamikai modellek között kis különbség van csak. A másik irányból tekintve a dolgokat azonban a becslő eredményei bíztatóak, ugyanis ha kis különbségek esetén is képes megkülönböztetni a modelleket, akkor nagyobb sebességintervallumokon ahol a modellek közötti különbségek jobban érvényesülnek még megbízhatóbb eredményeket szolgáltathat. Így történt az algoritmus egy korábbi verziójának egy az Airbus által szolgáltatott nagy megbízhatóságú modelljén végzett tesztelése során is (lásd [1]).

Egyenes vonalú gyorsítás - lassítás

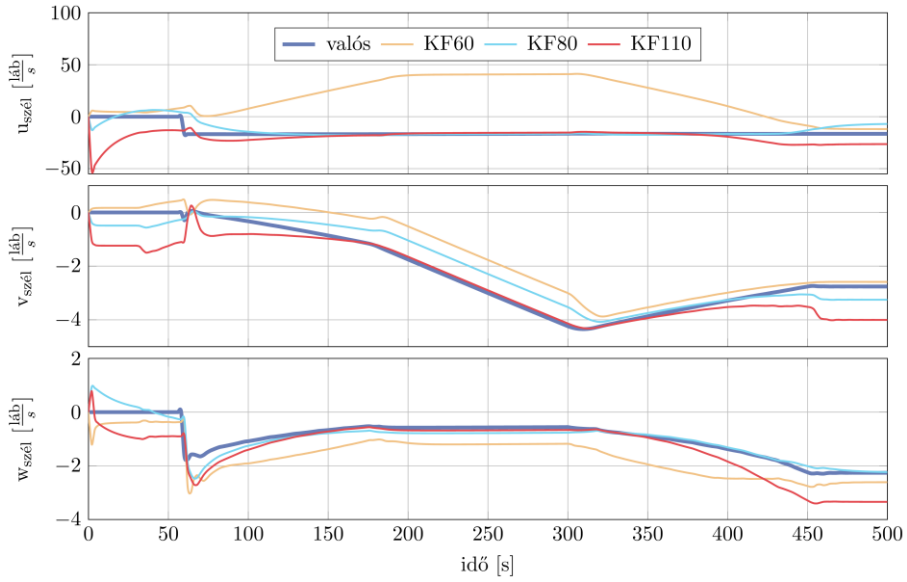
Ebben az esetben az LPV szabályozó végiggyorsítja, majd lelassítja a repülőgépet a vizsgált sebességtartományban [60, 110] kts. A 60. másodpercnél egy 10 kts nagyságú szembeszél zavarás jelenik meg. A repülőgép egyenes vonalon repül, és a szabályozó folyamatosan az adott sebességhez tartozó trimmponti bólintási szöget tartja.

A becsült TAS sebességet EAS-á konvertálva és az aluláteresztő szűrővel történő simítást elvégezve a becsült EAS jól közelíti a valósat. Az eredményeket a 17. ábra szemlélteti. A szimuláció 60. másodpercében jól látható a megjelenő szélzavarás, aminek hatására a becslési hiba is megnő, majd utána a becslő konvergenciája következtében újra lecsökken. Így a sebességbecslés bíztató eredményt mutat, azonban az egyes becslők által szolgáltatott szélbecsléseket a 18. ábra alapján megvizsgálva láthatóvá válik a tesztkörnyezet korábban említett hátulütője. A 80

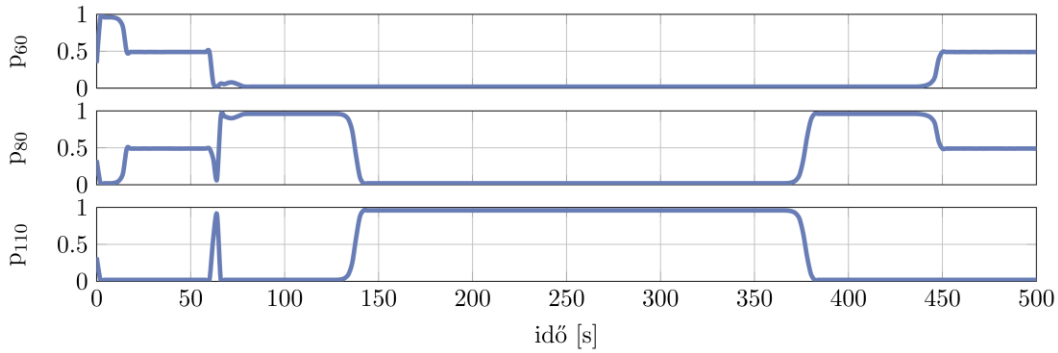
és 110 kts sebességekre tervezett szűrők nagyon hasonló becsléseket szolgáltatnak, ami a modellek közti kis különbségeknek tudható be.



17. ábra A becsült EAS



18. ábra A becsült szélkomponensek

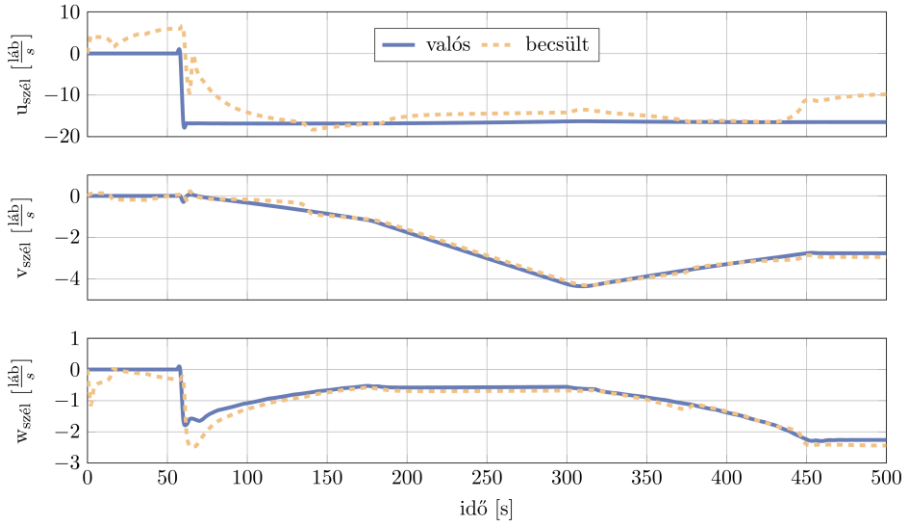


19. ábra A becslők súlyozó paraméterei

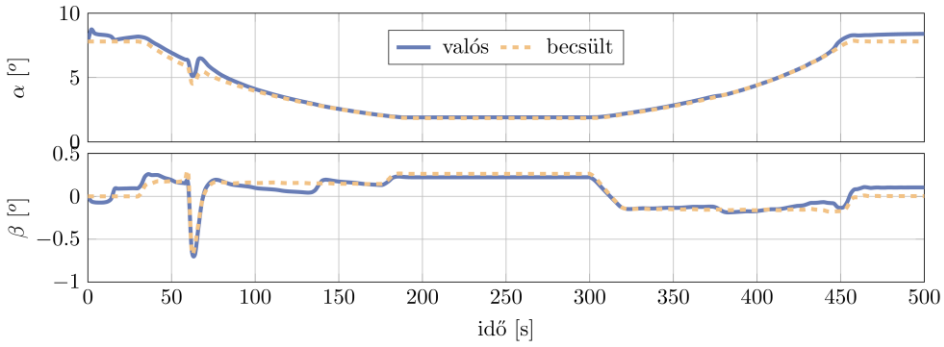
Azonban ha a módosított súlyozó formulákkal kapott súlyokat megvizsgáljuk (19. ábra), látható, hogy a szűrő képes megkülönböztetni a reziduál vektorok alapján a modelleket. Érdemes

rámutatni a korábban már említett jelenségre, miszerint egyes esetekben a súlyozó algoritmus azonos súlyokat rendel két becslőhöz.

Mindezen bizonytalanságok ellenére amennyiben a valószínűségek alapján képezzük az egyes szűrők által becsült szélkomponensek összegét, az eredményül kapott szélvektor egy jó közelítése a repülőgépre ható valós szélzavarásnak. A legnagyobb becslési hiba a szimuláció elején és végén fordul elő, ahol a súlyozó algoritmus nem tudott dönteni a 60 és 80 kts sebességek mellett tervezett becslők között. A 20. ábra szemlélteti a szélkomponensek valószínűségek alapján súlyozott becslését. A föld-koordinátarendszerben értelmezett 10 kts nagyságú szélzavarás becslése test-koordinátarendszerben, láb/másodperc mértékegység mellett történt.



20. ábra A becsült szélzavarás vektor



21. ábra A becsült állás- és csúszási szögek

A pontos szélzavarás ismeretében az (α) állásszög, valamint a (β) csúszási szög is számítható az

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{w_{\text{air}}}{u_{\text{air}}}\right), \quad \beta = \sin^{-1}\left(\frac{v_{\text{air}}}{TAS}\right), \tag{38}$$

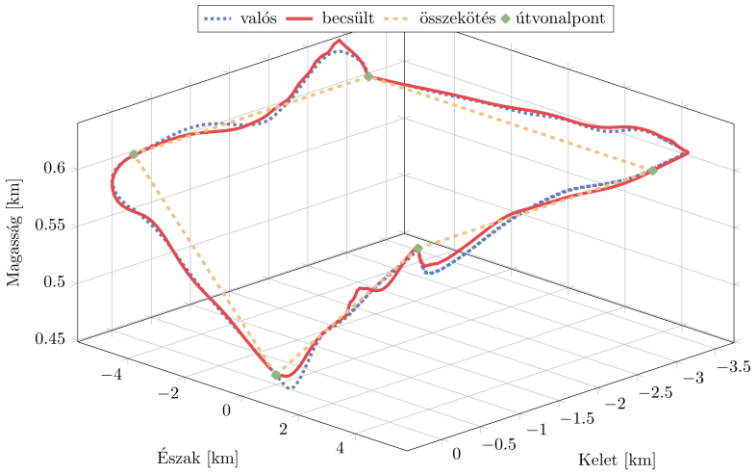
összefüggések segítségével. A 21. ábra alapján, ezen paraméterek is nagy pontossággal helyreállíthatóak.

Útvonalpont követés

Ez a fejezet bemutatja a becslő algoritmus működését egy iskolakör repülés során, ahol a belső kör LPV szabályozója egyszer a valós, egyszer a becsült EAS-al kerül ütemezésre. Az iskolakör

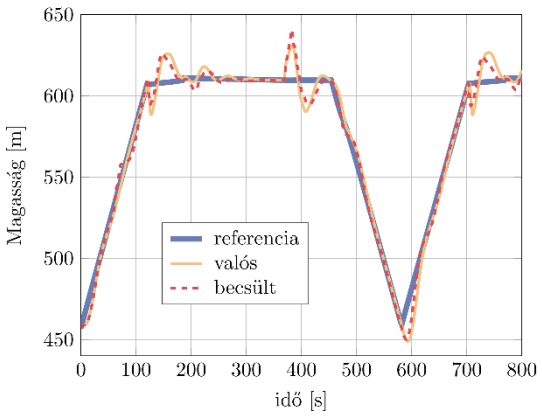
előnye hogy egy általános repülés minden fázisát tartalmazza (emelkedés, süllyedés, fordulás, gyorsítás, lassítás, vízszintes egyenes vonalú repülés). Az ehhez kapcsolódó útvonalpontokat a 22. ábra szemlélteti. A repülőgép az origóból indul, az északi irányba emelkedve. Emelkedés közben a 60. másodpercben egy szemből érkező konstans szélzavarás jelenik meg. Az első útvonalpontot elérve egy 90 fokos forduló után a második útvonalpont felé gyorsít. A második és harmadik pont között konstans sebességgel és magasságon repül, míg a harmadik és negyedik között lassít, a negyedik és az origó között pedig süllyed.

A sebességbecslést sikeresnek minősítjük, ha az ütemező valós sebesség helyettesíthető a repülés teljes időtartama alatt a becsült sebességgel, anélkül hogy a repülőgép útvonalpont követő képessége jelentősen romlana.A képességromlás egyik legjelentősebb jele, ha a két esetben kapott repülési trajektóriák nem esnek egybe. Ezen trajektóriák a korábban említett 22. ábrán láthatóak. Valós jelöli azt az esetet, amikor az ütemezési paraméter a valós mért sebesség, illetve becsült jelöli azt amikor az ütemezés a becsült paraméter alapján történt. Az első és harmadik útvonalpontok után egy jelentős magasságbeli túllövés vehető észre. Ennek oka az ugrásszerű sebességreferencia változás, melyet a szabályozó a gázkar állás módosítása mellett a bólintási szög megváltoztatásával kíván minél gyorsabban beállítani.

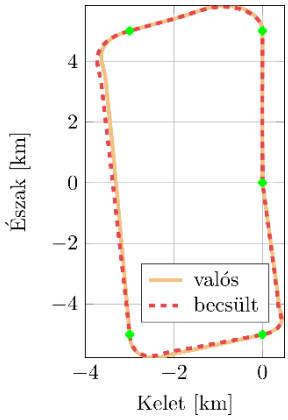


22. ábra A három dimenziós útvonal

A 23. ábra a magasságtartást, a 24. ábra az Észak-Kelet síkban történő útvonalpont követést mutatja be.

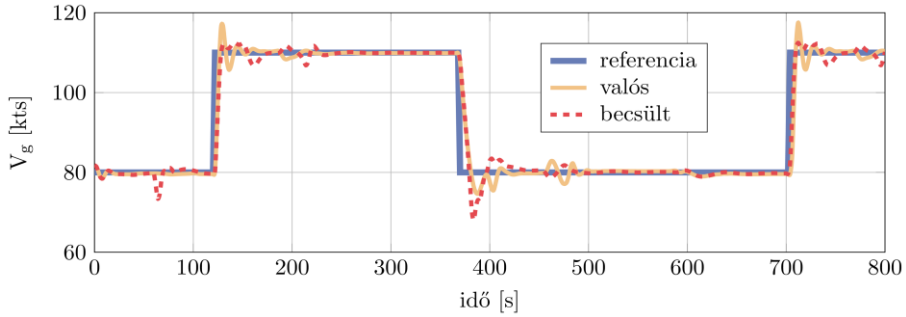


23. ábra Magasságreferencia követés

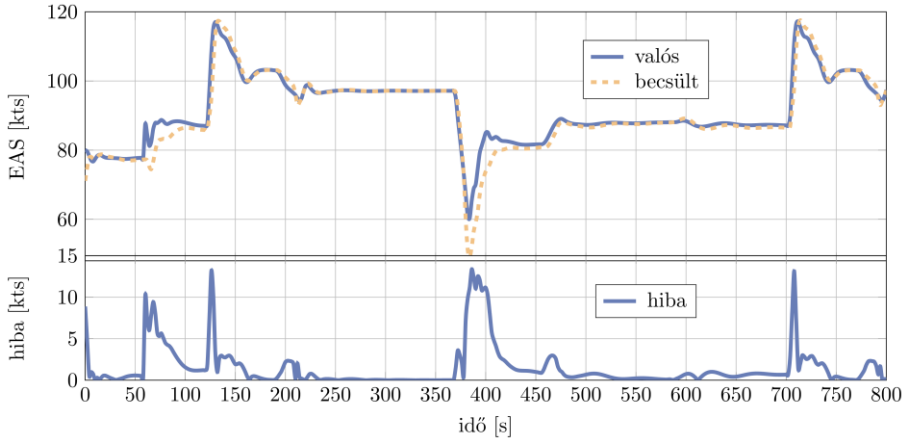


24. ábra Útvonalpont követés

A 25. ábra szemlélteti a robotpilóta földhöz képesti sebességreferencia követését abban az esetben, amikor a mért, illetve amikor a becsült sebességgel kerül ütemezésre. A 60. másodpercnél a szélzavarásból eredő hiba ezen az ábrán is tisztán látszik.

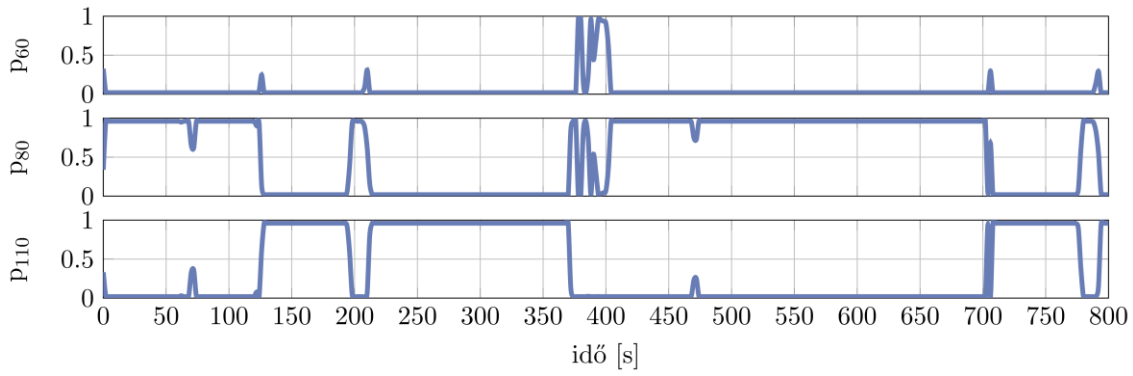


25. ábra TAS becslés és Vground referencia követés



26. ábra EAS becslés

A teljes manőverező repülés alatt az EAS becslés hibája 15 kts alatt maradt, ahogyan ez a 26. ábrán is látható. A sebességkövetés túllendüléseiből adódóan a legjelentősebb hibák ott lépnek fel, amikor a repülőgép hossztengely irányú szélből oldalirányú szélbe fordul, és megváltoztatja a sebességét.

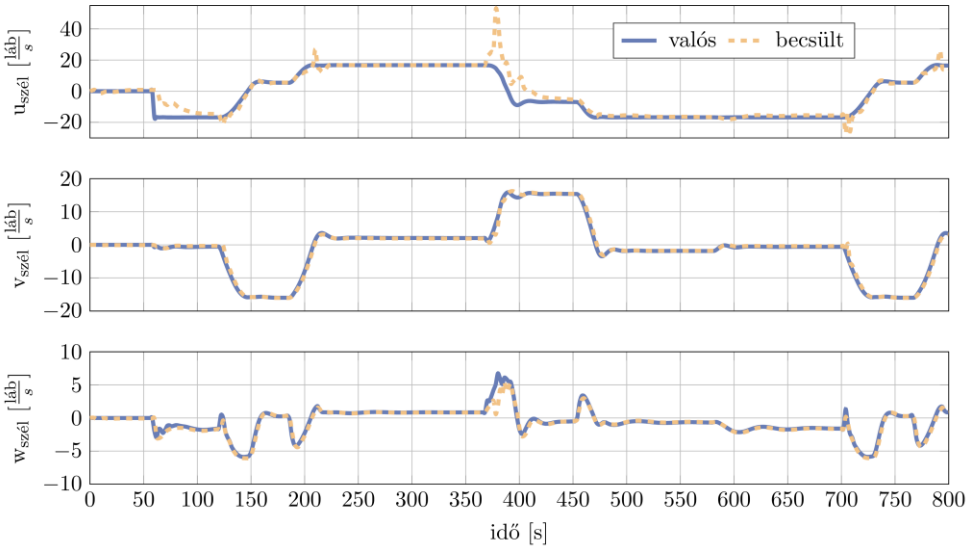


27. ábra Valószínűségek

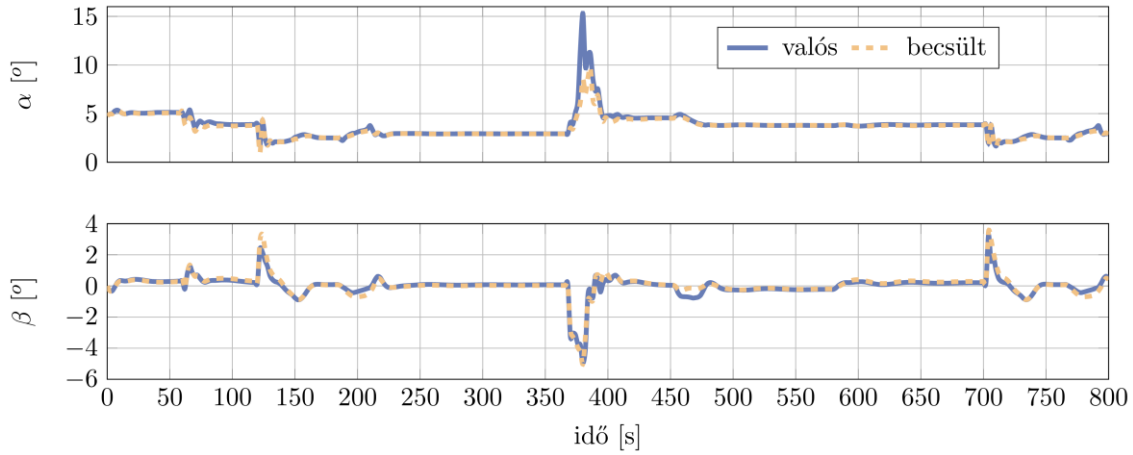
Repülés közben a súlyozó algoritmus megfelelő ütemben vált a kiválasztott modellek közt, azonban kialakulhatnak olyan esetek, amikor hibásan választ, ahogy a 27. ábrán a 400. másod-

perc környezetében is látható. Itt a repülőgép egy intenzív lassítást végez, mely során a sebességtartásban egy jelentős túllendülés figyelhető meg. A manőver befejeztével a súlyozás rövid időn belül bekonvergál a megfelelő modellhez.

A szélkomponensek becslése is megfelelő, leszámítva a korábban említett 400. másodperc körüli szakaszt. A szélkomponensek becslésén alapulva az állásszög és a csúszási szög is számítható a már korábban ismertetett módon. Ahogy a 29. ábra is mutatja, az állásszöget alulbecsülheti az algoritmus és így átesés elleni védelemhez nem minden esetben nyújthat megfelelő segítséget.



28. ábra Becsült szélkomponensek



29. ábra Állási és csúszásiszög becslés

ÖSSZEGZÉS ÉS TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A cikk egy több modellen alapuló, levegőhöz képesti sebesség becslésére vonatkozó becslési eljárást mutat be, ami egy lehetséges megoldás lehet abban az esetben, ha a Pitot-csőből eredő információk pontatlanok. A szakirodalomban a több modellen alapuló megközelítést időben állandó, a rendszerdinamikát befolyásoló ismeretlen paraméter meghatározására alkalmazzák, jelen cikkben ez került kiterjesztésre időben folytonosan változó paraméter, a levegőhöz képesti sebesség esetére. A becsült paraméter egy LPV szabályozó ütemezése során kerül felhasználásra.

A becslő eljárás elkészítése során a repülőgép eltérő sebességek mellett elkészített LTI modelljeit felhasználva ismeretlen bemenet becslők kerültek megtervezésre, melyek az ismeretlen szélsebesség komponensek becsléseit szolgáltatják. Ezen becslések egy a reziduál vektor alapján számított megfelelő súlyozásával az aktuális szélzavarás értéke kikeverhető. A szélháromszögre vonatkozó összefüggést, valamint a becsült szélzavarást felhasználva számítható a repülőgép levegőhöz képesti sebessége. A súlyozó algoritmus által felhasznált matematikai formulák az irodalomban létező megközelítések változtatásával kerültek előállításra. A módosított algoritmus konvergenciája a rendszer állandósult állapotára került bizonyításra.

Egy a cikkben bemutatott módszer szerint, egy robotpilóta rendszer is kifejlesztésre került melynek segítségével lehetőség nyílik az algoritmus tesztelésére manőverező repülés során is. Több teszt alapján bebizonyosodott, hogy az algoritmus képes lehet változó ismeretlen paraméter (levegőhöz képesti sebesség) becslésére is, azonban számos nyitott kérdés vár még megválaszolásra.

Az irodalomban létező megoldások, és az általunk adott bizonyítás is konstans ismeretlen paraméter esetére látja be a becslő algoritmus konvergenciáját. A későbbiekben performancia korlátok megadása szükséges arra vonatkozóan, hogy milyen manőverek, mekkora ismeretlen zavarások, illetve az ismeretlen paraméter milyen gyors változása mellett képes az algoritmus megfelelő konvergenciát biztosítani.

A robotpilóta rendszer számos alrenszerből (navigációs szabályozó, stabilizáló szabályozó, sebességbecslő) és több nemlineáris transzformációból épül fel. Egy későbbi kutatási munka során teljes rendszer stabilitását is bizonyítani szükséges.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Péter Bauer, Tamás Baár, Tamás Péni, Bálint Vanek, and József Bokor. Application of input and state multiple model adaptive estimator for aircraft airspeed approximation. IFAC-PapersOnLine, 49(17):76–81, 2016.

[2] Randal W Beard and Timothy W McLain. Small unmanned aircraft: Theory and practice. Princeton university press, 2012.

[3] Peter Eide and P Maybeck. An mmae failure detection system for the f-16. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 32(3):1125–1136, 1996.

[4] Philippe Goupil, Josep Boada-Bauxell, Andres Marcos, Paulo Rosa, Murray Kerr, and Laurent Dalbies. An overview of the fp7 reconfigure project: industrial, scientific and technological objectives. IFAC-PapersOnLine, 48(21):976–981, 2015.

[5] Vahid Hassani, A Pedro Aguiar, Michael Athans, and António M Pascoal. Multiple model adaptive estimation and model identification usign a minimum energy criterion. In American Control Conference, 2009. ACC'09., pages 518–523. IEEE, 2009.

[6] Vahid Hassani, A Pedro Aguiar, Antonio M Pascoal, and Michael Athans. A performance based model-set design strategy for multiple model adaptive estimation. In Control Conference (ECC), 2009 European, pages 4516–4521. IEEE, 2009.

[7] Vahid Hassani, António M Pascoal, A Pedro Aguiar, and Michael Athans. Multiple model adaptive estimation for open loop unstable plants. In Control Conference (ECC), 2013 European, pages 1621–1626. IEEE, 2013.

[8] Tor A Johansen, Andrea Cristofaro, Kim Sørensen, Jakob M Hansen, and Thor I Fossen. On estimation of wind velocity, angle-of-attack and sideslip angle of small uavs using standard sensors. In Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on, pages 510–519. IEEE, 2015.

[9] Thomas Jordan, William Langford, Christine Belcastro, John Foster, Gautam Shah, Gregory Howland, and Reggie Kidd. Development of a dynamically scaled generic transport model testbed for flight research experiments. 2004.

[10] Takahisa Kobayashi and Donald L Simon. Application of a bank of kalman filters for aircraft engine fault diagnostics. ASME Paper No. GT2003-38550, 2003.

[11] F Adhika Pradipta Lie and Demoz Gebre-Egziabher. Synthetic air data system. Journal of Aircraft, 2013.

[12] Matthew B Rhudy, Mario L Fravolini, Yu Gu, Marcello R Napolitano, Srikanth Gururajan, and Haiyang Chao. Aircraft model-independent airspeed estimation without pitot tube measurements. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 51(3):1980–1995, 2015.
[13] Damiano Rotondo, Andrea Cristofaro, Vahid Hassani, and Tor Arne Johansen. Icing diagnosis in unmanned aerial vehicles using an lpv multiple model estimator. 2017.
[14] Damiano Rotondo, Vahid Hassani, and Andrea Cristofaro. A multiple model adaptive architecture for the state estimation in discrete-time uncertain lpv systems. In American Control Conference (ACC), 2017, pages 2393–2398. IEEE, 2017.
[15] NASA AirSTAR: For the Sake of Pilots and Passengers url: https://www.nasa.gov/larc/airstar-for-the-sake-of-pilots-and-passengers (2018.03.19)

FLIGHT SAFETY ENHANCEMENT THROUGH AIRSPEED ESTIMATION

The paper provides a solution for total wind field reconstruction (3 dimensional airspeed, 3 dimensional wind speed, angle of attack, sideslip angle) in the presence of unknown wind disturbances. The method relies on LTI models of an aircraft at distinct airspeed values. The wind field estimation is carried out by the Multiple Model Adaptive Estimation approach. The applicability of the proposed approach is evaluated during simulations on the NASA Airstar platform. A waypoint following control architecture has been designed, which consists of PID and LPV controllers. To demonstrate the reliability of the proposed approach, the LPV controller is scheduled by the estimated airspeed, without significant performance degradation.

Keywords: *airspeed estimation, wind estimation, Pitot icing, waypoint following, Linear Parameter-varying*

Baár Tamás (MSc) tudományos segédmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium baar.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0003-0036-4114	Tamás Baár (MSc) Research associate Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab baar.tamas@sztaki.mta.hu orcid.org/0000-0003-0036-4114
Bauer Péter (PhD) tudományos főmunkatárs Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium ba- uer.peter@sztaki.mta.hu orcid.org/ 0000-0002-1925-2270	Péter Bauer (PhD) senior research fellow Hungarian Academy of Sciences Institute for Computer Science and Control Systems and Control Lab bauer.peter@sztaki.mta.hu orcid.org/ 0000-0002-1925-2270

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-12-0458_Baar_Tamas-Bauer_Peter.pdf

Vránics Dávid Ferenc, Palik Mátyás, Bottyán Zsolt

ESETTANULMÁNY EGY NYÍLT REPÜLÉSTÁMOGATÓ RENDSZER BIZTONSÁGÁRÓL

Az Open Glider Network (OGN) nyílt, vitorlázó repülést támogató rendszer, mely egyre nagyobb népszerűségnek örvend világszerte. Az idő múlásával azonban az átviteli biztonság kialakítására tett intézkedései elavulttá váltak, jelenleg a hálózat felé küldött adatok egyszerű módszerekkel meghamisíthatóak. A cikk célja megmutatni, hogy egy nyilvános, nyílt repüléstámogató rendszer is lehet biztonságos. Javító szándékú kritikával, "fehér kalapban" vizsgálja a rendszer jelenlegi hibáit, és javaslatokkal szolgál azoknak javítására, a napjainkban elterjedt átviteli biztonsági eljárásoktól az adatok heurisztikus vizsgálatát megvalósító mesterséges intelligenciáig.

***Kulcsszavak**: repüléstámogatás, biztonság, esettanulmány*

AZ OGN RÖVIDEN

Az OGN[1] nyílt, vitorlázó repülést támogató rendszer, mely egyre nagyobb népszerűségnek örvend világszerte. Jelenleg több mint 10 000 fedélzeti jeladó eszköz [1] van regisztrálva a hálózatba, vitorlázó repülőgépektől kezdve, kisméretű légcsavaros repülőgépeken át pilóta nélküli légijárművekig. A rendszer kifejlesztésének célja az volt, hogy azokról a repülőgépekről, melyek nem rendelkeznek transzponderrel, közel valós idejű 3D-ós pozíció és alapvető telemetriai adatok legyenek elérhetők egy publikus web felületen. A vitorlázó repülő közösségtől eredő kezdeményezés, ma már széles körben elterjedt és az OGN hálózatból nyert adatok, akár bajba jutott légijárművek felkutatásakor is felhasználásra kerülhetnek.

Jelenleg egy kutatócsoporttal azon dolgozunk, hogy a fenti rendszert felhasználva, meteorológiai információt juttassunk el magába az OGN rendszerbe, illetve ezzel párhuzamosan, az OGN hálózat felhasználásával egy új repüléstámogatási rendszer numerikus prognosztikai alrendszerét is támogassuk ezzel az információval [2][3][4].

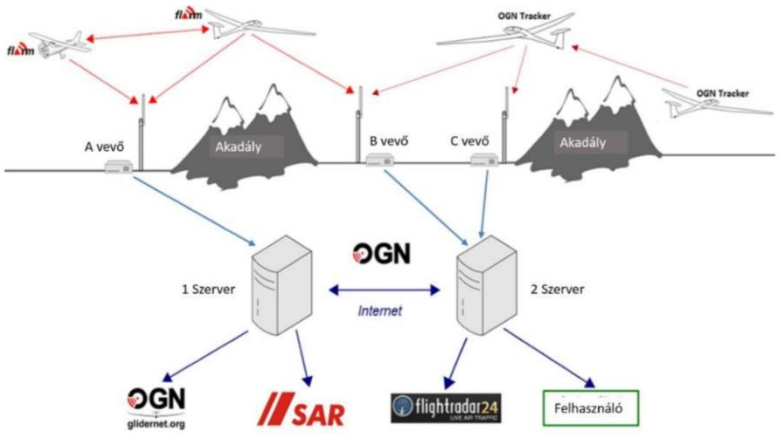
A hálózat [5] a FLARM[2] rendszerre épül. Utóbbinak alapvető célja a kisgépes repülés támogatása ütközés elkerülés lehetőségének megvalósításával. Az OGN ennek kiterjesztése, földi vevő állomások beiktatásával biztosítja interneten át a légijárművek „láthatóságát”, online térképes felületet biztosítva a biztonságosabb repülés tervezéséhez.

Az OGN hálózat felépítése

A repüléstámogató rendszereket légi, földi és adatkapcsolati alrendszerekre oszthatjuk. [6]

Az OGN és FLARM esetén a légi alrendszer alapeleme a tracker (nyomkövető egység), ami a pozíció és egyéb repülési adatok továbbítására képes. Ez általában egy kis méretű, kis energia igényű, 868 MHz-en üzemelő rádiós eszköz [5].

[1] Open Glider Network – Nyílt Vitorlázórepülő Hálózat
[2] Flight Alarm – „Légi Riasztó”



1. ábra FLARM és OGN TRACKER az OGN-hálózatban [5]

A kihelyezett földi vevőállomás a rádiós jeleket fogadja és dekódolja, majd ezeket APRS[3] csomagok formájában, interneten át továbbítja a központi szerverekre.

2. ábra Az „InfoPark” szoftveres vevő (balra) és a „PETRA-D” tracker (jobbra), a képet készítették a szerzők

A szerverekre különböző kliens alkalmazások iratkozhatnak fel és jeleníthetik meg tetszőleges formában az adatokat.

Az „OGN flavoured APRS” protokoll

Az APRS egy szöveges protokoll, eredetileg pozíció, időjárás adatok és egyéb szöveges közlemények rádió alapú digitális átvitelére lett tervezve.Az OGN rendszeren belüli kommunikáció egységesítésére különböző üzenetformátumok kerültek rögzítésre [7].

Köztük szerepelnek a szerverre történő bejelentkezéshez, a vevő azonosítására használt üzenetek, vagy éppen a vevő státuszát, technikai információit (földrajzi pozíció, rendelkezésre álló processzor és memória, hőmérséklet stb.) közlő üzenetek. Ezeken felül természetesen a közeli trackerektől vett pozíció, vagy időjárási adatok is APRS formában továbbításra kerülnek.

[3] Automatic Packet Reporting System – Automata Csomag Jelentő Rendszer

A sebezhető pontok

Gyenge hitelesítés

A jelszó valójában a felhasználónév (vevő azonosító) hasításával jön létre. [8] A vevő azonosítók maximum 10 alfanumerikus karakter hosszúak, a jelszó generáló algoritmus kis és nagybetűre nem érzékeny. Első lépésként maximum 10 karakter hosszúvá és nagybetűssé alakítjuk a vevő azonosítót. Ezután vesszük a 73e2 hexadecimális kezdőszámot, és az azonosítóval 2 bájtosával (azaz 2 karakterenként) az elejétől kezdve kizáró vagyoljuk. A végén lemaszkoljuk az előjelbitet, hogy biztosan pozitív legyen a szám, azaz a jelszó.

Az algoritmus levezetve az „InfoPark” vevőkódra:

a jelszó *kezdőszám XOR „IN” XOR „FO” XOR „PA” XOR „RK”* azaz

$$73e2_{16} \oplus 494e_{16} \oplus 464f_{16} \oplus 5041_{16} \oplus 524b_{16} = 32489_{10}$$

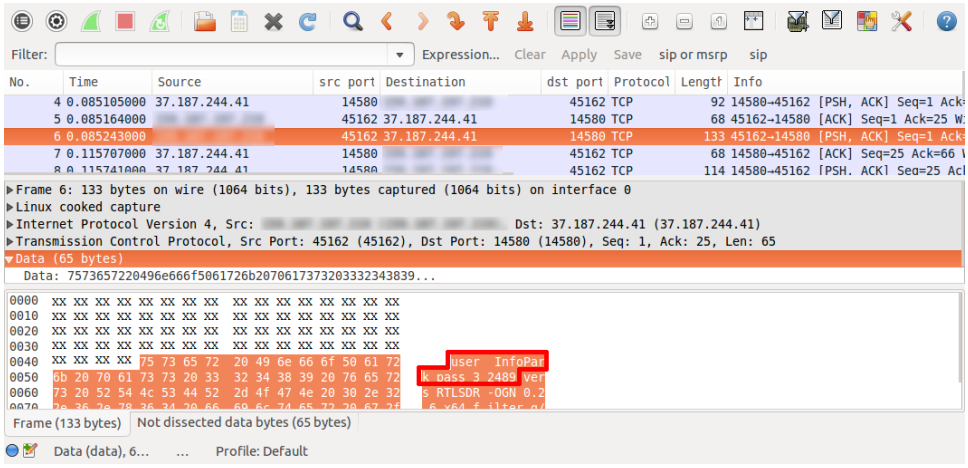
Gyenge engedélyezés

Adatküldés során nem is kell online lennie a vevőnek, azaz nem kell státusz üzeneteket küldenie. Elég, ha a vevő egyszer bejelentkezik az APRS szerverre felhasználónév/jelszó párossal, onnantól nincs is szükség sem a földrajzi hely megadására konfigurációs csomagokkal, sem státuszüzenetek küldésére, vagyis elég légi eszközök adatait továbbítania. Így előállhat az a furcsa helyzet, hogy a megjelenítő alkalmazásokon a vevőállomás vörösen, offline, vagy egyáltalán meg sem jelenik, viszont az általa továbbított adatok alapján megjelennek légijárművek.

A légijármű adatok sincsenek igazán validálva, az eszköz által sugárzott, a fizika törvényeit meghazudtoló hamis vagy hibás adatokat is megjeleníti a legtöbb kliens alkalmazás. Lásd 4. ábra.

Titkosítatlan átvitel

Ha egy kiszolgálón vagyunk a vevőt megvalósító ogn-rf és ogn-decode szoftverrel, könnyedén kielemezhetjük a vevő és az APRS szerver közti adatforgalmat.



3. ábra APRS csomag megjelenítése a Wireshark eszközzel, a képet készítették, szerkesztették a szerzők

Ugyanígy lehallgathatjuk egy hálózati forgalom analizáló eszközzel, például Wiresharkkal, ha egy hálózaton vagyunk vele, és sikerül egy MITM-jellegű[4] támadással például DNS[5] gyorsí-

[4] Man in the middle – közbeékelődéses támadás

tótár mérgezés vagy ARP[6] mérgezés [9] módszerével a két végpont közé férkőznünk. Ezután akár egyszerűen le is másolhatjuk, meghamisíthatjuk és meg is módosíthatjuk a csomagokat. Vegyük észre, hogy a 3. ábrán kiemelt részben tényleg a fentebb általunk is kiszámolt jelszó található. Tapasztalataim szerint a légiirányítás fenntartásokkal kezeli az OGN-t emiatt a sebezhetőség miatt.

Egy támadás vektora

- Kiválasztjuk az trackert a regisztrált eszközök listájából. [1] Legyen ez a példa kedvéért OGN132528 (a tracker bármelyik lehetne, ez az általam használt, kölcsön kapott valódi tracker).
- Kiválasztjuk a vevőt a vevők listájából, [10] vagy egy térképes megjelenítőből. [11] Legyen ez most InfoPark (a vevő bármelyik lehetne, ez az általam telepített valós, ideiglenes vevő a munkahelyemnél).
- Kitöltjük a bejelentkező csomagot.
    - Felhasználónév a vevő azonosító; a jelszó generálható online, [12] vagy a korábbi fejezetben mutatott módszerrel ki is számolható, sőt, akár lehallgatható, ezért nem is féltem jelen cikkben nyilvánossá tenni.

```
user InfoPark pass 32489 vers RTLSDR-OGN 0.2.6.x64 filter g/ALL
```

- A további csomagokban időbélyeg dinamikus előállítására, megfelelő formázására van szükség. Ez Linux operációs rendszereken, bash-ben például a következőképp történhet.

```
date +%H%M%S
```

- Kitöltünk egy konfigurációs sort, hogy megjelenjünk a térképen. GPS pozíciót, és egyéb paramétereket adunk meg a vevőről, a protokollnak megfelelően. [7]

```
InfoPark>APRS,TCPIP*,qAC,GLIDERN2:/`date
+%H%M%S`h4728.26NI01903.78E&000/000/A=000390
```

- Kitöltünk egy státusz riport sort is, hogy online-nak tűnjünk.

```
InfoPark>APRS:>`date        +%H%M%S`h        v0.2.6.x64        CPU:0.2
RAM:13350.9/16730.0MB  NTP:0.1ms/+11.9ppm  +25.0C  1/1Acfts[1h]  RF:-
2+0.3ppm/+9.16dB
```

- Kitöltünk pár eszköz által lesugárzott sort. Nem muszáj a valódi eszköznek bejelentkezve lennie. Nem is muszáj logikus adatoknak lennie (például szürreális 999 csomó sebességet is megadhatunk egy szimulált vitorlázó vagy pilóta nélküli repülőgépnek). Lásd majd a 4. ábrán.

```
OGN132528>APRS,qAR:/`date
+%H%M%S`h4728.26N/01903.80E'000/999/A=000390 !W54! id07132528 +000fpm
+0.0rot 45.2dB 0e -2.6kHz gps5x7
```

- Csatlakozunk az egyik APRS szerverhez a listából, példaként a másodikhoz, a megfelelő publikus, ismert portjára.
    - glidern1.glidernet.org
    - glidern2.glidernet.org
    - glidern3.glidernet.org

[5] Domain Name System – tartománynév rendszer
[6] Address Resolution Protocol – cím feloldási protokoll

- glidern4.glidernet.org

```
telnet 37.187.244.41 14580
```

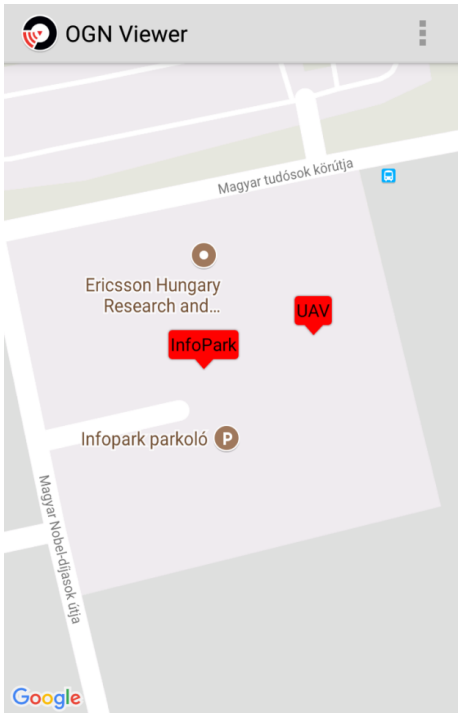
✈ Beküldjük az összeállított csomagokat.

Sikeresen eltérítettük vagy megzavartuk a céltárgy nyomkövető jelét a rendszerben.

4. ábra Sikeres megjelenítés a glidertracker.org [11] honlapon, a képet készítették a szerzők

Tapasztalataink szerint a glidertracker.org megjelenítő jobban megengedő. A live.glidernet.org csak akkor jeleníti meg, ha elég ideje aktív a vevő.

Az OGN Viewer App-on is látszik a sikeres támadás. Lásd 5. ábra.



5. ábra Sikeres megjelenítés az OGN Viewer alkalmazáson, [13] a képet készítették a szerzők

Javaslatok a biztonság növelésére

Átviteli biztonság (TRANSEC[7])

„[Az átviteli biztonság] mindazon védelmi rendszabályok összességének az eredménye, amelyek végrehajtásával biztosítjuk a híradó adatátviteli utakon, csatornákon az információk sértetlenségének, rendelkezésre állásának, bizalmasságának meglétét, valamint adott esetekben a hitelességét illetve letagadhatatlanságát." [14]

A megvalósításhoz javasoljuk az SSL[8]/TLS[9] titkosítást TCP[10] fölött. Ez az elterjedten használt módszer nyilvános (aszimmetrikus) kulcsú rejtjelezésen alapul. Aszimmetrikus kulcsú rejtjelezés alatt olyan kódolást értünk, ahol a kódoló kulcs és a dekódoló kulcs különbözik. Egy ilyen kulcspárral gyakorlatban megvalósíthatjuk nem csak az üzenetek titkosítását, hanem a digitális aláírását is a hitelesség biztosítására.

Ezek során mind a két fél (A és B) is rendelkezik saját privát és publikus kulccsal is. Abban az esetben, ha A küld B-nek, az üzenetét B publikus kulcsával titkosítja, és a kódolt üzenetet egy hasító (hash) algoritmus és saját privát kulcsának segítségével írja alá. B a kódolt és aláírt üzenet fogadása után ellenőrzi az üzenet integritását A publikus kulcsának segítségével és az üzenet saját oldalán történő hasításának végrehajtásával. Ezután a titkosított üzenetrészt dekódolja saját privát kulcsának felhasználásával.

Azt, hogy egy publikus kulccsal kódolt üzenetet csakis egy megfelelő privát kulccsal lehessen dekódolni, az RSA[11] algoritmus biztosítja.

Az SSL/TLS eljárás a fentiek informatikai megvalósítását, biztonságos kulcscserét illetve további képességeket biztosít a megfelelő biztonsági szint kialakításához.

Hitelesítés

Az APRS jelszó a már ismertetett okok miatt nem megbízható, ezért egy regisztrációs felület megvalósítását javaslom.

Az átviteli biztonság fenti megvalósítása igaz, nyújt hitelesítési lehetőségeket, de gondoljunk bele, ez átviteli, nem alkalmazói szinten történik a hálózatban, vagyis csak azt biztosítja alap esetben, hogy a szerver oldal az, akinek mondja magát. Ezért az APRS bejelentkezést is erősíteni érdemes, vagy bevezetni a kliens oldali tanúsítványok alkalmazását a SSL/TLS hitelesítés során.

Az APRS jelszót generáló algoritmus kifejlesztése során a fejlesztők elkövettek egy rég óta felismert hibát. A Kerckhoff-elv [15] alapján a titkosítási algoritmusok során egyedül a kulcsok kellene, hogy titkosak legyenek. Auguste Kerckhoff, a 19. századi matematikus szerint nem szabad egyedül arra alapozni egy eljárást, hogy a lehetséges támadók nem ismerik az algoritmust. Sőt, az algoritmus legyen publikus, hogy minél többen használhassák, illetve megismerhessék, ez is hozzájárul ahhoz, hogy biztonságosan lehessen alkalmazni, hiszen ha valami sérülékenység van az algoritmusban, annál hamarabb kiderül. A fejlesztők pont fordított logika mentén az algoritmust tartották titokban, és igazi jelszót nem is kérnek a felhaszná-

[7] Transport Security – átviteli biztonság
[8] Secure Sockets Layer
[9] Transport Layer Security
[10] Transmission Control Protocol
[11] Rivest–Shamir–Adleman (az algoritmus kidolgozói után)

lótól. Felteszik, hogy mert „ismeri” az algoritmust, biztosan a megbízható, hivatalos szoftvert használja, aminek titokban tartják a forráskódját.

Ha már javaslom a vevő regisztráció megvalósítását választott jelszóval, érdemes említést tenni a jelszavak tárolásának módjáról. Ne tároljunk a kiszolgálón nyers jelszavakat, hiszen ha ezeket megszerzi valaki, máris be tud jelentkezni a felhasználók nevében. Ebből az okból kifolyólag szokás a jelszavakat szerver oldalon hasítva, vagyis hash, lenyomat formájában tárolni.

A hasító eljárások jellemzője, hogy olyan függvények (egy bemenő adatból determinisztikusan ugyanaz az egy kimenet képződik minden esetben), amelyek nagy valószínűséggel nem generálják több különböző bemenetből ugyanazt a lenyomatot (csekély az ütközés esélye), illetve nem invertálhatóak (a kimenetet nem lehet, illetve nehéz közvetlen visszaalakítani az eredeti bemenetté). Még egy gyakori jellemzőjük, hogy a bemenő adatok kis mértékű módosítása a lenyomat nagy mértékű módosulásával jár, így nem lehet következtetni „ránézésre hasonló”, ismert bemenetű lenyomatok alapján az eredeti bemenetre.

Megjegyzés: a lenyomat általában jóval rövidebb, mint a bemenet volt. [15]

Engedélyezés

Heurisztikával segített mesterséges intelligenciával vizsgálható lehet, hogy valós adatokat küld-e a légijármű vagy az adó egység. Akár neuronhálóval, tanuló, evolúciós algoritmussal felkészíthetjük a szervereket, hogy kiszűrjék a valótlan adatokat. Megfelelő mennyiségű valós adat betáplálásával megtanítható a szűrő algoritmus, hogy melyek a valósnak tűnő adatok, így nem lehetne például a korábban bemutatott módszerrel szuperszonikus vitorlázó repülőgépet szimulálni a rendszerben.

Próbálkozásaink során kezdetleges szűrési próbálkozást véltünk felfedezni, amikor a Budapesten bejelentkezett vevőhöz Szolnok környékén mozgó járművet próbáltunk szimulálni. Bár az is lehetséges, hogy csak egy újabb programhibát fedeztünk fel, hiszen egy idő után furcsa módon a szimulált légijármű hirtelen megjelent Szlovákia fölött, pontosan északi irányban a vevőállomástól, Szolnok helyett. Ennek az is lehet egy feltételezhető oka, hogy a gyakran használt előjel nélküli, 16 biten ábrázolt egész számok maximális értéke 65 535. A vevő és a légijármű közti távolságot az OGN megjelenítők általában méterben számolják, Budapest és Szolnok távolsága nagyjából 90 km, vagyis a 16 biten ábrázolt egész szám vélhetően túlcsordult, és ez ábrázolási hibákat okozott. Ez gyakorlatban nem szokott előfordulni, hiszen a szokásos 868 MHz antennák hatótávolsága általában csak pár kilométer.

ÖSSZEGZÉS

A cikk által bemutatott, ma már széles körben elterjedt, és minden számítógépes platformon támogatott SSL/TLS eljárásnak köszönhetően könnyedén áthidalható lenne a titkosítatlan átvitel problémája. Ennek a kisebb fejlesztői feladatnak a megvalósítása évtizedek lemaradását hozná be a rendszer szempontjából. Egy modernebb jelszó politikával és ellenőrzött adatokkal megbízhatóbb szolgáltatást nyújthatna. Továbbá a trackerek regisztrációját megvalósító felülethez hasonlóan a vevő egységek regisztrációja is megoldható lenne, így a cikkben bemutatott támadás nem lenne ilyen könnyen, illetve ilyen formában kivitelezhető.

Az OGN hálózat meglátásunk szerint egy nagyszerű, egyre növekvő, közösségformáló kezdeményezés, melynek gyakorlati haszna felbecsülhetetlen a vitorlázó repülő pilóták számára.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] GliderNet: OGN DDB - registered devices, url: http://wiki.glidernet.org/ddb-list

[2] Bottyán Z, Wantuch F, Gyöngyösi Z, Tuba Z, Hadobács K, Kardos P, Kurunczi R.: Development of a Complex Meteorological Support System for UAVs. WORLD ACADEMY OF SCIENCE ENGINEERING AND TECHNOLOGY 7:(4) pp. 646-651. 2013.

[3] Bottyán Z, Zénó András Gyöngyösi, Wantuch F, Tuba Z, Kurunczi R, Kardos P, Istenes Z, Weidinger T, Hadobács K, Szabó Z, Balczó M, Varga Á, Bíróné Kircsi A, Horváth Gy.: Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). IDŐJÁRÁS / QUARTERLY JOURNAL OF THE HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE 119:(3) pp. 307-335. (2015).

[4] Gyongyosi AZ, Kardos P, Kurunczi R, Bottyan Z.: Development of a complex dynamical modeling system for the meteorological support of unmanned aerial operation in Hungary. In: Kimon P Valavanis, Pascual Campoy (szerk.) 2013. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS): Conference Proceedings. 1172 p. Konferencia helye, ideje: Atlanta (GA), Amerikai Egyesült Államok, 2013.05.28-2013.05.31. Atlanta (GA): IEEE, 2013. pp. 8-16. (ISBN:978-1-4799-0815-8)

[5] Makkay Imre: Ütközések elkerülése a kisgépes és a pilóta nélküli repülésben. Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL) XXIX:(1), 2017, pp. 59–66. url: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_1/2017-1-04-0378_Makkay_Imre.pdf

[6] Palik Mátyás: Pilóta nélküli légijármű rendszerek légi felderítésre történő alkalmazásának lehetőségei a légierő haderőnem repülőcsapatai katonai műveleteiben. PhD értekezés, Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2007. pp. 14–18, url: http://m.ludita.uni-nke.hu/repozitorium/bitstream/handle/11410/9778/Teljes%20sz%C3%B6veg%21?sequence=1&isAllowed=y

[7] Github: OGN flavoured APRS, url: https://github.com/svoop/ogn_client-ruby/wiki/OGN-flavoured-APRS

[8] Github: magicbug/PHP-APRS-Passcode, url: https://github.com/magicbug/PHP-APRS-Passcode/blob/master/aprs_func.php

[9] Haig Zsolt: In. Kovács László (szerk.) Információ - társadalom – biztonság. NKE Szolgáltató Kft., Budapest, 2015. (ISBN:978-615-5527-08-1)

[10] GliderNet: List of OGN Receivers, url: http://wiki.glidernet.org/list-of-receivers

[11] GliderTracker: Welcome, url: http://glidertracker.org

[12] APRS Passcode Generator: Techical Example of Passcode Generation using PHP, url: https://apps.magicbug.co.uk/passcode/index.php

[13] GooglePlay: OGN Viewer - FLARM Radar, url: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.meisterschueler.ognviewer&hl=en

[14] Kerti András: Átviteli út biztonság. HADMÉRNÖK II:(4) 2007, pp. 60–65. url: http://www.hadmernok.hu/archivum/2007/4/2007_4_kerti.html

[15] Spala Ferenc: Bluetooth eszközök biztonsági kérdései, diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 2008. http://krasznay.hu/presentation/diploma_spala.pdf

A CASE STUDY ON OPEN FLIGHT SUPPORT SYSTEM SECURITY

Open Glider Network (OGN) is an open, glider flight support system, gaining ever growing recognition around the globe. Eventhough, with time its transport security measures have become outdated, with some simple steps it is possible to inject fraudulent data into the network. The aim of this article is to show that an open, public flight support system can also be secured. The article covers some now-existing security issues, and with constructive critique and white-hat approach it points out possible practices to mitigate the found problems, including common transport security solutions and heuristically aided artificial intelligence to validate flight data.

***Keywords**: flight support, security, case study*

Vránics Dávid Ferenc (MSc) doktoranduszhallgató, informatikus Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola 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 vranicsd@gmail.com orcid.org/0000-0003-0637-476X
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
Bottyán Zsolt (PhD) tanszékvezető, 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) Head of department, 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

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/2018_1/2018-1-13-0460_Vranics_D_F-Palik_M-Bottyan_Zs.pdf

Katalin Hadobács

RISK OF AIRFRAME IN-FLIGHT ICING AND ICING PREDICTION ALGORITHMS

Despite the stormy evolution of technical aspects, on-board applications and the great development in the field of weather forecast in the last decades, aerial operation still greatly depends on weather conditions. The majority of weather condition related flight accidents are consequences of icing. It is essential to pay full attention to the physical processes of icing, to recognize these factors in detail. On the basis of studies it was also required to set up and develop modern weather forecast procedures. Today, it is still not possible to say whether the flight meets icing zones or not, and still meteorologists can only advise us on the potentially dangerous icing areas. All this information supports us to avoid hazardous airspaces. Notwithstanding, in case the flight crew faces a large icing area on its route, it already has got means to fight against icing. Today, several types of aircraft are equipped with protection systems against icing to decrease the possible risk. These can be preventer or de-icing systems. The topic of this article is the icing itself, the forecasting methods of icing and icing prevention systems. This article provides us with a short but comprehensive outlook on the topic.

***Keywords**: flight safety, aircraft icing, forecast of icing, de-icing systems, icing prevention systems*

INTRODUCTION

Aviation has become an integrated part of our life. Aircrafts are combat and work equipments, common means of transportation, and also influenced the field of sports.

It is obvious, that as in our everyday life, as well in the field of aviation, we cannot avoid a certain level of obvious or hidden risks. Several weather conditions can be mentioned as risk factors that influences how aircraft advance in airspace.

The evolution of instrument flight enabled aircraft and their crew to fly in clouds for longer periods without having a clear view on the terrain. Then we had to face some new hazards, and one of them was icing. During icing, water ice forms on the airframe, antennas etc. of the aircraft. Ice accumulation significantly influences the stability and control of aircraft, so it makes it even more important to predict icing accurately [1]. One of the most emphasized tasks of flight meteorology in particular is to give prompt information in time for the crew, about potential icing risks. For this forecast professionals use accumulation models and algorithms [2]. Despite these calculations and due to dangerous weather conditions, incidents and unfortunate disasters can also occur today. Neither the most modern algorithms, nor the latest models of today are capable to precisely highlight icing zones. Therefore, it may happen that the aircraft enters an icing zone. To decrease ice accumulation in such cases, engineers apply ice protection systems onboard; however, under extreme weather conditions icing can be formed on the airframe even if we already use the mentioned systems.

THE AIRFRAME ICING PROCESS

Surface icing is understood as ice accretion that occurs and develops during inflight in a cloud or in a precipitation zone − rain or snow −, but it also occurs sometimes while flying below the cloud level. It develops on the aircraft below zero when supercooled droplets impact with any part of the external structure of an aircraft during its inflight [3][4]. Its intensity and its type are influenced by several physical characteristics, which can be divided into two main groups. Because aviation occurs in the atmosphere, the first group is determined by the parameters of the atmosphere. The second group consists of the aerodynamic qualities of the aircraft [5].

Meteorological parameters consist of temperature and moisture of the surrounding atmosphere, liquid water content, the concentration of supercooled water droplets and their distribution according to their size (average diameter), quantity of ice crystals within the cloud and the rising speed of air masses. Aerodynamic qualities that are taken into consideration are the speed of the aircraft (Mach number), the temperature of the airframe of the aircraft and its geometrical dimension, its material and roughness and also its structural curvature conditions [6].

The three main conditions of ice accretion among the above mentioned ones [7]:

- presence of water droplets in the atmosphere;
- sub-zero or near-freezing ambient temperature;
- surface temperature of an aircraft structure below zero.

The so called supercooled water droplets are responsible for the development of hazardous airframe icing, they are purified and small in diameter, and they can still exist in liquid form up to a temperature limit of –30 °C. It is an unstable state, which can be easily ended by an external perturbation[1], and water droplets may turn to ice immediately [8].

The larger the size of the droplet (aerodynamic drag proportional to square diameter) the lesser influenced by the flow velocity. On the contrary, smaller droplets are carried along by the stream. Consequently, larger droplets may easier hit the airframe of the aircraft. With the decrease of temperature, the diameter of supercooled droplets will become smaller too, which means that they will not reach the size of 1 mm in –20 °C atmosphere [8]. It is clear from the above considerations that we may face the most dangerous icing conditions when the atmosphere is quite warm but still subzero, and the concentration of supercooled droplets is high.

As highlighted in figure 1, several tests have been made to prove that supercooled droplets with different diameters form various types of ice accretions. It was also confirmed, that the most dangerous ice accretion may occur if the diameter of the droplets is smaller than 50 μm [10].

Larger supercooled droplets can be found in the atmosphere in two forms:

1. freezing rain;
2. larger droplets formed by merged smaller droplets.

The first case is triggered by a vertical atmospheric temperature layering. An airmass, that is warmer than the inversion freezing point stuck between the upper and the lower atmosphere. Snow precipitation from the upper atmospheric layer melts in the warm inversion zone and

[1] external influence

eventually cools down in the subzero atmospheric layer. The latter must be sufficiently thick to have the temperature of the droplet cooled under 0 °C. As will be shown later, these supercooled droplets will form clear ice on specific surfaces of the aircraft. This kind of precipitation is easily predictable due to typical vertical atmospheric temperature layers. It also makes the forecast simpler, because most often it coincides with a warm front [11].

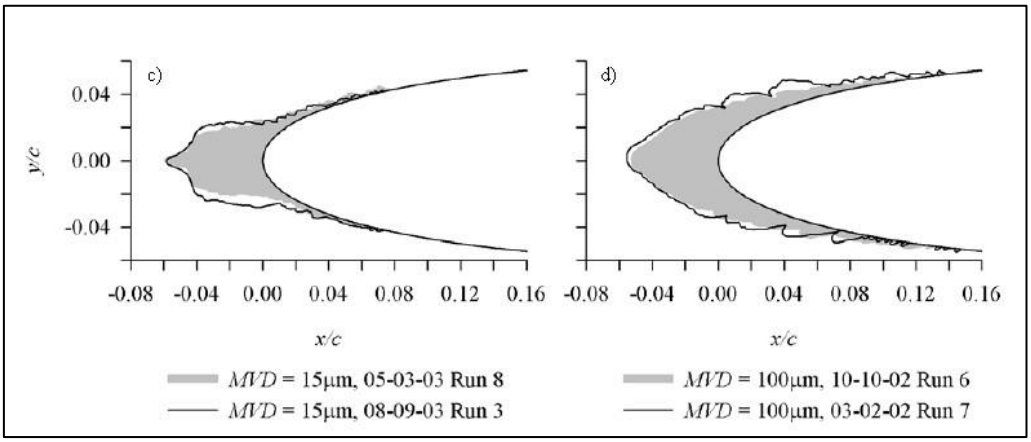


Figure 1. Typical shapes of ice accretion
(MVD: average droplet diameter y/c: chord of airfoil normed width;
x/c: length of airfoil normed by its length) [10]

However, the second case is a challenge for meteorologist professionals. In this case, larger droplets form due to the crash and merge of smaller droplets in the atmosphere. Through the mixing of atmospheric layers, wind shear located at the top of the layered clouds accelerates the development of large droplets [12]. The more supercooled droplets are in the atmosphere, the greater the chance for intensive icing.

INTENSITY OF ICING

Intensity of icing is measured by the speed of ice accretion. Namely, it is described by indicating the thickness (measured in mm) of the ice accreted per minute on a particular unit of the airframe. In science of meteorology, the latter is determined by a three point scale (Table 1) [12].

Category	**Velocity of accretion** [mm/min]
Light	< 0,6
Moderate	0,6–1,0
Severe	> 1

Table 1**.** Types of icing and velocity of ice accretion [3]

Another approach that is usually used by the flight crew is the following: icing depends on the severity of icing environment and how the aircraft acts in these conditions. It also depends on the response of the pilot to the above mentioned conditions. (Table 2)

Type	Description
Trace	Ice becomes perceptible. Rate of accumulation slightly greater than rate of sublimation. It is not hazardous even though de-icing /anti-icing equipment is not used unless encountered for an extended period of time (over one hour).
Light	The rate of accumulation may create a problem if the flight is prolonged in this environment (over 1 hour). Occasional use of de-icing/anti-icing equipment removes/prevents accumulation. It does not present a problem if the dicing/anti-icing equipment is used.
Moderate	The rate of accumulation is such that even short encounters become potentially hazardous and use of de-icing/anti-icing equipment or diversion is necessary.
Sever	The rate of accumulation is such that de-icing/anti-icing equipment fails to reduce or control the hazard. Immediate diversion is necessary.

Table 2. Severity of icing [14]

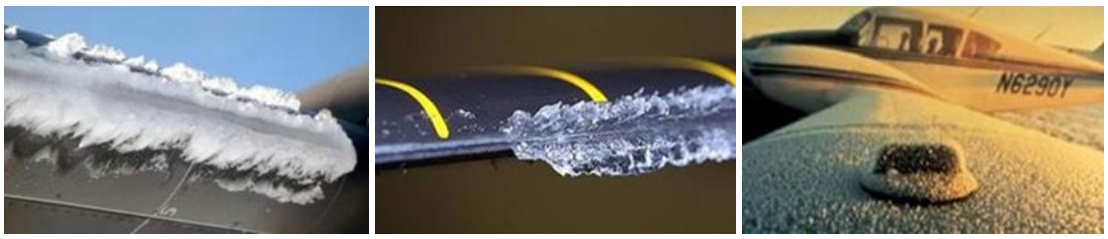
TYPES OF ICING

When aircrafts fly in such subzero airspace which contains supercooled water droplets, these droplets impinge the airframe of the aircraft. Through the impact they immediately form icing on the airframe structure. The outcome of this process is the accumulation of icing in different shapes, colour, density and solidity. In many cases, the surface of this icing is rough, and usually it accumulates on airfoils that are most influenced by airflows [15].

There are three types of icing:

- frost ice,
- rime ice,
- clear ice (figure 2) [7].

The above listed types often appear together. In this case we speak of mixed icing.



Rime ice Clear ice Frost ice

Figure 2. Types of icing [16]

Frost ice

This is the most frequently observed icing type. It is a thin and white crystal deposition that comes into being by direct icing of water-vapour in the atmosphere. Usually it develops in a clear atmosphere, where, with the support of sublimation, water-vapour immediately forms icing on the airframe structure. It does not directly pose a threat to the flight, but it could be the source of a subsequent accretion.

Frost ice can be observed mainly in two different situations [7]:

1. during a fast descent from an extremely cold area to a wet and relatively warm area,
2. during climbing from a subzero environment through an inversion layer.

Clear ice

Clear or glaze ice is formed by larger supercooled water droplets, of which only a small portion freezes immediately, other droplets will flow backwards in the direction of the airflow (run-backwater). It happens because the latent heat released during the freezing increases the temperature of the airframe to above subzero. Water flown backwards will form ice accretion on other areas of the airframe. This is what we call wet-growth icing. Icing developed in these circumstances is called clear or glaze ice [17]. Since the resultant frozen deposit contains relatively few air bubbles, the accreted ice accretion is transparent or translucent. The resultant transparent sheet of ice may be difficult to detect and to remove from the airframe. Contrary to other accretion types it has a more robust structure and it can reach larger sizes. Because of its uneven thickness and combinations of double ram's horns it can cause significant complications. It is complicated to identify this type of icing from the cockpit.

Rime ice

Rime ice is formed when small supercooled water droplets freeze rapidly on contact with a subzero surface before other droplets can get there. This is what we call dry-growth icing. All droplets form a separate ice crystal. The rapidity of the transition to a frozen state is because the droplets are small and the almost instant transition leads to the creation of a mixture of tiny ice particles and trapped air. The resultant ice deposit formed is rough and crystalline and opaque and because of its crystalline structure, it is brittle. Most often it forms on leading edges of the aircraft. This type is called rime ice. Due to air inclusion this type of accretion is weak and fragile. These types of small diameter supercooled droplets can be found mainly in the following cloud types: Nimbostratus, Altostratus, Altocumulus, Stratocumulus and Stratus. In some cases they can also be found on the top of Stratocumulus clouds [3].

In conclusion, it can be stated that different types of accretions (Figure 3) may be formed in connection with certain parameters of meteorological parameters. (Table 3) [14].

Type	Necessary conditions
Moderate or severe intensity clear ice	Large supercooled droplets Nimbostratus, Cumulonimbus clouds Temperature between −20 °C and 0 °C
Light or moderate intensity rime ice	Small supercooled droplets Layered cloudiness Temperature between −10 °C and ±0 °C
Light intensity rime ice	temperature lower than −10 °C Layered cloudiness Small diameter supercooled droplets
Frost ice	Temperature between −40 °C and −20 °C Cu, Cb and Ns clouds Small diameter supercooled droplets

Table 3. Necessary conditions of ice accretion [14]

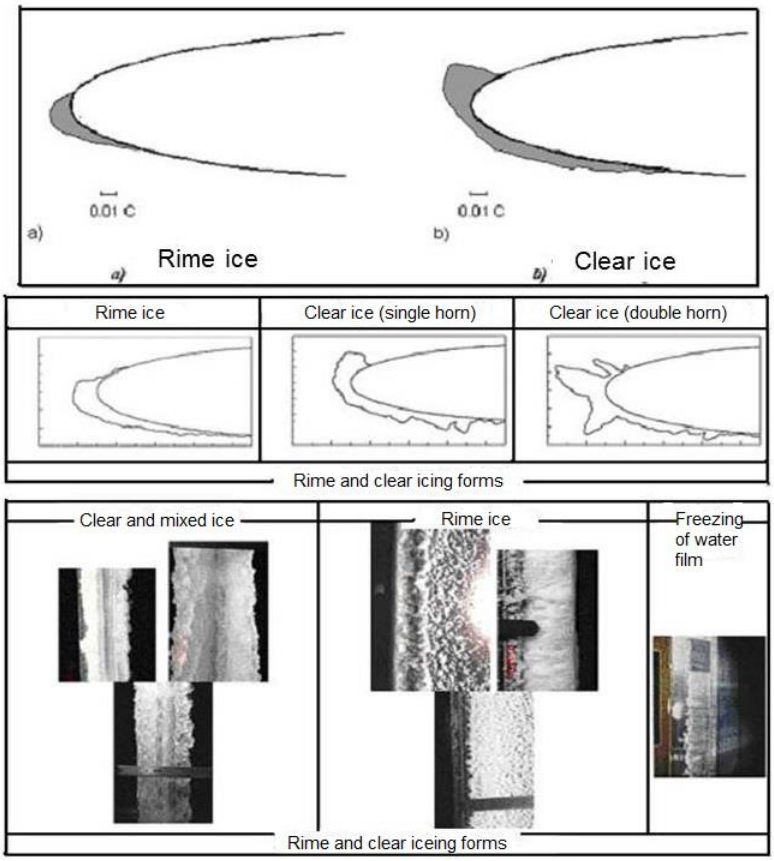


Figure 3. Types of icing [18]

Beside the above mentioned categories it is also worth to geometrically categorise ice accretion. It is interesting to do so, because shapes of ice accretion significantly influence e.g. the aerodynamic shape of the leading edges of the wings, and namely the airflow around it [18]. From a geometrical point of view, ice accretion is undertaken in four general categories. These are: roughness, horn ice (figure 5), stream wise ice (figure 4), spanwise-ridge ice.

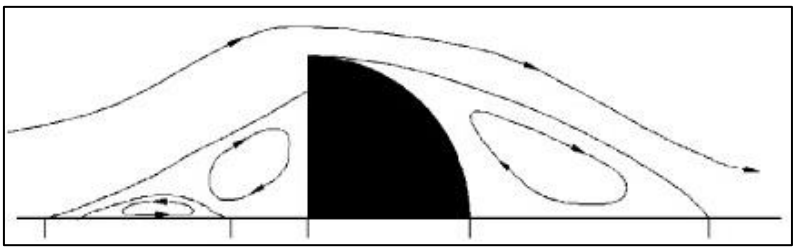


Figure 4. Streamlines by spanwise-ridge type ice accretion [20]

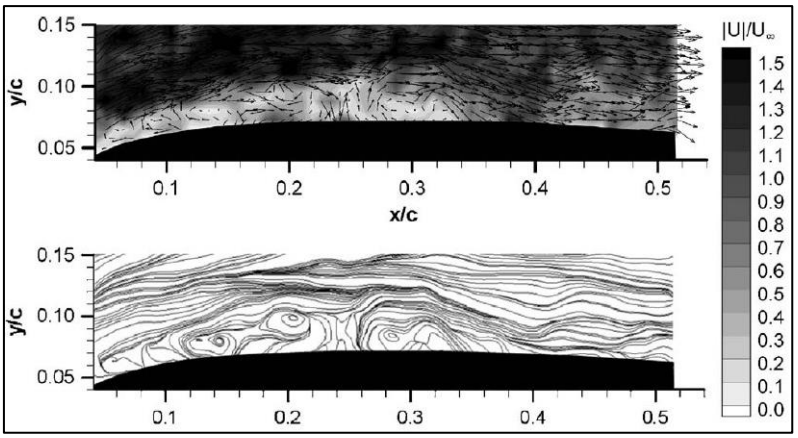


Figure 4. Airflow alteration caused by horn ice accretion type (x/c: average droplet diameter y/c: chord of airfoil normed width; x/c: length of airfoil normed by its length; U/U_∞ : speed of clear airflow normed by speed of airflow) [20]

The impact of icing on AIRCRAFTS

During the flight, the above mentioned accretion forms may appear individually, but they can also appear collectively. Figure 6 illustrates clearly how different geometrical types of accretions influence the aircraft's shape and aerodynamic conditions [20].

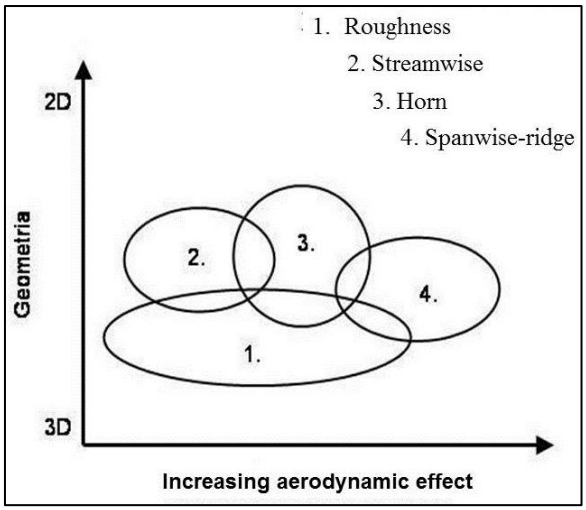


Figure 5. Aerodynamic impact of ice forms in case of ice accretion on the airfoils [20]

From a geometrical point of view, rough accretion does not change the shape of certain parts of the aircraft, but it can still cause aerodynamic effects. It may result in the increase of the aerodynamic drag and may cause a decrease in buoyancy. All the other types of ice accretion may change the shape of the aircraft, which may cause significant changes in the aerodynamic conditions of the aircraft. In relation to horn and spanwise-ridge types of accretion, a significant decrease of the buoyancy can be observed beyond the horn. In relation to spanwise-ridge, it also can be observed in front of the accretion due to turbulent zones. In connection with the flight, the above mentioned points are considered to be the greatest accretion risks.

Depending on the duration of the flight of the aircraft in the icing zone, depending on the weight of the airframe, weight of accreted ice can be significant. It can modify the flight profile of the aircraft and its aerodynamic conditions [21].

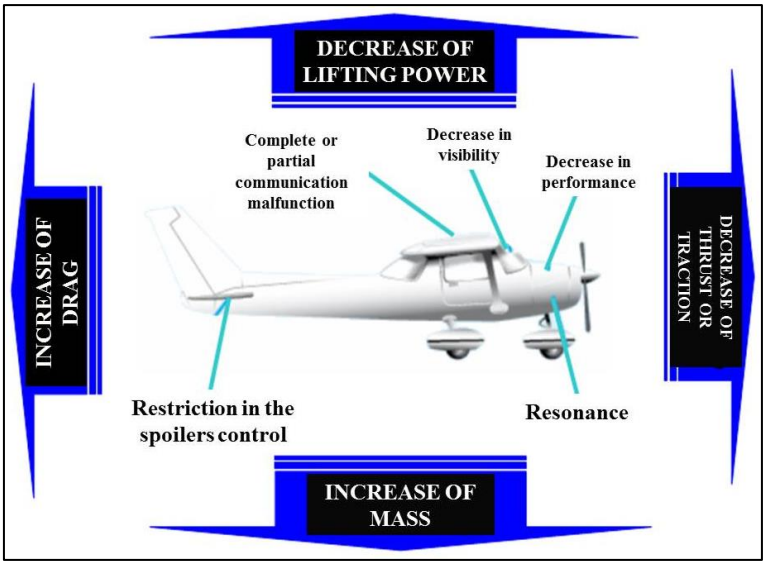


Figure 6. Impact of icing to aircrafts [23]

The impact of the ice accretion on the performance and flight characteristics of the aircraft greatly depends on the design of its airframe and aerodynamic construction. As is shown in figure 6, it also depends on the width of the ice accretion. However, in general it can be said that the weight of the aircraft must be considered. In addition, the decrease of the buoyancy and the increase of the aerodynamic drag in connection with the rough surface also have to be considered as well. To maintain the same flight conditions, thrust or traction has to be increased. The critical angle of the aircraft will also decrease. Because of this decrease, the flight control process may be significantly changed. Prudent control shall be applied to enable the pilot to leave the icing zone as soon as possible (Figure 7) [22][23].

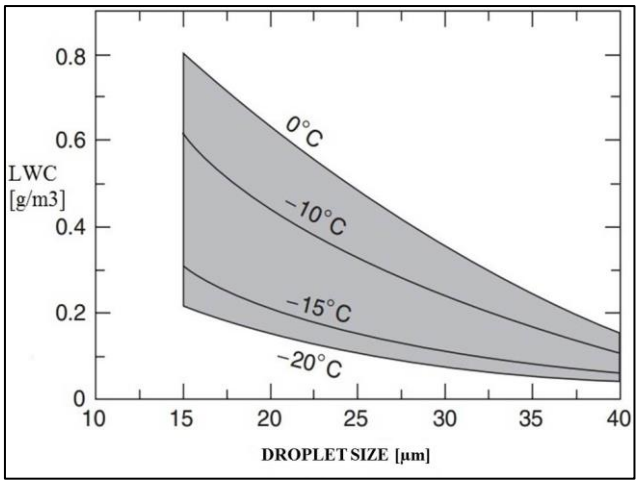


Figure 7. Icing according to temperature and liquid water content (LWC) (the grey area highlights the conditions in which the aircraft has to safely execute its flight tasks in order to get a licence to fly among icing) [24]

Certainly, a large percentage of aircraft is capable to fly in icing conditions. To get the required authorization to do so, certain aircraft have to pass different investigations. During these tests,

flight tasks have to be executed in different types and intensity of icing conditions. The results must prove that ice accretion formed on the airframe does not significantly hamper flight procedures, i.e. that the flight can be safely implemented. Environmental conditions and limit values are determined by measurements (Figure 8) [24].

Almost all aircraft that are allowed to fly in icing conditions are equipped with anti-icing and icing detection systems. These systems are developed and applied to prevent ice accretion, or to have ice accretion removed from the airframe.

ESTIMATION OF ICE ACCRETION AND POSSIBILITIES OF ICING PREDICTION

Developing ice accretion during the flight may present a significant danger to flight procedures and to the execution of the flight. Despite the fact that pilots have been confronted with icing since the early years of flying in clouds, a catastrophe that happened in Indiana [25] in 1994 and left 68 victims, was necessary to make the National Transportation Safety Board establish its first recommendations regarding icing [26]. In accordance with these recommendations, the Federal Aviation Administration has encouraged research regarding with icing prediction and the establishment of appropriate regulations and procedures.

Today, the icing prognosis presented to the flight crew has to contain a lot of information:

1. The area of the forecasted icing zone in the atmosphere;
2. The intensity of icing (in consideration with ICAO recommendations);
3. The predicted form of ice accretion, in particular to the most hazardous, the horn shape dice.

The above mentioned data is to be provided by meteorologist professionals and applicable a certain type of aircraft or to a certain class of aircraft. Data shall be provided reflecting the initial geometric and aerodynamic conditions of the actual aircraft [23].

In the beginning, meteorologists established their predictions based on their own experience and observations, and they also used the results of numeric models [27]. During subsequent scientific research, a connection was found between the temperature (T) and the relative humidity (RH). With the assignment of certain limit values, areas of icing reported by the flight crew via the PIREP[2] system were almost corresponding, a simple, dual layer icing model was established. This model is based on the relation of temperature and relative humidity [28]. The next step was to apply among T and RH data the vertical temperature distribution as well [29], and then, microphysical schemes were established too. These schemes were used to precisely predict the quantity of supercooled droplets in the atmosphere [30].

Beside numeric tendency, evolution could be observed in the field of satellite and radar data application [31]. The aim of scientists was to establish such an autonomous algorithm. It enables the forecaster not to collect and analyse the data of several sources by person. The main objective is to get the possible areas of icing and the concentration of supercooled droplets in a

[2]PIREP telegram is a report issued by the flight crew that contains information in relation to the actual meteorological conditions relevant for the ongoing flight procedures. Usually, basic information is transmitted via radiomailing, then ground authorities continue to spread the information in an appropriate form.

3D model domain. To achieve this, satellite, radar, surface measurement, lightning and PIREP data were combined with the results of the model (Figure 9), [26].

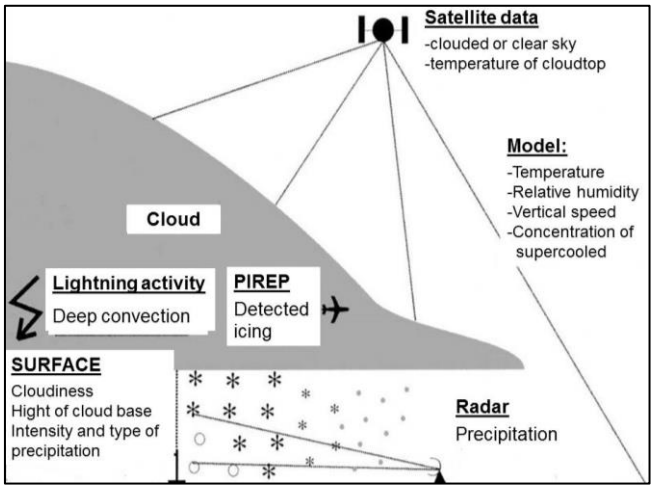


Figure 8. General schematic model of CIP [26]

The procedure that links together the above listed data is called Current Icing Potential – CIP.

The algorithm is highlighted in figure 10 and consists of six main steps.

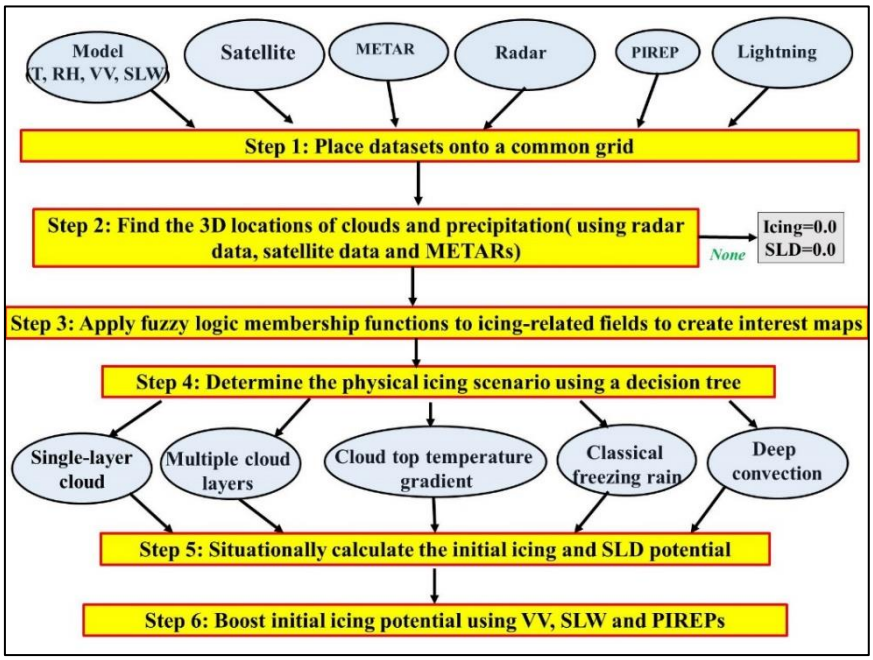


Figure 9. CIP algorithm [26]

Although CIP algorithm is not yet used in Hungary, several case studies prove that its application would improve icing related predictions significantly.

It is recommended to determine the area of possible icing, its intensity and the geometry of possible ice accretion in order to make flight activity even safer. This model consists of three main steps. First, we have to identify the possible area of the airflow in case of a clean airframe surface, then the quantity of the water droplets impacting the surface has to be determined (additional thermo dynamic analysis is also needed); finally, the ice type of the possible ice accretion has to be estimated (Figure 11) [18].

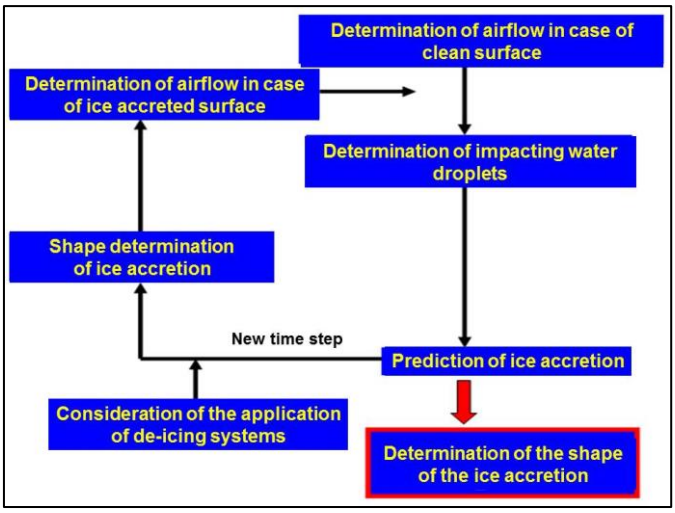


Figure 10. Estimation of ice accretion [18]

In the recent years, several algorithms have been established. One of them was created by *Lozowski* in 1983 [32][33] and this one possibly achieved the biggest breakthrough. His icing accumulation model presents the airfoil of the aircraft as a non-heated and non-rotating cylinder that is placed under moderate streaming (Figure 12). He describes the conduct of the formed ice accretion in certain environmental and aerodynamic conditions.

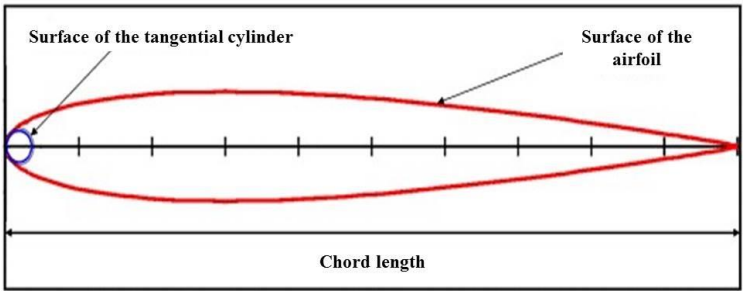


Figure 12. Cross-section view of the airfoil and its tangential cylinder [19]

The algorithm consists of 3 main steps. First, the side part of the cylinder facing the airflow is divided into sectors, then; the size spectrum of particles is also categorized. After the appropriate discretizations are performed, impact efficiency and mass flow rate of liquid water content shall be indicated for all sectors and scale. The second part of the prediction algorithm is to solve the energy imbalance equation concerning the surface of the airframe.

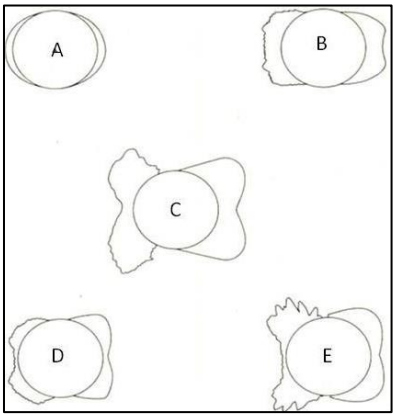


Figure 13. Certain possible forms of ice accretion [32]

After solving the numeric equation, the next step is the specific prediction of the type and extent of possible ice accretion. Results can also be highlighted graphically; in this way the intensity and geometry of the possible ice accretion can be easily demonstrated (Figure 13).

Detailed descriptions of the algorithm can be found in Lozowski's article [32][33]. Today, this model is commonly used in several forecast centres.

At present, the aim of some researches is to find a more efficient and accurate way with regard to icing prediction [34]. Main breakthrough in the future may be, the establishment and application of such algorithms, which are based on neural networks. Cornerstones of these algorithms have already been settled. However, additional research is needed for applying them to operational prediction.

ICING DETECTION AND DE-ICING SYSTEMS

Ice accretion on the structure of the aircraft has got potential hidden risks. It can cause serious problems during flight, unless accretion is prevented or the icing already established is removed in adequate time. To gain the effect of implementation of the required steps, the most influenced structural elements have to be identified properly. Today, based on several results of scientific experiments and flight experience it can be stated, that sensitive areas of the aircraft are as follows [35]:

- rotors; propellers; vertical stabilizers and tailplains, empennage;
- antennas, sensors and instruments applied outside the fuselage;
- leading cross-sections of engine inlet passages, dust protection systems and flow diverters;
- cockpit windows.

To avoid ice accretion on these surfaces, de-icing systems are used. They prevent ice accretion, or, during the flight they remove the icing from the aircraft. There are two main types of this equipment:

- de-icing systems (icing has not accreted already);
- anti icing systems (used against accreted ice).

To remove the already accreted and still growing icing, mechanical de-icing processes also may be used. Processes appropriate both for prevention and for removal of accreted icing are:

- physical and chemical de-icing processes;
- thermal systems.

In relation to the relatively high specific energy needs of de-icing systems these are usually operated cyclically. Duration of the active phase is determined by external thermal conditions.

Mechanical de-icing methods can be applied efficiently against icing which is not wider than 4-5 mm. Therefore, de-icing procedure has to be carried out at appropriate intervals in connection with the intensity of accretion.

There were some de-icing methods already in the 1930s. At this time, special inflatable rubber coating was applied on the leading edges of wings, tailplanes and vertical stabilizers. From time to time they pressed high-pressure air into these rubber coatings and pumped them up. Due to their increased volume the accreted ice cracked and was being detached by the airflow (Figure

14). This method seemed to be efficient earlier, but later on it was proved, that it significantly modifies the aerodynamic drag of wings and its operating time was also too short.

Figure 14. Pneumatic de-icing system [35]

Then, engineers tried to apply special water repellent layer on aircrafts. By covering the airframe surface of the aircraft with this layer, the ice binding capacity of the concerned areas increased. However, it also proved to be not an efficient solution, because the protective layer cracked and became detached in a short period.

Today's preferred type of de-icing system is the so called pneumatic de-icing boots. This equipment is cost-efficient and can be used in a wide temperature range, and can be operated without any collateral ice accretion.

Mechanical de-icing methods are used mainly by fixed wing aircrafts. [7]

Thermal, physical and chemical de-icing methods may be more efficient applications in relation to fixed wing and rotary wing aircrafts.

Application of chemicals is practical for the former that adhere properly on the treated surface and can get mixed together with supercooled water droplets, and do not destroy the airframe structure. The essence of this method is to establish a porous layer, or a layer that contains holes in significant segments of the aerofoil. Through these holes, the TKS fluid is injected on the wing or on the rotary wing, and it flows backwards and expands.

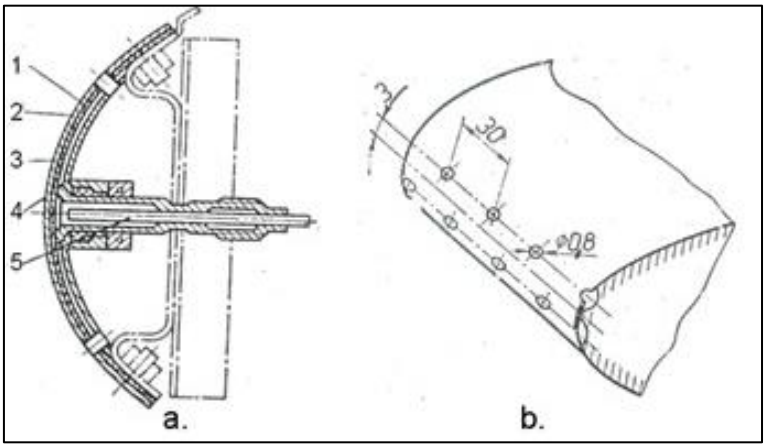


Figure 15. Chemical de-icing of the leading edge [35]

De-icing fluid can be injected on the external layer by two utilization methods. In case of a low operating pressure (figure 15.a) the fluid is directly injected into the supply channel (5), and from there it flows into the distribution channel (3). Finally, it is pumped through a dual layer porous coating (1; 2) onto the external surface of the wings. The internal part of the distribution pipe is made of sheet metal (4). At high-pressure systems (e.g. helicopter rotors) the chemical is pumped in the supply channel and injected through d ≈ 0,8 mm bores that are installed in every 300 mm on the surface of the rotor blades. (Figure 15 b).

This de-icing method is effective, however in adverse weather conditions its continuous application might be recommended. Unfortunately, due to the capacity of the de-icing liquid's container, only a limited utilisation of the system is available.

The dominant type of de-icing system is the electro-thermo de-icing method. By applying this method, the area that is to be protected is heated to such temperature on which ice is not able to accrete. Usually the heating takes place by hot air received from the high-pressure compressor of the jet engine, or the relevant area is heated by heating cords. Occasionally, the engine inlet is heated by hot engine oil.

The hot bleed air method is inefficient and it also reduces the efficiency of the engine. On the areas not effected properly by the heating, or not even heated, ice traverses may be accreted.

Today, the most effective and most modern thermal method is the electrical heating. It is high-efficiency and its application does not result a large increase in the empty mass, and de-icing of the smallest instruments is also feasible.

The power transmission of electric de-icing systems of certain aircraft is usually provided by three phase electric power network which is 115 or 208 V 400 Hz alternating current. The required unit per surface is 6–15 kW/m^2. Periodical operation of the system is absolutely necessary, e.g. in case of large size aerial vehicles the continuous operation of these de-icing systems would require several hundreds of KW. During such periodical operation it may happen, that intensity of ice accretion exceeds the intensity of de-icing. In such cases a thin water layer develops between the accreted ice and the surface of the airframe. Despite this course the ice already presented on the airframe cannot get off, moreover, on the external part it can further develop (Figure 16.a, upper part).

The above mentioned phenomenon can be terminated with the application of the so called bleed air method that routes the heat of the engine along the leading edges of wings and tailplanes It divides accreted ice into two separate layers, these layers get off from the airframe due to the effect of the cyclic bleed air system and the current airflow (Figure 16.a, lower part).

In case of a larger geometric surface size to be protected, bleed air method is not only needed by the leading edges of wings and tailplanes, but it can also be applied along the aerodynamic chord This kind of application of this method can be useful, because in case of a larger surface greater ice will be accreted and greater pieces can get off from the aircraft, which may cause damages on the airframe. In this case, cyclically operated heating elements are built in the bleed air system (Figure 16 b.) [35].

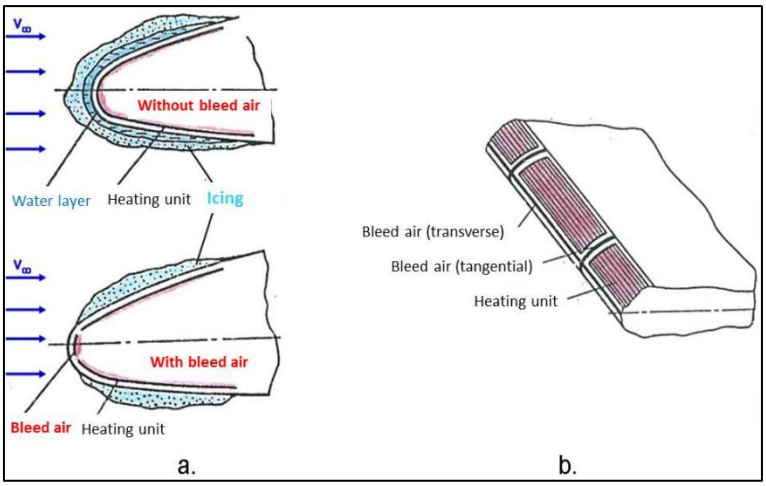


Figure 16. Operation of the bleed air system and its instalment options [35]

Jet fuel by itself also contains a certain quantity of water. When water is cooled and ice crystals are formed it can endanger the safe fuel distribution to the engines. To avoid it, anti-icing additives are mixed with jet fuel and with kerosene. Anti-icing additives reduce the freezing point of the water. Another solution is to apply a separate heating system to keep the temperature of the fuel above 0 °C.

The above mentioned methods and systems are only to be applied inflight. Anti-icing of aerial vehicles available at the airport is implemented by special equipments, methods and chemicals during their flight preparation. Required ground anti-icing procedures are executed by the ground staff (Figure 17).

Figure 17. Chemical defrosters and hot air engines [35].

In summary, on the one hand it can be said, that aerial vehicles may be applied with such de-icing systems which are capable to consistently provide de-icing capability in average weather conditions and in any flight modes, on the other hand these systems may be capable to provide proper de-icing in extreme weather conditions as long as the aircraft leaves the dangerous area.

SUMMARY

It can be stated, that, depending on the flight altitude and main features of the aircraft and weather conditions, a significant bulk and mass of ice can be accreted on the surface of an aircraft. It can considerably influence its flight characters (mass load, centre of gravity thus its stability and control), unless the accreted ice is not removed or the establishment of accretion is not avoided properly. One of the most efficient option to avoid icing is to avoid icing environment during inflight. In order to avoid this, a very precise and correct meteorological forecast is needed which is tailored to the needs of customers. This forecast have to contain data on the spatial and temporal distribution of icing conditions and on the possible forms of ice accretion, its geometry and intensity.

Prediction of ice accumulation claims professionals to a complicated task. Because of ice accretion, experts have to have comprehensive meteorological knowledge and they also have to fully understand events of ice accretion. In the last decades, aviation, technical conditions, onboard equipments and the quality of weather forecast significantly improved. However, application of modern icing prediction algorithms and models are at an early stage in Hungary, and several scientific researches have to be done prior to the adaption of these new models.

Certainly, the most modern prediction models are also not capable to perfectly predict icing zones nor on the spatial, neither on the temporal. So, preparations have to be made for a situation that aircrafts inflight may be operated in icing zone. Flight safety has to be sustainable also from this perspective. The most effective instruments of this foundation are de-icing systems of aerial vehicles.

REFERENCES

[1] Bottyán Zs.: A pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) felületi jegesedésének aspektusai és a jéglerakódás becslésének lehetőségei. Repüléstudományi Közlemények, 24 (2012), 577-588.
[2] Bottyán Zs. és TUBA Z.: Felületi jegesedést okozó időjárási helyzetek statisztikai vizsgálata és a jégakkréció becslése pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) esetében. Repüléstudományi Közlemények, 24 (2012), 642-651.
[3] Sándor V. és Wantuch F.: Repülésmeteorológia. OMSZ kiadványa. Budapest, 2004.
[4] Bottyán Zs.: A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról II.: Légkörünk jelenségei repülésmeteorológiai megközelítésben. Repüléstudományi Szemelvények: A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának kérdései, 2017, 27-50.
[5] Gent R.W., Dart N. P. and Cansdale J. T.: Aircrafticing. The Royal Society, 358, 2873-2911., 2000.
[6] Bottyán Zs. és Hadobács K.: A repülőgépek felületi jegesedésének termodinamikai folyamatairól. Repüléstudományi Közlemény, 23 (2011), Special Edition, 2011
[7] Mingione G., and Barocco M.: Flight in icingcondition, Summary, url: http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGAC_Icing_flight_manual.pdf
[8] Cober S.G., Isacc G.A. and Strapp J.W.: Characterizations of Aircraft Icing Environments that Include Supercooled Large Drops, Journal of Applied Meteorology, 40 (2001) 1984-2002.
[9] Fernandez-Gonzalez S., Sánchez J. L., Gascón E., López L., García-Ortega E. and Merino A.: Weather features Associated with Aircraft Icing Conditions: A Case Study. The Scientific World Journal, 2014.
[10] Tsao J.-C. and Anderson D.N.: Additional Study of Water Droplet Median Volume Diameter (MVD) Effects on Ice Shapes. 2005. url: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050215215.pdf
[11] Isaac G. A., Cober S. G., Strapp J.W, Korolev A. V. Tremblay A. and Marcotte D. L.: Recent Canadian Research on Aircraft In-Flight Icing. Canadian Aeronautics and Space Journal, 47(3) (2001).
[12] Rasmussen R.M., Geresdi I., Thompson G., Manning K. and Karplus E.: Freezing Drizzle Formation in Stably Stratified Layer Clouds: The Role of Radiative Cooling of Cloud Droplets, Cloud Condensation Nuclei, and Ice Initiation. Journal of The Atmospheric Sciences, 59 (2002), 837-860.

[13] ICAO, 2007: Meteorological Service for International Air Navigation. Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation url: http://www.icao.int/
[14] Oxford Aviation Academy: ATLP Ground Training Series – Meteorology, 2008
[15] Bottyán Z.: In flight icing characteristics of unmanned aerial vehicles during special atmospheric condition over the Carpathian Basin. ACTA Geographica Debrecina Landscape and Environment, 7, 2 (2014), 74-80.
[16] Icingcondition. url: http://www.thefullwiki.org/Icing_conditions
[17] LIST R.: Ice Accretions On Structures. Journal of Glaciology, 19 (1977), 451-465.
[18] url: http://extice.cira.it/project/proposal-summary
[19] Bottyán Zs.: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions - a fixed-wing approach. Időjárás, 115 (2011).
[20] Bragg M.B., Broeren A.P. and Blumenthal L.A.: Iced-airfoil aerodynamics. Progress in Aerospace Sciences, 41 (2005), 323-362.
[21] Bragg M.B., Hutchison T., Merret J., Oltman R. and Pokhariyal D.: Effect of Ice Accretionon Aircraft Flight Dynamics, 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit January 10-13, 2000/Reno, USA, AIAA 2000-0360, 2000
[22] Anderson J. D.: Fundamentals of Aerodynamics. McGrow-Hill, New York, 2001
[23] Hadobács K.: Repülésre veszélyes időjárási helyzetek rekonstrukciójának alkalmazási lehetőségei – Felületi jegesedés becslése és a hozzá tartozó szimulációs környezet kialakítása. Diplomamunka, ELTE-TTK, 2011
[24] Politovich M. K.: Aircraft Icing url: http://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter5/Ency_Atmos/Aircraft_Icing.pdf
[25] Accident description. url: http://aviation-safety.net/database/record.php?id=19941031-1
[26] Bernstein B. C., Mcdonough F., Politovich K. M and Brown B. G: Current Icing Potential: Algorithm Descripion and Comparison with Aircraft Observations. Journal of Applied Meteorology, 44 (2005).
[27] Jensen C. E.: Prediction of large scale cloudiness and air-frame icing conditions by machine methods. J. App. Meteor, 2 (1963), 337-344.
[28] Schultz P. and Politovich M. K.: Toward the improvement of aircraft icing forecast for the continental United States. Wea. Forecasting, 7, p 491-500, 1992.
[29] Forbes G. S., Hu Y., Brown B. G., Bernstein B. C. and Politovich M. K.: Examination of soundings in the proximity of pilot reports of aircraft icing during STORM-FEST. Pre-prints, Fifht Conf. on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 282-286, 1993.
[30] Reisner J., Rasmussen R. M. and Bruintjes R. T.: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 meso scale model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124 (1998), 1071-1107.
[31] Reinking R. F.., Matrosov S. Y., Bruintjes R. T. and Martner B. E.: Identification of hydrometeors with elliptical and linear polarization Ka-band radar. J. Appl.Meteor, 36 (1997), 322-339.
[32] Lozowski E.P., Stallabrass J.R. and Hearty P.F.: The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I: Icing Wind Tunnel Experiments. Journal of Climate and Applied Meteorology, 22 (1983), 2053-2062.
[33] Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R. and Hearty, P.F.: The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I: A Simulation Model. Journal of Climate and Applied Meteorology, 22 (1983), 2053-2062.
[34] Gyöngyösi a. z., Kardos p., Kurunczi r. and Bottyán zs.: Development of a complex dynamical modeling system for the meteorological support of unmanned aerial operation in Hungary. ICUAS: Conference Proceedings, 2013, 8-16.
[35] Dr. Óvári Gy.: Biztonságtechnika a repülésben: A repülőeszközök jégtelenítő rendszerei. Repülés-tudományi Közlemények, Special edition, 2008

REPÜLŐESZKÖZÖK REPÜLÉS KÖZBEN BEKÖVETKEZŐ JEGESEDÉSÉNEK KOCKÁZATAI, ÉS A KOCKÁZAT- CSÖKKENTÉS LEHETŐSÉGEI –
JEGESEDÉST ELŐREJELZŐ ALGORITMUSOK ÉS JÉGTELENÍTŐ RENDSZEREK

Mindennapi életünk fontos részévé vált a repülés, mely nyilvánvalóan veszélyeket hordoz magában, egyértelmű vagy rejtett formában. A kockázati tényezők közé sorolható számos időjárási jelenség is. A műszeres repülés fejlődésével lehetőség nyílt arra, hogy a repülőgépek a felhők belsejében hosszabb ideig műszerek szerint repüljenek. Ekkor egy addig ismeretlen veszéllyel, a jegesedéssel találkoztak, mely jelenség során a repülőgépek sárkányszerkezetén stb. jég rakódik le, mely szignifikánsan befolyásolja a repülés folyamatait, a repülőgép irányíthatóságát. A repülésmeteorológia egyik kiemelt feladata, hogy a repülőgép személyzetét időben tájékoztassa a potenciális jegesedési veszélyről [1], mely előrejelzéshez akkumulációs modelleket alkalmaznak. Ennek ellenére repülésre veszélyes időjárási körülmények között ma is bekövetkezhetnek repülőesemények. Annak érdekében, hogy ilyen esetben csökkentsék az akkumuláció mértékét jégtelenítő rendszereket helyeztek el a repülőgépeken. De repülőgépek jegesedésének problémájával gyakran a jégtelenítő rendszerek megléte mellett is számolni kell.

Kulcsszavak: *repülés biztonság, jegesedés, jegesedés előrejelzés, jegesedést megelőző rendszerek, jégtelenítő rendszerek*

Hadobács Katalin hadnagy	Lt (OF1) Katalin Hadobács
meteorológus főtiszt	meteorologist officer
MH GEOSZ IESZO	HDF GEOS
katalin.hadobacs@gmail.com	katalin.hadobacs@gmail.com
orcid.org/0000-0003-1200-5098	orcid.org/0000-0003-1200-5098

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-14-0486_Hadobacs_Katalin.pdf

Vas Tímea

HADMŰVELETI REPÜLŐTEREK ÁLTALÁNOS ÉS SPECIÁLIS FORGALMÁNAK IRÁNYÍTÁSÁHOZ SZÜKSÉGES KÉPESSÉGEK I.

A hadműveleti területen található repülőtereken, általában 6-8 hónap időtartamban szolgálatot teljesítő katonai légiforgalmi irányítók, már néhány éves tapasztalattal és kellő jártassággal rendelkező szakemberek. Elmondható azonban, hogy a képzési során tapasztalt különbségek, gyakorlatban alkalmazott eljárások, jártasságban tapasztalt eltérések, nem utolsósorban nemzeti hovatartozásuk miatt eltérő környezetből érkeznek, de viszonylag rövid idő alatt munkavégzésre alkalmas tudással és képességekkel kell rendelkezniük. A cikk első részében a szerző azt vizsgálja, hogy milyen felkészülési lehetőségek állnak rendelkezésre, milyen struktúrában és követelményrendszer alapján lehetne a leghatékonyabban a megváltozott környezetben való munkavégzéshez alkalmassá tenni a különböző háttérrel rendelkező légiforgalmi irányítókat.

Kulcsszavak: *légiforgalmi irányító képzés, speciális felkészítés, elméleti és gyakorlati tananyag, képzési struktúra, beválás vizsgálata;*

A magyar katonai légiforgalmi irányítók először a PfP (Partnership for Peace) békepartnerségi program[1] keretében, majd az ország 1999-es NATO (North Atlantic Treaty Organization) csatlakozása után is számos alkalommal szolgáltak olyan repülőtereken, melyek a béketeremtő műveletek támogatására felajánlott katonai és polgári forgalmat egyaránt kiszolgálták. Ezek közül érdemes kiemelni a Pristina-i repülőtéren eltöltött éveket a délszláv válság idején, az ISAF (International Security Assistance Force) keretein belül a kabuli nemzetközi repülőtér közös, katonai polgári forgalmának irányítását, majd 2014 óta a napjainkban is folyamatban lévő NATO RS (Resolute Support Mission) égisze alatt az ugyancsak afgán Mazar Al Shariff, és egy rövid ideig a kunduzi repülőtéren teljesített szolgálatokat. Az elmúlt 20 éves időszakban több katonai légiforgalmi irányítói generáció fordult meg a fenti repülőtereken, akik különböző képzési struktúrában szerezték tudásukat, más elméleti és gyakorlati ismeretekkel rendelkeztek, eltérő jártassággal és tapasztalattal vágtak bele a megváltozott környezetben történő munkavégzésbe. Mindegyik hadműveleti területen működő repülőtér esetében elmondható, hogy azt megelőzően, békeidőben a polgári légiközlekedés szolgálatában álltak, majd közös katonai polgári légiforgalmat bonyolítottak, ahol elsősorban a katonai műveleti repülések élveztek elsőbbséget. Ezen túl az is azonos jellemvonás, hogy a konfliktus rendeződése után a repülőtereket újra polgári forgalom szolgálatába állítják és a helyi nemzet légiforgalmi irányítói veszik át az addig nemzetközi katonai légiforgalmi irányítók által biztosított szolgálatot. A magyar katonai légiforgalmi irányítók hazai környezetben kizárólag katonai repülőtereken szolgálnak, képzési tematikájuk és annak elméleti és gyakorlati ismeretanyaga azonban számos területen követi a polgári szabványokat és ajánlásokat, jártasságuk azonban a hazai repülőtereken jellemző alacsony vagy hektikusan változó műveletszám és jártasságfenntartó képzések hiányában elmarad elődeik jártasságától.

[1] 1994. február 8. és 1999. március 12. között

A következőkben bemutatásra kerülnek azok a képzési programok, tematikák, gyakorlati munkavégzésre való felkészüléshez szervezett tanfolyami rendszer sajátosságai, melyek jelenleg rendelkezésre állnak a megváltozott környezetben való gyors beilleszkedés és légiforgalmi irányítói munka ellátására.

A LÉGIFORGALMI IRÁNYÍTÓ KÉPZÉS RENDSZERE

A fejezetben bemutatásra kerülnek a polgári és katonai légiforgalmi irányító képzés sajátosságai, annak rendszere, felépítése, kiemelve azokat a specialitásokat, melyek a műveleti repülőterek forgalmának irányításához szükséges képességeket és tudásanyagot tartalmazzák.

A polgári légiforgalmi irányító képzés rendszere és sajátosságai [1][2][3]

Európában, a polgári légiforgalmi irányító képzést, és annak egységes követelményeit, az Eurocontrol[2] ajánlása és szakmai irányelvei alapján az Európai Unió rendeleti szinten szabályozza. A polgári légiforgalmi irányító képzés tanfolyami képzés formájában történik, melynek elméleti és gyakorlati ismereteit tartalmazó tananyaga, struktúrája és képzési ideje a megszerzendő szakszolgálati engedély jogosításait és kiterjesztéseit szabályozó 340/2015 EK rendelet előírásai szerint kerültek meghatározásra. A közös, minden tagállamra kötelező rendelet alkalmazása, megkönnyíti a szakszolgálati engedélyek kölcsönös elfogadtatását más, európai és azok akkreditálása más, unión kívüli államok területén és repülőterein történő munkavállaláskor. Mivel jelen cikkben, kizárólag a repülőtereken szolgálatot teljesítő légiforgalmi irányítók képzését veszem vizsgálat alá, ezért a rendelet vonatkozásában, a repülőtéri légiforgalmi irányítók, és bevezető irányítók szakszolgálati engedélyei, azok jogosításai és kiterjesztései kerülnek bemutatásra. A polgári repülőterek és azok irányító körzeteiben szolgálatatás biztosítására feljogosító szakszolgálati engedélyek jogosításai, lehetnek:

- „repülőtéri irányítás látással" jogosítás (ADV[3]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult légiforgalmi irányító szolgáltatást nyújtani a repülőtéri forgalom tekintetében olyan repülőtéren, ahol nincsenek közzétett műszer szerinti megközelítési vagy indulási eljárások;
- „repülőtéri irányítás műszerrel" jogosítás (ADI[4]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult légiforgalmi irányító szolgáltatást nyújtani a repülőtéri forgalom tekintetében olyan repülőtéren, ahol vannak közzétett műszer szerinti megközelítési vagy indulási eljárások (e jogosítás csak meghatározott jogosításkiterjesztések legalább egyikével együtt alkalmazható);
- „bevezető irányítás eljárás" jogosítás (APP[5]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult légtérellenőrző berendezések alkalmazása nélkül légiforgalmi irányító szolgáltatást nyújtani érkező, induló vagy átrepülő légi járművek számára;
- „bevezető irányítás légtérellenőrző berendezéssel" jogosítás (APS[6]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult légiforgalmi irányító szolgáltatást nyújtani érkező, induló vagy átrepülő légi járművek részére légtérellenőrző berendezések alkalmazásával.

[2] European Organization for the Safety of Air Navigation https://www.eurocontrol.int/
[3] ADV: Aerodrome Control Visual
[4] ADI: Aerodrome Control Instrument
[5] APP: Approach Control Procedural
[6] APS: Approach Control Surveillance

A „repülőtéri irányítás műszerrel” jogosítás (ADI) kötelezően tartalmazza az alábbi kiterjesztések legalább egyikét:

- „repülőtéri légiforgalom-irányítás” kiterjesztés (AIR[7]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult légiforgalmi irányító szolgáltatást nyújtani a repülőtér környezetében repülő és a futópálya felett zajló forgalom számára;
- „gurítóirányítás” kiterjesztés (GMC[8]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult a repülőtéri földi mozgások irányítására;
- „toronyirányítás kiterjesztés” (TWR[9]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult repülőtéri irányító szolgálati tevékenység ellátására. A toronyirányítás (TWR) kiterjesztés a repülőtéri légiforgalom-irányítás (AIR) és a gurítóirányítás (GMC) kiterjesztéseket is magában foglalja;
- „földi mozgások irányítása felderítő berendezéssel” kiterjesztés (GMS[10]) (ez a kiterjesztés csak a „gurítóirányítás” vagy „toronyirányítás” kiterjesztés megszerzését követően adható meg), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult a repülőtéri földi mozgások irányítására repülőtéri földi mozgást felderítő berendezések alkalmazásával;
- „repülőtéri radarirányítás” kiterjesztés (RAD[11]) (ez a kiterjesztés csak a „repülőtéri légiforgalom-irányítás” (repülésirányítás) vagy „toronyirányítás” kiterjesztés megszerzését követően adható meg), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult repülőtéri légiforgalmi irányító szolgálati tevékenység ellátására légtérellenőrző radarberendezések alkalmazásával.

A „bevezető irányítás légtérellenőrző berendezéssel” jogosítás (APS) tartalmazhat az alábbi kiterjesztések közül egyet vagy többet:

- „precíziós bevezető irányítás radarberendezéssel” kiterjesztés (PAR[12]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult precíziós bevezető irányítási tevékenység ellátására a futópályára való bevezetés utolsó szakaszában lévő légi jármű tekintetében precíziós bevezető radarberendezés alkalmazásával;
- „bevezető irányítás légtérellenőrző radarberendezéssel” kiterjesztés (SRA[13]), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult nem precíziós bevezető irányítási tevékenység ellátására a futópályára való bevezetés utolsó szakaszában lévő légi jármű tekintetében légtérellenőrző berendezés alkalmazásával;
- „közelkörzeti irányítás” kiterjesztés (TCL), mely szerint a szakszolgálati engedélyes jogosult légiforgalmi irányító szolgálati tevékenység ellátására egy meghatározott közelkörzeti légtérben és/vagy azzal szomszédos szektorokban tartózkodó légi jármű tekintetében bármilyen légtérellenőrző berendezés alkalmazásával.

[7] AIR: Air Control
[8] GMR: Ground Movement Control
[9] TWR: Tower Control
[10] GMS: Ground Movement Surveillance
[11] RAD: Aerodrome Radar Control
[12] PAR: Precision Approach Radar
[13] SRA: Surveillance Radar Approach

A légiforgalmi irányító képzés struktúrája és egymásra épülése a fenti célok elérése érdekében az úgynevezett kezdőképzéssel indul. Ez két részre bontható, mint az alap- és jogosító képzés, melynek elméleti és gyakorlati tartalma az említett jogosítások valamelyikét célozza. Ennek a képzési szakasznak a sikeres teljesítését követően a jelölt gyakornoki légiforgalmi irányító szakszolgálati engedélyt szerez, az adott jogosítás vonatkozásában. A következő 3 éves időszak a munkahelyi képzéssel folytatódik, melyen belül az adott jogosítása vonatkozásában szimulátoron és valós helyzetben, oktató felügyelete mellett folytatódik a légiforgalmi irányítói gyakorlat gyűjtése. A munkahelyi képzésnek három szakasza létezik. Az első az úgynevezett átmeneti képzési szakasz, ami a helyszínspecifikus és feladatspecifikus szempontok megértését célozza. A következő a munkahelyi gyakorlati képzés a korábban megszerzett munkakörrel kapcsolatos rutinokat mélyíti el. Végezetül az összetett, zsúfolt, bonyolult forgalmi helyzetek kezelését célzó harmadik lépcső, melynek teljesítése után a gyakornok, a képzés során megszerezett jogosítások és kiterjesztések birtokában légiforgalmi irányító szakszolgálati engedélyt szerez, a megfelelő munkahelyi kiterjesztéssel. A munkahelyi kiterjesztés magába foglalja a repülőteret, mint kiterjesztést, korlátozást annak egyes légtereire, szektoraira, irányítói pozícióra.

A légiforgalmi irányítók továbbképzése, elengedhetetlen a megszerzett irányítói gyakorlati jártasság fenntartásához. Ennek két fajtája létezik, a szinten tartó, illetve az úgynevezett átképzés. A szinten tartó képzés a már meglévő kompetenciákat frissíti fel és gyakoroltatja, mint például a kényszerhelyzeti szituációk gyakoroltatása. Az átképzés pedig egy másik jogosítás, jogosítás-kiterjesztés megszerzését célozza, vagy az operatív környezetben beállt változás miatt a repülésbiztonság növelése indokolja.

A szakszolgálati engedély elengedhetetlen velejárója az egészségügyi alkalmasság mellett, a nyelvi kiterjesztés is, melyet a jelenlegi uniós szabályozás alapján az ICAO és Eurocontrol vizsgatematikája alapján ELPAC (English Language Proficiency for Aeronautical Communication) teszten való megfelelést jelent, 4-6 szinten. Ez egy olyan operatív nyelvtudás meglétét jelenti, ami az angol szakmai nyelv kiejtése, nyelvtani szerkezetek használta, szókincs választékossága, beszéd folyamatossága, beszédértés és kommunikációs interakciók területén megfelel a szakszolgálati engedélyhez rendelt feltételeknek.

A katonai légiforgalmi irányító képzés (MATC) rendszere és sajátosságai [4] [5] [6]

A katonai légiforgalmi irányító képzés struktúrája és időtartama, az egyes nemzetek vonatkozásában változó. A képzések általában az adott nemzet katonai légügyi hatósága által szabályozott környezetben valósul meg, aki a szakszolgálati engedély kiadását és a vizsgáztatást is végzi, a képzések és a bizonyítványok akkreditálására nemzetközileg elfogadott szabály és eljárásrend nem létezik. Fontos azonban megjegyezni, hogy a NATO tagságunkból fakadóan a légiforgalmi irányítók szakszolgálati engedélyinek elismertetéséhez, illetve ahhoz, hogy NATO vezetés alatt álló missziós feladatokban, így a hadműveleti repülőterek légiforgalom szervezésében részt vegyenek ATS (Air Traffic Services) szakszemélyzeteink a 7204 szabvány alapján, olyan szakszolgálati engedéllyel kell rendelkezniük, amely megfelel az ICAO (International Civil Aviation Organization) Annex 1[14] követelményeinek. A jelenleg érvényben lévő Annex

[14] Annex 1: Personnal Licensing

1[15] alapján a szakszolgálati engedélyek jogosításai és kiterjesztései, valamint az azok megszerzéséhez szükséges elméleti ismereteket magukba foglaló tantárgyak a polgári légiforgalmi irányítók szakszolgálati engedélyeinek felelnek meg és részleteiben hasonlatosak az uniós tagállamokra érvényes rendelettel is.

A magyar katonai légiforgalmi irányító képzés sajátossága, hogy az alapképzés nem tanfolyami rendszerben, hanem felsőoktatási alapképzés keretein belül valósul meg. Ennek egyik oka az, hogy a beosztások betöltéséhez, valamint az ezzel járó felelős feladat ellátásához felsőfokú végzettséget és tiszti rendfokozatot rendelnek, másrészt pedig, hogy a felsőoktatási alapképzésen belül a szakirányú ismeretek mellett speciális katonai ismereteket és a honvédelmi rendszer működéséhez szükséges ismereteket is szereznek a hallgatók. Az alapképzés utolsó 4 szemeszterében már csak szakmai tárgyakat, elméleti és gyakorlati ismereteket tanulnak a hallgatók, a katonai repülés és repülésirányítás speciális ismereteit, valamint angol szakmai nyelvet. Az alapképzés során részt vesznek csapatgyakorlaton, ami már a munkahelyi képzés megkezdésének alapjait szolgálja, viszont fontos különbség a polgári és katonai légiforgalmi irányító képzésben, hogy a felsőoktatási alapképzés végén diplomát szereznek, ami nem egészül ki, illetve nem felel meg a gyakornoki légiforgalmi irányító szakszolgálati engedélynek. A képzés következő fázisa, a munkahelyi képzés, aminek a végén a jelölt szakszolgálati engedélyt kap. Továbbképzések keretein belül valósul meg a katonai rendszeren belül is a szinten tartó képzés, ami ebben az esetben is a jártasság fenntartására irányuló, elsősorban szimulációs környezetben megvalósított gyakorlatokat, kényszerhelyzeti szimulációkat, megnövekedett forgalommal járó katonai gyakorlatokra való felkészülést jelent, valamint az átképzés, ami más jogosítások, illetve oktatói kiterjesztés megszerzésére irányul. Jelenleg szintén az átképzésre irányuló tanfolyamok keretein belül történik első körben a kecskeméti repülőtér katonai polgári közös hasznosításra való átállással járó kiegészítő képzések, ismeretek, és egyben jogosításkiterjesztések megszerzése.

A katonai légiforgalmi irányítók hadműveleti repülőtereken való, már-már rendszeresnek mondható, szolgálatteljesítése okán, a missziós feladatokra történő célfelkészítés részeként a kabuli és a mazar al shariff-i repülőtéri irányítói munka ellátására tanfolyami kereteken belül került sor. Ezeknek a tanfolyamoknak a besorolása a továbbképzés, átképzés rendszerébe illeszthető, mivel egy megváltozott munkakörnyezetre, repülőtérre, forgalmi sajátosságokra és eljárásrendre kell felkészülni. A következő fejezetben a kabuli célfelkészítés hazai (elméleti és gyakorlati), valamint a helyi, munkahelyi képzés felépítése, tematikája és értékelési rendje kerül bemutatásra.

KABULI CÉLFELKÉSZÍTÉS RENDSZERE [7]

A képzési struktúra célirányos vizsgálata az eddigi nemzetközi szerepvállalás tapasztalatai miatt kizárólag repülőtéri irányító beosztások ellátására készült. Ez azt jelenti, hogy ADV és ADI jogosítással, illetve az ehhez tartozó jogosításkiterjesztésekkel rendelkező szakszolgálati engedély birtokában lehet ellátni a beosztással járó feladatokat. Mivel Magyarország a NATO ATMC (Air Traffic Management Committee) NDAB (NATO Deployable Airbase) jelenleg még kidolgozás alatt álló CONOPS (Concept of Operation) koncepciójához elsősorban kiké-

[15] Eleventh Edition July 2011

zett szakszemélyzettel képes hozzájárulni, ezért a vizsgálat szempontjából fontos, hogy megállapításra kerüljön vajon a jelenlegi igényeknek és elvárásoknak milyen mértékben felel meg a 2005-ben kidolgozott tanfolyami rendszer, annak elméleti és gyakorlati tanagyaga.

Továbbá célszerű feltárni azokat az azonosságokat és különbségeket, melyek az egyes résztvevő nemzetek képességeiben jelen vannak, illetve, hogy az együttműködésük milyen hatékonyan valósítható meg. Annak ellenére, hogy a cikk elején megemlítésre kerültek a bevezető irányítói szakszolgálati jogosítások és kiterjesztéseik (APP, APS), mint a repülőtér induló és érkező légiforgalmának irányításához biztosított szolgálatok, viszont az eddigi szerepvállalások alapján kizárólag a repülőtéri irányításra történt célfelkészítés, ezért az előbbi csak érintőlegesen kerül megemlítésre a vizsgálat során.

ISAF MATC felkészítő hazai tanfolyam

A tanfolyam 2005 novemberétől 8 alkalommal került megtartásra nemcsak magyar, de cseh katonai légiforgalmi irányítók számára is. A tanfolyam teljes képzési ideje 170 óra (4 hét), melyen belül az első két hétben elméleti ismeretek, a második két hétben pedig gyakorlati szimulációk kerültek végrehajtásra a repülőtér és annak környezetét valósan megjelenítő szimulációs terepasztalon, és irányítói munkahelyekkel [8]. Az első két hét elméleti tematikája a következő tantárgyak és témakörök feldolgozását tette lehetővé:

Meteorológia

A tantárgy, rendelkezésre álló 5 tanórájának célja, hogy speciális ismereteket nyújtson a tanfolyam résztvevőinek a legfontosabb meteorológiai jelenségekről (felhőzet, szél, veszélyes időjárási viszonyok), a tájékoztatásokról és a szabványos jelentési formákról, különös tekintettel a kabuli nemzetközi repülőtér körzetében uralkodó meteorológiai helyzetről és a területi sajátosságokról. A tananyag része a terület klimatikus jellemzőinek, speciális időjárási jelenségeinek bemutatása és azok szervezetre gyakorolt hatásainak megismerése is.

Navigáció

A tantárgy 5 tanórája elegendő a navigációs ismeretek felelevenítéséhez, ezen belül a navigációs berendezések és azok működési jellemzőit, a légiforgalmi térképeket, különösen a repülőterekhez kapcsolódó eljárás térképek jeleit, jelzéseit, adatait, valamint a kabuli repülőtér elhelyezkedéséből, tengerszint feletti magasságából adódó különleges eljárásokat.

Repülőtérrend és légijármű ismeret

A tantárgy 21 órás tananyaga magába foglalja az ICAO repülőterek felépítését tartalmazó 14. annexének ismereteit, az ICAO ATS (Air Traffic Services) légtérosztályait, valamint a kabuli repülőtér légtérszerkezetét, és a légiforgalmi szolgálatok illetékességi területét. A továbbiakban a repülőtérrend és a helyi repülési eljárások, előírások megismerése következik. Légijárműismereten belül elsősorban azoknak a géptípusoknak a sajátosságai és fizikai jellemzői kerülnek bemutatásra, melyek jellemzően előfordulnak a repülőtéren vagy ott is települnek. A helyi repülési eljárások tartalmazzák az nappali és éjszakai VFR és különleges VFR értékeket, éjjellátó eszközzel végrehajtott repülésekre elfogadott szabályokat, speciális, csak a repülőtérre kiadott rendelkezéseket és eljárásokat, pilótanélküli repülések rendjét, koordinációs eljárásokat, rádióforgalmazási szabályokat, valamint kapacitás gazdálkodási ismereteket.

Kényszerhelyzeti eljárások és emberi tényezők

A tantárgy célja, hogy általános ismereteket nyújtson a tanfolyam résztvevőinek kényszerhelyzetben követendő szabvány eljárásokról, rendelkezésekről, a pszicho-fizikai teljesítmény növeléséről és annak korlátairól. Annak megismerése, hogyan hat a stressz az ítélőképességre, és milyden tényezők befolyásolják annak kialakulását, valamint milyen módszerekkel javítható a stressztűrő képességünk. A helyi eljárásokan belül bemutatásra kerül, hogy kényszerhelyzet esetén milyen riasztási és jelentési rendszer van érvényben, valamint a repülőtér és légiközlekedésvédelemi terv érvénybe lépése esetén, milyen eljárásokat kell a légiforgalmi szolgálatnak követnie. A tantárgy 10 órás tananyagot tartalmaz.

Angol nyelvű rádiólevelezés, légiforgalmi szolgálat működése és eljárásai

A tantárgy viszonylag nagy óraszámban 44 óra keretében került meghatározásra, aminek rövid bevezető része légijogi ismereteket és az ISAF létrehozásának célját, működését tartalmazza. A rádiólevelezési ismeretek belül, az általános kifejezések átismétlése, majd a repülőtéri irányítás jellemző terminológiája és kényszerhelyzeti, sürgősségi helyzetek esetén alkalmazásra kerülő kifejezéseket tartalmazza. Végezetül pedig az ICAO és FAA (Federal Aviation Agency) rádióforgalmazás eltérő kifejezései kerülnek összegyűjtésre, melyek jellemzően a tengerentúlról származó gépszemélyzetekkel való kommunikációban fordulnak elő, de emellett a légiforgalmi szolgálatok közötti koordináció során is. A tantárgy további két harmadában a repülőtéri irányító általános feladatai és eljárásai, repülőtéri forgalom irányítása, légiforgalmi fények üzemeltetése, forgalmi kör és gurulási eljárások jellemzői, látással történő elkülönítés a repülőtér közelében, radar alkalmazásának szabályai a repülőtéri irányító munkahelyen, végül a szabványos jelentési minták. A kabuli repülőtéren alkalmazott légiforgalmi irányítói eljárásokat a repülőtér légiforgalmi szolgálati főnökének szakmai javaslatai alapján, a repülőtér parancsnoka szabályoz, mely tartalmazza a helyi működési jellemzőket és speciális eljárásokat. Ide tartozik a légiforgalmi szolgálat felépítése, együttműködő repülőtéri és légiforgalmi szolgálatok eljárásrendje, légiforgalmi irányítói engedélyek kiadásának rendje, légijárművek indulásával- érkezésével kapcsolatos eljárások, az első kapcsolat felvételtől a hajtómű kikapcsolásáig valamint a repülőtér elhagyásáig. A munkahelyi működési környezet jellemzői, különleges eljárások alkalmazása. Repülésnyilvántartó szalagok kitöltésének rendje, kapcsolódó eljárások, azok vezetése, nyilvántartása, továbbítása. Végezetül a repülőtér és környezetében lévő légterek jellemzői kapcsolódó korlátozások.

A tanfolyam második két hetes időszakában az elméleti ismeretek gyakorlatba való áthelyezése történik, a 70 tanórás trenázs-gyakorlat keretében. A szimulációs környezet valósághű megteremtése a repülőtér munkaterületének kicsinyített változata, valamint a repülőtér 10NM[16] es körzetét és domborzatát ábrázoló terepasztal segítségével valósult meg.

Trenázs-gyakorlat

Célja, hogy Kabul nemzetközi repülőtér szimulált viszonyai közötti begyakorlásra kerüljenek a repülőtéri irányítás feladatai, a repülőtér földi és légi forgalmának irányítása a helyi sajátosságoknak és eljárásoknak megfelelően angol nyelvű rádióforgalmazási eljárások és egymás közötti koordinációs eljárások alkalmazásával. A gyakorlati szimulációs feladatok összeállítása,

[16] NM: nautical mile/tengeri mérföld 1NM=1,85 km

az egyszerű, alacsony műveletszámú repülésektől, a komplex, bonyolult forgalmi szituációk megoldásáig kerültek kidolgozásra, végezetül a légijármű kényszerhelyzetében alkalmazott eljárások begyakorlása történik meg. A gyakorlatokban résztvevő oktatók, és álpilóták civil és katonai, magyar és külföldi légiforgalmi irányítók és pilóták közül kerültek ki, többen közülük a célrepülőtéren is teljesítettek szolgálatot.

A gyakorlatok értékelése a szimulációs feladatok után történik, minden egyes irányítói pozícióban dolgozó szakszemélyzetre. Az értékelés betűjelekkel történik, A-D-ig, ahol az A az oktató elégedettségét fejezi ki az irányítói teljesítmény vonatkozásában, a B szintén az elégedettséget meghatározó pozitív értékelést jelent, de oktatói kommentekkel és kiegészítésekkel, a C betűjelzést esetén az irányító nem megfelelően tevékenykedett valamely szituációban, ezért negatív értékelést kap, végezetül D jelű értékelés abban az esetben ad az oktató, ha az adott kritérium, nem volt megfigyelhető, nem jelent meg a szimulációs feladatban. Az értékelés területei magukba foglalják az adminisztrációt, ami a repülésnyilvántartó szalagok kezelési eljárásainak helyes alkalmazását, a külső és belső koordináció gördülékenységének értékelését foglalják magukban. A következő terület a légiforgalmi szolgálat ellátására vonatkozik, ezen belül a helyi eljárások ismerete és azok megfelelő alkalmazása, a forgalom átadás átvétele, konfliktushelyzetek időbeni felismerése, megelőzése vagy kezelése, forgalmi körön lévő légijárművek irányítása, elkülönítés és leszállási- felszállási sorrend meghatározása, az irányítói munkatempó dinamikájának értékelése, repülésbiztonság szem előtt tartása, elsőbbségek helyes alkalmazása. A berendezés kezelés szempontjai között értékelésre kerül, a légi és földi forgalom irányítására alkalmazott rádiók kezelése, a repülésnyilvántartó rendszer kezelése, a meteorológiai adatokat és a fénytechnikai rendszert megjelenítő és vezérlő felületek kezelése. Utolsó két szempontként két kérdés kerül megválaszolásra, egyrészt, hogy kiadásra került-e olyan légiforgalmi irányítói engedély vagy utasítás, ami veszélyeztette a repülésbiztonságot, illetve a szimuláció során szükség volt e oktatói közbeavatkozásra [9].

A MAZAR AL SHARIFF-I CÉLFELKÉSZÍTÉS [10]

Az említett afganisztáni repülőtér szintén közös, polgári és katonai hasznosítás alatt áll. A repülőtér és a katonai bázis a német nemzet vezetése alatt más nemzetekkel együttműködésben történik. A repülőtéren 2014 és 2017 között több váltásban fordultak meg magyar katonai légiforgalmi irányítók, bár nem minden váltásnak volt lehetősége a tervezettnek megfelelően irányítói beosztásban szolgálnia. A felkészítés szervezett keretek között az MH Pápa Bázisrepülőtéren történt, egy hetes időtartamban, a hadműveleti repülőteret elsőként megjárt katonai légiforgalmi irányítók vezetésével. A célfelkészítés tematikája, arra építve, hogy minden vezénylésre kerülő szakszemélyzet rendelkezik repülőtéri irányító szakszolgálati engedéllyel, mely magába foglalja a gurító irányító és a repülőtéri légifogalmi irányító jogosítás kiterjesztéseket, kizárólag a helyi ismereteket tartalmazta. A felkészítésnek csak az utolsó néhány napján hajtottak végre gyakorlati szimulációkat.

Az elméleti képzés tartalmazta az AIP (Aeronautical Information Publication) Afghanistan[17] mazar al sharif-i repülőtérre vonatkozó adatait, valamint a helyi repülési eljárásokat magában foglaló

[17] http://motca.gov.af/fa

LOP (Local Operational Procedures) szabályait. Az AIP tartalmát tekintve kitért a repülőtér földrajzi adataira, a repülőtéri munkaterület ismeretére, a repülőtér légtérszerkezetére és bennük alkalmazott repülési szabályokra, felelős légiforgalmi szolgálatokra, azok elérhetőségére. Az AIP tartalmazza a repülőtér műszeres és vizuális megközelítési és indulási eljárástérképeit. Az LOP, ami a helyi repülőtérrendnek felel meg, kitér a repülőtéren alkalmazott speciális eljárásokra és helyi sajátosságokra. Ezen belül a repülőtér adatai, munkaterület paraméterei, előtéri szolgálatok és hívóneveik. Légtérszerkezet és légtérosztályok, a légiforgalmi szolgálat elnevezésével és alkalmazott eljárásaival. A repülési eljárások a repülőtér sajátosságainak és a helyben települő katonai légijárművek harcászati feladatainak és eljárásainak megfelelően kerültek megtervezésre, a kötelező jelentőpontok, várakozási eljárások és érkezési és indulási folyósók, valamint pilóta nélküli légijárművek repülési sajátosságainak figyelembevételével. A továbbiakban a légiforgalmi szolgálat helyi eljárásait, azok tevékenységét tartalmazza az időjárási minimumok függvényében. Következő pontként feldolgozásra kerültek a légiforgalmi szolgálat földi eljárásai a repülőtér munkaterületének, forgalmának és elsőbbségi szabályainak tekintetében. A repülésnyilvántartó szalag kezelési szabályai, a helyi specialitásoknak és többnyire a vezető nemzet bevált gyakorlatának megfelelően került megtervezésre. Ennek előzetes elsajátítása és begyakorlása könnyebbé teszi a beilleszkedést az új munkakörnyezetbe. Végezetül az együttműködési megállapodásoknak megfelelő koordinációs eljárások megtanulása és begyakorlása következik, amire a szimulációs gyakorlatokban van lehetőség. Az elméleti felkészítés során a vendég előadók a helyi kulturális környezetről, szokásokról tartottak előadást, ami könnyebb beilleszkedés célját szolgálja.

Egy korábbi 2016-os, kérdőíves kutatás [11] keretein belül a hadműveleti repülőtéren addig szolgálatot teljesítő katonai légiforgalmi irányítókat kérdeztem meg a repülőtéri tapasztalataikról. A kérdőívben a felkészítés és egyéni felkészülésük rendjére, annak későbbi gyakorlati hasznára is kíváncsi voltam. A megkérdezettek elmondták, hogy az egyhetes felkészülést rövidnek tartják, annak szakmai tartalma és gyakorlati szimulációs feladatai is bővítést igényelnének. További problémaként merült fel, hogy az afganisztáni repülőtéren alkalmazott eljárásrendek változásairól nem volt mód időben, a felkészítés idejére naprakész információt szerezni, vagy a felkészítés után történtek meg, így a légiforgalmi irányítók már csak a kiérkezésük után szembesültek a megváltozott helyzettel. A helyi felkészülés lehetőségei korlátozottak, általában 3-7 nap áll rendelkezésre a gyakorlásra, ezután a meg kell szerezni a jogosító vizsgát az önálló munkavégzés megkezdéséhez. A kérdőívet kitöltők többsége a megfelelő nyelvismerettel rendelkezett a repülőtéri irányító feladatok ellátásához, és többségüknek az ICAO 4 szintű, vizsgája is érvényes volt. A kommunikációs nehézségek leginkább azokkal a gépszemélyzetekkel való rádiólevelezés során jelentkeztek, akinek nehézségei voltak az angol nyelvű kommunikációval. A megkérdezettek többsége, egyéni felkészülése során hangsúlyt fektetett a mentális és fizikai állapotának rendezésére, annak érdekében, hogy a megváltozott környezet és az új kihívások okozta stresszhelyzetet, minél jobban tudja kezelni. Ez utóbbira a célirányos felkészítés keretein belül nem volt lehetőség.

VIZSGÁLATI SZEMPONTOK, KÉRDŐÍV TERVEZET [12][13][14]

A hazai célfelkészítések tapasztalatai alapján, illetve annak okán, hogy további nemzetközi felkészülések révén a magyar katonai légiforgalmi irányítók ismét távoli, hadműveleti területen lévő repülőtereken teljesíthetnek szolgálatot, célszerű optimalizálni és a jelenlegi kihívásoknak

megfelelően átdolgozni a szakmai célfelkészítés rendszerét és tematikáját. További ismeretgyűjtés és tapasztalatszerzés céljából a vizsgálati szempontok és elkészített kérdőív tervezetet nemcsak hazai, de szövetséges nemzetek katonai légiforgalmi irányítói képzést és ilyen feladatokra történő felkészítést folytató szervezeti részére is megküldésre kerülnek. Elsősorban azokat a nemzeteket célozza az adatgyűjtés, melyek hasonló környezetben már rendelkeznek tapasztalatokkal, melyek szerepet vállalnak a NATO ATMC NDAB programjában, illetve azok a nemzetek, akikkel az eddigi hadműveleti területen történő repülőtéri légiforgalom szervezés és irányításban már együttműködtünk.

Elsőként a célfelkészítés rendszerét és struktúráját szükséges meghatározni, vagyis a nemzeti katonai légiforgalmi irányító képzés rendszerében, az ilyen jellegű célfelkészítést mely szervezeti egység, milyen tematika alapján, milyen időtartamban és oktatókkal hajtaná végre. A képzés rendszere alatt értendő, hogy az alap-és jogosító képzést folytató szervezet, vagy esetleg a munkahelyi képzést folytató szervezet végzi-e a felkészítést. Rendelkezne-e a szükséges infrastruktúrával, vagy erre a célra szerződést kötnek más szervezetekkel, például a polgári légiforgalmi irányító képzést folytató nemzeti vagy európai szervezettel.

A jelöltek vonatkozásában, milyen jártassággal és tapasztalattal rendelkező irányítók közül kerülnek kiválogatásra, illetve, hogy rendelkeznek e hadműveleti repülőtéren szerzett tapasztalattal. A jelöltek szakszolgálati engedélye milyen jogosítás és jogosítás kiterjesztésekkel rendelkezik, illetve a szakszolgálati engedélyek, a STANAG 7204, illetve ICAO Annex 1 szabványainak és ajánlásainak megfelelően került e kiadásra. Ez utóbbi garantálja, hogy a különböző nemzetek légiforgalmi irányítói az említett szabványokban előírt ismeretekkel rendelkeznek. A jelöltek angol nyelvismerete milyen nemzetközi sztenderdeknek felel meg. A nemzeti szakszolgálati engedélyükhöz előírás az Eurocontrol és az ICAO angol nyelvű szakmai vizsga jogosításnak megfelelő szintje, vagy más minősítő vizsga letételét kérik. Talán itt is érdemes megjegyezni, hogy a katonai légiforgalmi irányítók, mint más állami légiközlekedési szakszemélyzetek, szakszolgálati engedélyei megszerzésének és kiadásának feltételeit az adott állam szabályozza, sem az európai unió, sem pedig az ICAO szabványinak és ajánlásai közvetlenül nem kell alkalmaznia. Kivételt képeznek azok az esetek, ha NATO által vezetett missziós feladatokban vállalnak szerepet, mert akkor a jogosítás és jogosításkiterjesztés a mindenkori Annex 1-nek megfelelően kell, kiadásra kerüljön, illetve ha olyan repülőtéren teljesítenek szolgálatot ami polgári légiforgalom fogadásra is engedélyt kapott.

A képzés megtervezésekor, a következő szempontokat érdemes figyelembe venni:

- az adott repülőtéren, milyen szintű légiforgalmi szolgálatot biztosítanak;
- milyen légiforgalmi irányítói kompetenciákat kívánunk erősíteni;
- a repülőtér milyen specifikus, repülésbiztonsági szempontból áttekintést igénylő kockázatokkal bír;
- milyen elméleti ismeretek és gyakorlati szimulációk segítik hozzá az irányítókat a leghatékonyabb felkészüléshez;
- milyen időtartamban történjen a képzés.

A képzés megtervezése azzal kezdődik, hogy meghatározásra kerülnek a célkitűzések, vagyis, hogy milyen légiforgalmi irányítói kompetenciák erősítésére van szükség, illetve, hogy a képzés elvégzésével a jelölteknek milyen képességeket kell elérniük. A képzést az adott légiforgalmi

irányító egység, esetünkben a hadműveleti repülőtér légiforgalmi irányítói feladatainak ellátására kell kidolgozni. Az irányítói egységspecifikus tréningeknek nagy jelentősége van az irányítói teljesítmény növelésében a szükséges alapgyakorlatok kidolgozásában és olyan szignifikáns területeke beazonosításban, melyek további gyakorlását, gyakoroltatását szükségesnek vélik az oktatók. A gyakorlattervezést adatgyűjtés előzi meg, ami általában a repülőtéren már előfordult szituációk, forgalmi helyzetek, szignifikáns időjárási jelenségek, forgalmi konfliktusok, légtérszerkezet komplexitásából adódó nehézségek, IFR/VFR/SVFR (Instrument Flight Rules/Visual Flight Rules/ Special Visual Flight Rules) forgalom vegyes előfordulása és sajátos összetétele stb. előfordulását és azok kezelésével kapcsolatos nehézségeket eredményeztek. A repülésbiztonsági kockázatok értékelésekor figyelembe veszik az említett jelenségek és faktorok előfordulási valószínűségét és előfordulás esetén azok következményeinek súlyosságát. Az adatok elemzése, és a probléma definiálása után megkezdődhet a célorientált gyakorlatok kidolgozása, aminek eredményeképp az irányítók felfrissítik a már meglévő ismereteiket, és hatékony megoldási formákkal rendelkeznek a problémás szituációk kezelésére. A tréningek kötelező elemeit képzik a szabvány eljárások és gyakorlatok, a kezelésükre kidolgozott hatékony kommunikációs praktikák, az abnormális, kényszerhelyzeti szituációk és azok eljárásrendje, a hozzájuk tartozó frazeológia begyakorlása, végezetül az emberi tényező által felmerülő hibák és kockázatok kezelésére irányuló gyakorlatok. A képzés eredménye és hasznosulása, közvetlenül és közvetve is erősítheti a repülésbiztonságot, ami azt jelenti, hogy az említett veszélyek és kockázatok előfordulásának és következményeinek komolyságát közvetlenül vagy közvetve és milyen mértékben csökkentik.

A kérdőívben az adott ország hadműveleti repülőtérre tervezett légiforgalmi irányító jelöltek jártassága és tapasztalata, valamint a repülőtér sajátosságainak függvényében készülő szimulációs gyakorlatok megtervezéséhez érdemes felülvizsgálni, milyen kompetenciák erősítésére van szükség és azokat milyen szituációk gyakoroltatásával lehet a leghatékonyabban fejleszteni.

A **helyzettudatos döntések** (Situational Awareness) az adott szituáció időbeni megértését és a megfelelő cselekvés kiváltását eredményezi az irányító részéről. Ez a kompetencia nemcsak a kényszerhelyzetek kezelés esetén, hanem a más döntések meghozatalakor is elengedhetetlen. Ide tartozik a hatékony kommunikáció, a megfelelő eljárások időbeni alkalmazása, az együttműködés és koordináció annak érdekében, hogy a légiforgalmi irányító hatékonyan támogassa a légijármű személyzeteket és biztosítsa a számukra a legmegfelelőbb segítséget. **Forgalom és kapacitás szervezés** (Traffic and capacity management) vagyis kell győződni arról, hogy a forgalom rendszeres és folyamatos áramlása érdekében minden szükséges információt biztosít az irányító a légijármű személyzet részére. **Elkülönítés és konfliktus megoldás** (Separation and conflict resolution) a potenciális konfliktushelyzetek kialakulásának lehetőségének megelőzése és a szükséges elkülönítések időbeni létrehozása. **Kommunikáció** (Communication), ami a leghatékonyabb kommunikáció alkalmazását jelenti a működési környezetben. **Koordináció** (Coordination), az érdekelt és a művelet szempontjából érintett felek közötti folyamatos és hatékony együttműködés fenntartása. **Forgalomszervezés és váratlan szituációk** (Management and non routine situation), ami a nem szokványos helyzetek és forgalmi szituációk időbeni detektálását és megfelelő válaszcselekvés foganatosítását jelenti. **Problémamegoldás és döntéshozatal** (Problem solving and decision making), vagyis a beazonosított veszélyek és kockázatok felismerése után a felismerni és alkalmazni a lehetséges megoldásokat. **Önképzés és folyamatos fejlődés** (Self management and continious development) olyan személyes tulajdonságok és viselkedési formák prezentálása, ami a teljesítményjavulás, az

aktív fejlődés és az önfejlesztése képességét mutatja és eredményezi. **Munkaterhelés kezelése** (Workload managment), a megfelelő erőforrások időbeni alkalmazása, a feladatok hatékony priorizálása és a felesleges terhelések kerülése. Csapatmunka (Teamwork), ami a légiforgalom szervezés rendszerének elengedhetetlen része.

ÖSSZEGZÉS

A nemzetközi környezetből érkező, hasonló, de nem azonos képzési háttérrel, képességekkel és gyakorlattal rendelkező katonai légiforgalmi irányítók megváltozott környezetben való leghatékonyabb munkavégzéséhez és együttműködéséhez célfelkészítés szükséges. A cikkben azok a faktorok kerültek felsorolásra és rendszerezésre, melyek ismeretében, könnyebben körvonalazható, hogy milyen kompetenciák erősítésére van szükség ahhoz, hogy a megváltozott környezetben hatékonyan, biztonságosan és gördülékenyen menjen végbe a légiforgalmi irányítók átállása és szolgálat biztosítása. Ehhez elsőként a szakszolgálati engedélyeket és azok kiadásának feltételeit kell megvizsgálni, összehasonlítani a megszerzéshez és fenntartáshoz szükséges képzési rendszert. Célszerű az irányítók jártasságát, gyakorlatát annak frissítési rendszerét is hozzávenni. A nemzetközi környezetben való munkavégzés megköveteli az operatív angol nyelvtudást, de még fontosabb az angol szakmai nyelvismereti készségek folyamatos karbantartása. A célfelkészítés eddigi hazai tapasztalatai jó kiinduló alapként szolgálnak a tervezéshez. Azok rendszere, óraszámai, tematikája, elméleti és gyakorlati ismeretei hasznosnak bizonyultak az akkori jelöltek számára, de kérdés, hogy jelenleg is alkalmazhatók, vagy átalakításra szorulnak. A kérdőív-tervezet egyes pontjai arra szolgálnak, hogy a célfelkészítés elméleti és gyakorlati szimulációinak megtervezéséhez egyfajta vázat, formát biztosítsanak. A cikk folytatásában, a kérdőív eredményeinek feldolgozása kerül publikálásra.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] 216/2008/EK Rendelet; a polgári repülés területén közös szabályokról és az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség létrehozásáról, valamint a 91/670/EGK tanácsi irányelv, az 1592/2002/EK rendelet és a 2004/36/EK irányelv hatályon kívül helyezéséről; http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R0216&from=HU

[2] 2015/340 EK Rendelete; a légiforgalmi irányítói szakszolgálati engedélyekre és tanúsítványokra vonatkozó formai követelményeknek és igazgatási eljárásoknak a 216/2008/EK európai parlamenti és tanácsi rendelet értelmében történő meghatározásáról, a 923/2012/EU bizottsági végrehajtási rendelet módosításáról és a 805/2011/EU bizottsági rendelet hatályon kívül helyezéséről; http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0340&from=HU

[3] EUROCONTROL Specifications for the ATCO Common Core Content Initial Training 21/10/2008; https://www.skybrary.aero/index.php/ATCO_Training_Overview;

[4] NATO STANAG 7204 NATO minimum Requirements for personnel providing air traffic services (ATS) in NATO –led operation; https://nso.nato.int/protected/nsdd/stanagdetails.html?idCover=7810&LA=EN

[5] ICAO Annex 1 Personnel Licensing; http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/pdf/saglik_birimi/mevzuat/ICAO_Annex%201-ed11.pdf

[6] Sipos Zoltán-Pál László: A katonai légiforgalmi irányítók képzésének elve és módszerei; http://www.honvedelem.hu/files/9/4954/09.pdf

[7] A NATO ISAF misszió katonai légiforgalmi irányítók (MATC) felkészítésének képzési programja 2014.

[8] Dr. Palik Mátyás, Vajda András: Polgári-katonai együttműködés a légiforgalmi szakszemélyzetek képzésében http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2008_cikkek/Vajda_Andras_Palik_Matyas.pdf

[9] Vas Tímea, Somosi Vilmos: A magyar honvédség mobil ATM komponens lehetőségei a NATO hadműveleti repülőterein; http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2010_cikkek/Vas_T-Somosi_V.pdf;

[10] Facility – Rating Mazar-e Sharif International Airport Date of issue: 22.03.2011 The Facility-Rating includes all basic knowledge for the work as an Air Traffic Controller at the airfield Mazar-e Sharif;
[11] Vas Tímea: Magyar katonai légiforgalmi irányítók hadműveleti repülőtereken szerzett tapasztalatai; Repüléstudományi Közlemények 2016:(1) pp. 149-156. (2016)
[12] FM 1-303 http://www.enlistment.us/field-manuals/fm-1-303-air-traffic-control-facility-operations-and-training.shtml
[13] ATC Refresher Training Manual; https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/3024.pdf
[14] ATC Refresher Training Baseline; https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/3025.pdf

SKILLS NEEDED FOR THE PROVISION OF AIR TRAFFIC CONTROL SERVICE AT AERODROMES OF THE TO[18] WITH GAT[19] AND OAT[20] I.

Those military air traffic controllers, who are well experienced and owned appropriate skills, usually serve 6-8 month-long period of time at the aerodromes of the TO. It is generally truth that in relatively short time they must have own the skills and abilities to work in the new appointment, taking into account those differences that come from their training system, applied procedures in practice, different skills and last but not least different habits and behaviour that can be explained with cultural and national reasons. In the first part of the paper the author examines the structure of the targeted preparation and training system, and secondly those factors that could be important to make the system more effective and let the ATCs easily adoptable skills, which make them suitable for working in different environment.

Keywords: *air traffic controller training, special targeted preparation, theoretical and practical lessons, training structure, test the suitability;*

Vas Tímea	Tímea Vas
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

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."

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-15-0443_Vas_Timea.pdf

[18] TO: Theatre of operation
[19] GAT: General Air Traffic
[20] OAT: Opeartional Air Traffic

Sándor Zsolt

A PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰ RENDSZEREK FORGALMI MENEDZSMENTJÉT BIZTOSÍTÓ MEGOLDÁSOK FEJLESZTÉSI FOKOZATAI

A pilóta nélküli légijárművek forgalmi menedzsmentje a jövő egyik nagy kihívása a légiforgalmi iparágban. A jövőben megjelenő rendszerek olyan funkcionális megoldásokat kínálnak, melyek segítségével megoldható ezen légijárművek közlekedésének beillesztése a hagyományos légijárművek közé a földközeli, alacsony magasságú repülések esetén. A technológia folyamatos fejlődésével lépést kell tartania az irányító rendszernek is, ezért lényeges, hogy olyan moduláris felépítéssel rendelkezzen, mely biztosítja az újonnan megjelenő műszaki igények implementálhatóságát. Jelen cikkben bemutatásra kerül egy olyan modulárisan egymásra épülő rendszerkoncepció, mely segítségével megvalósítható a fokozatos fejlesztés a mindenkori műszaki igényeknek megfelelően.

***Kulcsszavak**: pilóta nélküli légijárművek irányítása, drónok, UTM, légiforgalmi menedzsment*

BEVEZETŐ

A pilóta nélküli légijármű rendszerek (*UAS*[1] *vagy egyszerűbb, köznapi szóhasználattal élve: drónok*) számának emelkedése miatt a repülési iparágban szükség van olyan megoldásokra, melyek műszaki és operatív, üzemeltetői oldalról szavatolják ezen berendezések biztonságos (egymástól és a többi légijárműtől térben elkülönített) használatát a VLL[2] légtérben hasonlóan a hagyományos légijárművek forgalmi menedzsment rendszereihez – melyek ma már rendelkezésre állnak. Ezeket a rendszereket átfogóan UTM[3] rendszereknek hívják – pilóta nélküli légijárművek forgalmi menedzsmentjét biztosító rendszerek –, melyek számos rendszer együttes üzemelése által jönnek létre, így komplex rendszer-együttesnek tekinthetőek. Feladatuk, hogy átfogó módon kezeljék a pilóta nélküli légijárművekkel végrehajtott repülési műveletek előkészítését (tervezését) és lebonyolítását (repülés közbeni információszolgáltatás és a biztonságos térbeli elkülönítés megvalósítása), valamint fejlett megoldások esetén a repülési műveletet követő adminisztratív és monitoring tevékenységeket is [1] [2].

A drónok fokozódó elterjedésével rendkívül heterogén felhasználói közösség alakul ki, mely a hobbicélú operátoroktól egészen a professzionális felhasználókig terjed. Ez magával vonzza az alkalmazott légijárművek berendezései között tapasztalható képességbeli különbözőségeket is, melyre az UTM rendszert fel kell készíteni. Az UTM megoldások által lefedendő műszaki megoldásokkal már a korábbi cikkek foglalkoztak, ahol meghatározásra kerültek a szolgáltatás által ellátandó funkciók (*információkezelési műveletek*) is [3].

[1] Unmanned Aircraft System: pilóta nélküli légijármű rendszerek (magában foglalja a pilóta nélküli légijárművet (UAV – unmanned aerial vehicle) + ennek vezérléséhez szükséges humán és műszaki infrastruktúra)
[2] Very Low Level: földközeli, alacsony magasságú légtér, mely jellemzően néhány 10 m-es kiterjedéssel rendelkezik a föld felett.
[3] Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM): pilóta nélküli légijármű rendszerek forgalmi menedzsmentjét biztosító megoldások együttese

Az eltérő műszaki igények miatt célszerű modulárisan kiépíteni a rendszer-együttest, összhangban az UAS megoldások fejlődési pályájával és az eltérő felhasználói csoportok igényeivel. Felhasználói oldalról a berendezések tekintetében a fejlődés folyamatos, azonban ütemét tekintve nem olyan gyors, amit az UTM megoldások ne tudnának lekövetni.

A repülési iparág UAS területtel foglalkozó szegmense folyamatos fejlődésben van, a kapcsolt szolgáltatások kifejlesztése jelenleg is folyamatban van, és az iparági bővülés napjainkban kezd beindulni. A hagyományos légiforgalmi menedzsmenthez hasonló, kiterjedt működési területtel rendelkező UTM szolgáltatóra még nincs példa, a világban fellelhető megoldások csak pilotként működnek, a fejlesztéssel foglalkozó cégek (*melyek között megtalálhatóak nagy légiforgalmi menedzsment (ATM) rendszert fejlesztő és kisebb start-up cégek is*) folyamatosan vizsgálják a megvalósítási lehetőségeket [6] [7] [8].

Jelen cikkben csak a polgári célú felhasználás, és annak háttere kerül bemutatásra. A katonai és állami célú tevékenységet más típusú szabályozást igényelnek, és azok beillesztése a hagyományos légiközlekedési rendszerbe más megközelítést igényel.

Az UTM megoldások kifejezetten azon műszaki megvalósítási lehetőségekre koncentrálódnak, melyek informatikai alapon képesek biztosítani a drónok használatához szükséges információk rendelkezésre állását. Az oktatási, jogalkotási, légialkalmassági kérdések az UMT tárgykörén túlmutatnak, így jelen cikkben ezen nem kerülnek tárgyalásra. A cikkben tisztán műszaki szempontú megközelítést alkalmaz a szerző. Ennek oka, hogy a témával összefüggő műszaki megoldások fejlődése megelőzi a jogszabályok alakulását. Emiatt a terület szabályozása követő típusú, melyet jelentősen befolyásol az újonnan megjelenő technikai újítások.

A témához kapcsolódó szakkifejezések magyarázatát a szerző által korábban írt publikációk tartalmazzák [3] [4] [5], így jelen cikkben csak az újabb kifejezések kerülnek meghatározásra, melyek a magyarázattal együtt alfabetikus felsorolásban, az irodalomjegyzék előtt találhatóak.

AZ UTM SZOLGÁLTATÁSOK JELLEMZÉSE ÉS A SZOLGÁLTATÁSI SZINTEK MEGHATÁROZÁSA

Az eltérő fejlettségi megoldások lehetőséget biztosítanak arra, hogy meg lehessen határozni azokat a fejlesztési és fejlettségi szinteket, mely alapján kategorizálhatóak az UTM megoldások. Az UTM szolgáltatást kínáló rendszerek funkcióik és működésük (*lefedett információs szolgáltatások*), valamint a műszaki megvalósítási fokozatok alapján, két önálló dimenzió szerint csoportosíthatóak. Előbbivel korábbi cikkeimben foglalkoztam [3] [4] [5] míg utóbbival jelen cikk foglalkozik. A kettő fejlesztési megközelítés egymástól függetlenül is kezelhető, mivel az egyik a funkcionalitással van összefüggésben, míg a másik a technológiai megvalósítási lehetőségekkel.

Jelen cikkben bemutatásra kerülnek a különböző fejlesztési / megvalósítási fokozatok (másképp nevezve: *szolgáltatási szintek*). Az alkalmazott műszaki megoldásoktól függően öt fokozat került meghatározásra a nyilvántartási rendszerektől a teljesen autonóm vezérlést biztosító rendszerig.

A **szolgáltatási szintek** – különböző információszolgáltatási és beavatkozási funkciókat kínáló megoldások – **modulárisan épülnek egymásra**. A magasabb szolgáltatási szint tartalmazza az

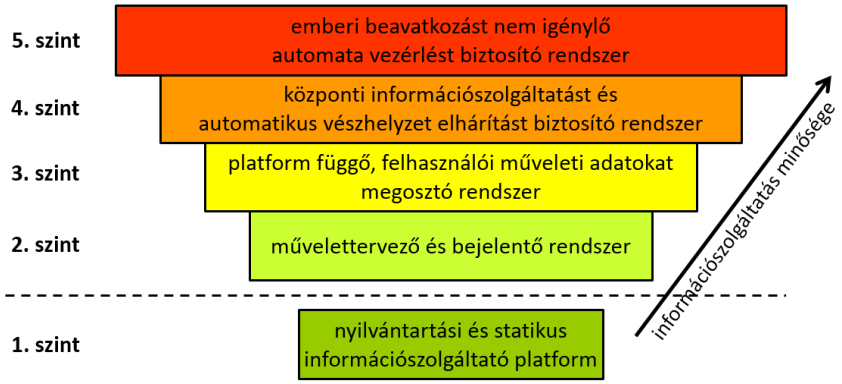
alatta elhelyezkedő szint szolgáltatásait is. A szintek egymásra épülését az 1. ábra szemlélteti. Az egyes szolgáltatási szintekhez tartozó funkciókat és tulajdonságokat az 1. táblázat tartalmazza.

Kiemelendő, hogy funkcionalitását és működését tekintve az 1. szint – nyilvántartási és statikus információszolgáltató platform – elválik a hagyományos, aktív felhasználói közreműködést igénylő UTM megoldásoktól. Ez utóbbi nem tekinthető UTM megoldásnak, csupán alapszintű információkat szolgáltat és támogatja a hatóság által végzett nyilvántartásba vételi feladatokat. Maga az statikus információszolgáltatás és a nyilvántartás kezelése/vezetése egymástól elkülönül.

Az UTM megoldások megvalósítása és telepítése során az üzembe helyezendő rendszernek nem szükséges a legalacsonyabb szolgáltatási szinttel indulni. A műszaki lehetőségek és igények függvényében magasabb szolgáltatási szinten is indulhat az UTM szolgáltatás. Meglévő UTM rendszer fejlesztése esetén az egyes szintek komplex fejlesztői tevékenységek során kombináltan is megvalósíthatók, így a szolgáltatásban jelentős bővülés érhető el.

A mobilkommunikáció technológiai fejlődésének hatására, – leginkább – az 5. generációs megoldások megjelenésével a pilóta nélküli légijárművek területén olyan alkalmazásbeli újdonságok megjelenése várható, melyek ma még csak a legmerészebb elképzelésekben szerepelnek. Ezek jellemzően irányításra, adatgyűjtésre és a rendelkezésre álló adatok felhasználására vonatkoznak, és nem az UAS rendszer alap komponenseire. Az energiatárolás, meghajtás, berendezés vezérlés, strukturális kialakítás stb. nem a kommunikációra épül, így azok fejlődését egyéb iparági megoldások tudják hosszú távon biztosítani.

Az UTM szolgáltatók szerepe a jövőben felértékelődik, mivel a nagy számban megjelenő UAV-k forgalmi menedzsmentét biztonsági és védelmi okok miatt garantálni kell. Egyre inkább előtérbe kerülnek a központi, interaktív (többirányú kommunikációt megvalósító), integrált, valósidejű irányítási megoldások.



1. ábra UTM szolgáltatási szintek

1. szint: nyilvántartási rendszer és statikus információkat biztosító platform

Nyilvántartási rendszer, mely tárolja a nyilvántartásba vett és regisztrált légijárművek és felhasználók adatait. Hatósági működést és az ellenőrzést támogató rendszer. Alapvető statikus légiközlekedési információkat biztosító rendszer (AIS[4] és statikus geofencing adatok). A felhasználók a szabályoknak megfelelően használják az UAV-ket.

[4] Aeronautical Information Service: légiforgalmi tájékoztató szolgálat

2. szint: műveletтervező és bejelentő rendszer

Művelet tervezési és művelet bejelentési funkciókat biztosító rendszer. Kibővített, féldinamikus információtartalommal (légtérgazdálkodás, meteorológia és további, a műveletтervezést befolyásoló statikus vagy féldinamikus adatok pl. NOTAM – légiközlekedési táviratok). A rendszer csak a művelet tervezést támogatja szoftveres oldalról. Az operatív lebonyolítást az alkalmazott UAS platform biztosítja, mely teljesen független és nincs kapcsolatban a tervező és bejelentő rendszerrel.

3. szint: UAS platformon, felhasználói műveleti adatokat megosztó rendszer

Kommunikációs hálózaton keresztül az azonos felhasználói platformot használó felhasználók aktív műveleti adatainak megosztása valós időben, mely által lehetővé válik a platformon belüli felhasználók között az automatikus figyelmeztetés a vészhelyzet elkerülésről és a vészhelyzet elhárító manőver kikényszerítése (platform függő dinamikus geofencing[5]).

szint	Automatizáció mértéke a műveletek végrehajtása során*	Információk és az elérhető szolgáltatások időbelisége**	Operatív működés által lefedett terület	Aktív kommunikáció	Vezérlés	UAS működtetésének felelőssége	Érintett UAS felhasználói közösség	Művelet időbeli támogatása
1.	nincs	statikus	-	-	manuális	felhasználó	minden felhasználó	felkészülés támogatása
2.	nincs	fél-dinamikus	-	egyirányú (felhasználó és központ között)	manuális	felhasználó	vegyes (szabadidős tevékenységek használóitól a speciális ipari felhasználókig)***	repülés előtti tevékenységek
3.	vészhelyzet elkerülés részleges automatizálása	platformok között dinamikus és platformon belül valósidejű	lokális platformok	platformon belüli egyirányú	manuális, vészhelyzet elkerülésről automatikus figyelmeztetés (platform függő)	felhasználó	vegyes (szabadidős tevékenységek használóitól a speciális ipari felhasználókig)***	repülés közbeni tevékenységek támogatása
4.	részleges automatizáltság több funkció esetén	valósidejű	globális platform független	globális kétirányú (felhasználó és központ között)	vegyes	vegyes (ütközés elkerülés UTM szolgáltató, UAV használat felhasználó)	vegyes (szabadidős tevékenységek használóitól a speciális ipari felhasználókig)***	repülés előtti, repülés közbeni és repülést követő tevékenységek támogatása
5.	vezérlés teljes automatizálása	valósidejű	globális platform független	globális többirányú	autonóm	UTM szolgáltató	jelentős számú repülési igénnyel rendelkező iparági felhasználók, ahol nem szükséges az aktív irányítás	repülés előtti, repülés közbeni és repülést követő tevékenységek támogatása

* A központi UTM rendszer által biztosított automatikus vezérlési funkciók elérhetősége.
** Az egyes funkciókhoz kapcsolódóan lényeges, hogy a releváns tartalommal és időbeli érvényességgel álljanak rendelkezésre a szükséges adatok. Ez alapján meg lehet különböztetni *statikus*[6], *féldinamikus*[7], *dinamikus*[8] *és valósidejű*[9] adatokat.
*** A különbség az UTM rendszer fejlettségében van, mely az UAS felhasználási területét nem érinti.

1. táblázat UTM szolgáltatási szintek

4. szint: Központi információszolgáltatást és automatikus vészhelyzet elhárítást biztosító rendszer

[5] Virtuális elkerítés, mely szoftveresen megakadályozza, hogy a pilóta nélküli légijármű egy meghatározott területre belépjen
[6] Hosszabb időn át változatlanok, érvényességük időbeli állandósága a repülés során nagyobb, vagy egyenlő, mint egy AIRAC ciklus.
[7] Tartalmazhatnak gyakrabban változó tartalmakat is, így ezek időbeli állandósága egy AIRAC ciklus és néhány óra között változhat.
[8] Jóval kisebb időbeli állandósággal rendelkező adatok, melyek akár másodpercenként is változhatnak.
[9] Folyamatosan változó adatok.

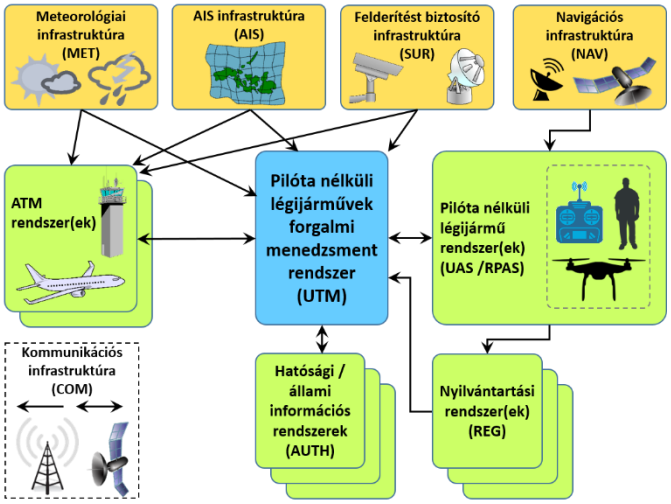
Központi nyomkövetést biztosító rendszer, mely a felderítési és az azonosítási funkciói által valósidejű pozícióadatok szolgáltatásával forgalmi tájékoztatást és automatikus vészhelyzet-kezelést (összeütközés megelőzés – dinamikus geofencing) biztosítanak a felhasználók számára.

5. szint: emberi beavatkozást nem igénylő automata vezérlést biztosító rendszer

Autonóm UAV irányító rendszer, mely képes valósidőben kezelni a beérkező felhasználói igényeket, mely alapján priorizálja és engedélyezi, valamint irányítja is a műveleteket, így a felhasználó mentesül az UAV operatív irányítása alól. Az UAV célállomásának megadásán és az indításon kívül minden további feladatot a központi vezérlést biztosító rendszer végez. Elsősorban ipari felhasználásra szánt rendszereknél pl. csomagszállítást végző szolgáltatóknál alkalmazható megoldás, ahol nagy mennyiségben jelentkeznek olyan feladatok, melyek szervezése könnyen automatizálható.

UTM RENDSZER-EGYÜTTES VÁZSZERKEZETE

Maga az UTM úgy definiálható, mint a felhasználók (*pilóta nélküli légijárművek használata által érintett entitások*) és az általuk használt rendszerek együttműködéséből kialakuló rendszer-együttes – ***Systems of Systems (SoS)*** –, melynek célja az UAV-k és a hagyományos légtérfelhasználók közötti biztonságos közlekedéséhez szükséges elkülönítés fenntartása és a hatékony forgalomszervezés megvalósítása a VLL légtérben [6] [9].



2. ábra Az UTM egyszerűsített vázszerkezeti modellje

Az UTM az alábbi komponensekből épül fel (2. ábra):

- ✈ műszaki infrastruktúra elemek: UTM funkciók elérhetőségét biztosító komponensek
  - kommunikációs infrastruktúra (*COM*) – *minden komponens között jelen van, a teljes UTM szolgáltatás legalapvetőbb része, nélküle a szolgáltatás nem tudna működni;*
  - navigációs infrastruktúra (*NAV*);
  - felderítést biztosító infrastruktúra (*SUR*);
  - AIS infrastruktúra (*AIS*);
  - meteorológiai infrastruktúra (*MET*);
  - ATM rendszerrel való kapcsolatot biztosító platform;
- ✈ operatív működést támogató rendszerek: humán interfészeket tartalmazó komponensek;

- pilóta nélküli légijármű rendszer (*UAS*);
- nyilvántartási (felhasználói és légijármű adatokat tartalmazó) rendszer (*REG*);
- forgalmi menedzsmentet biztosító rendszer (*UTM*);
- hatósági / állami információs rendszerek (*AUTH*).

A biztonságos üzem érdekében a kulcsfontosságú elemek megfelelő redundanciával rendelkeznek a maximális rendelkezésre állás érdekében (*pl. UTM*).

UTM RENDSZER-EGYÜTTES MŰKÖDÉSE

Az UTM rendszer-együttesnek számos információkezelési képességgel – ***funkcióval*** – kell rendelkeznie, mely segítségével megvalósítható a teljes légiforgalom (*hagyományos és pilóta nélküli légijárművek összességének*) biztonságos és forgalmi szempontból hatékony (*pl. késések minimalizálása*) lebonyolítása [10]. A különbség az egyes szolgáltatási szinteken elérhető funkcionalitásban van. A komplex UTM szolgáltatás által lefedett funkciókat és definícióit a repülési művelet időbeliségéhez illeszkedve a 2. táblázat, az egyszerűsített működési modellt a 3. ábra szemlélteti. A funkciók definiálása a jelenlegi műszaki fejlettségi szint figyelembe vételével történt. A táblázatban feltűntetésre került, hogy az adott funkció mely szolgáltatási szinttől érhető el. A szürkével jelölt funkciók olyan kiegészítő tevékenységeket jelentenek, melyek nem az UTM szolgáltatások ellátásához kapcsolódnak, azokon túlmutatnak, azonban az átfogó szolgáltatások érdekében lényeges lehet UTM szolgáltatói oldalról megvalósítani, főleg a magasabb szolgáltatási szinteken, az autonóm irányítás és vezérlés biztosítása érdekében. Alacsonyabb szolgáltatási szinten a nem UTM illetőségű funkciók ellátása során az adott funkcióhoz társított információ előállítása nem az UTM szolgáltató feladata, az csak a kész információt használja fel.

Az UAS megoldások használatával kapcsolatosan megjelennek olyan funkciók is, melyek teljesítését a felhasználói végpontnak kell biztosítania, függetlenül a kapcsolódó részrendszerektől. Ezek egyben alap feladatnak is tekinthetőek:

- ✈ önálló légijárművek vezérlése (*egy állomás egy légijármű*);
- ✈ autonóm repülések vezérlése (előre beprogramozott háromdimenziós trajektórián a légijármű végigvezetése, figyelembe véve a lehetséges akadályokat);
- ✈ több légijármű együtt vezérlése (*rajok*);
- ✈ konfliktusfeloldás a drónok között, egymás közötti kommunikáció által azonos vagy egymással kommunikáló felhasználói platform használata esetén.

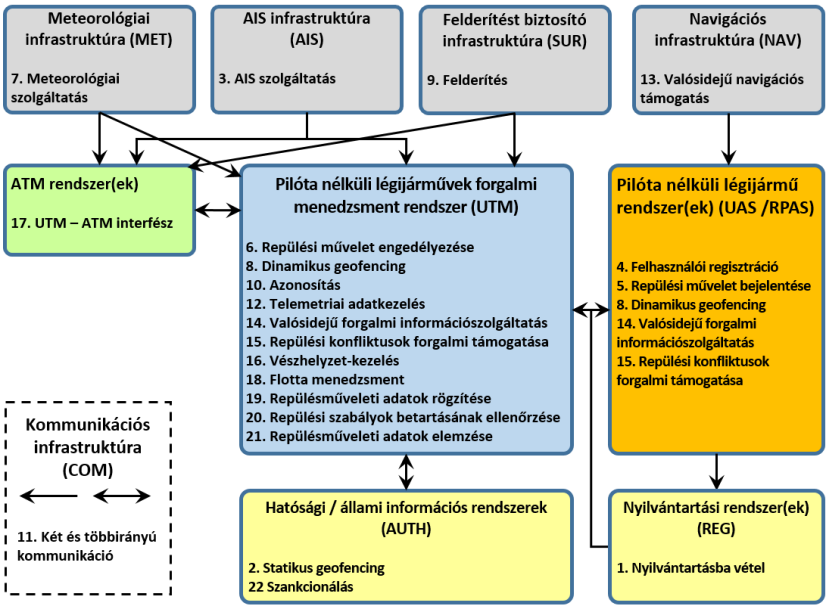
Lényeges, hogy a rendszer-együttes által kínált integrált információkezelési szolgáltatások teljes körűen csak akkor érhetőek el, ha a felhasználók együttműködő módon, jelentik a repülési műveletet.

Működését tekintve az UTM rendszer független az ATM rendszerektől, azonban az információkezelési műveletek sajátosságai és a repülési információk központosított feldolgozása miatt számos esetben azzal átfedésben dolgozik. A kezelt adatok tekintetében az UTM rendszerek számos olyan adatokat is felhasználnak, melyek jelenleg jellemzően az ATM rendszerben találhatóak meg. Ilyenek az AIS, AMC[10], meteorológiai, repülési tervvel összefüggő és egyéb forgalmi adtok, melyek az új szolgáltatások megjelenésével több oldalon is felhasználásra kerülnek.

[10] Airspace Management Cell: légtérgazdálkodásért felelős szervezeti egység

Időbeliség	Sorsz.	Funkció	Elérhetősége	Definíció
Repülés előtti tevékenységekhez kapcsolódó funkciók	1	Nyilvántartásba vétel	1. szinttől	A pilóta nélküli légijármű üzemeltetéséhez szükséges dokumentumok beszerzését követően a pilóta nélküli légijárművek állami nyilvántartásba vétele (paramétereinek rögzítése), és egyedi azonosítóval való ellátása.
	2	Statikus geofencing	1. szinttől	Pilóta nélküli légijárművel végrehajtott repülésekhez igénybe vehető légtér kijelölése és azon légtérszegmensek meghatározása, melybe a belépés nem megengedett (*No-fly zone* adott objektum körül – pl. reptér, atomerőmű). A funkció időbelisége statikus vagy földinamikus, mivel a légtérszerkezet átalakítása hosszabb időt vesz igénybe.
	3	AIS szolgáltatás*	2. szinttől	Repülési művelet tervezéséhez és lebonyolításához szükséges releváns ismeretek gyűjtése és publikálása, mely alapján egy repülés biztonságosan megvalósítható. Tartalmazza a légterekkel, tereptárgyakkal, akadályokkal, légtérfelhasználással, előre jelzett meteorológiai paraméterekkel és egyéb szabályozásokkal kapcsolatos információkat.
	4	Felhasználói regisztráció	2. szinttől	Felhasználók (pilóták és / vagy üzemben tartók) önálló regisztrációja az UTM rendszerbe a személyes adatok és a légijárműre vonatkozó adatok megadásával. Felhasználók és légijárművek összerendelése.
	5	Repülési művelet bejelentése	2. szinttől	Azon tevékenységek összessége, mely alapján a felhasználó megtervezi a repülési műveletet – eszközhasználatot – (földrajzi hely, maximális repülési magasság, dátum és időtartam), és ezt az előzetes regisztrációt követően bejelenti az illetékes szolgáltatónál (a bejelentés vonatkozhat légtér foglalására > korlátozott eseti légtérre is).
	6	Repülési művelet engedélyezése	5. szinttől	A benyújtott igény központi összevetése a korábban beérkezett igényekkel, a légtérszerkezettel, a hagyományos légtérfelhasználók igényeivel, légtér-felhasználási adatokkal, továbbá a magasabb szintű tevékenységekkel (pl. állami repülések, védelmi intézkedések stb.) és ezek alapján a repülési művelet (légtérigény) elbírálása, mely engedélyezést vagy elutasítást jelenthet.
Repülés alatti tevékenységekhez kapcsolódó funkciók	7	Meteorológiai szolgáltatás	2. szinttől	Valósidejű adatszolgáltatás, melynek keretében a felhasználó információt kap az aktuális időjárásról.
	8	Dinamikus geofencing	4. szinttől azonos platform esetén 3. szinttől	Térben és időben dinamikusan változó (mozgó) „*No-fly zone*", mely jellemzően egy adott légtér vagy légijármű körül kerül kialakításra, de mesterséges infrastruktúra felett is elhelyezkedhet.
	9	Felderítés	4. szinttől	Együttműködő (kooperatív) és nem együttműködő (non-kooperatív) megoldásokkal a repülési műveletet ellátó eszközök észlelése (pozíció és sebesség).
	10	Azonosítás	4. szinttől	A felderítés által észlelt légijárművekre vonatkozóan az engedélyezett repülési művelet adatainak megjelenítése/elérhetőségének biztosítása.
	11	Két- és többirányú kommunikáció	3. szinttől	Biztosítja a kétirányú kommunikációt az UTM központ és UAS eszközök között (utasítások, üzenetek, telemetrikus adatok küldése és fogadása).
	12	Telemetriai adatkezelés	5. szinttől	Az automatizált kommunikációs folyamaton keresztül biztosítja a repüléssel és működéssel összefüggő adatok továbbítását egy felügyeleti eszközhöz, és lehetőséget biztosíthat a távoli irányításra, továbbá szükség esetén az irányítás átvételére is, valamint támogatja a flottamenedzsmentet is.
	13	Valósidejű navigációs támogatás	3. szinttől	Információk megjelenítése a környezetről, melyben a repülési művelet végrehajtásra kerül (terep, akadályok, légtér stb.).
	14	Valósidejű forgalmi információszolgáltatás	4. szinttől azonos platform esetén 3. szinttől	Információk megjelenítése a többi légtérfelhasználóról abban a légtérben, ahol a repülési művelet végrehajtásra kerül.
	15	Repülési konfliktusok forgalmi támogatása	4. szinttől azonos platform esetén 3. szinttől	Légijárművek közötti, illetve légijárművek és épített/természetes tereptárgyak közötti konfliktusok észlelése (lehetséges ütközések, elkülönítés sérülés, stb.), és előre programozott algoritmus alapján kitérítő (dekonfliktálását biztosító) manőver kikényszerítése – forgalomirányítás, kiegészítve dinamikus geofencing funkcióval.
	16	Vészhelyzet-kezelés	4. szinttől	Repülési műveletet veszélyeztető eseményekről központi információszolgáltatás (vészhelyzeti műsorszórás), forgalmi konfliktus súlyosságától függően a repülési műveletbe való központi, vészhelyzeti beavatkozás, továbbá a közszolgálati UAS eszközök elsőbbségének biztosítása, eseti légtér azonnali kialakítása.
	17	UTM-ATM interfész	4. szinttől	Lényegi információk átvitele az UTM és ATM rendszer között, mely biztosítja, hogy a hagyományos légtérfelhasználók is hozzájussanak a helyzettudatosságot növelő, a biztonságos közlekedéshez szükséges információhoz (repülési műveletek).
	18	Flotta menedzsment	5. szinttől	Több légijármű egyidejű vezérlése, telemetriai adatok komplex kezelése. Nem feltétlenül jelent rajban repülést (utóbbi jelenleg nem engedélyezett).
	19	Repülésműveleti adatok rögzítése	4. szinttől, teljes funkcionalitás 5. szinttől	UTM rendszer által végzett adatrögzítés, mely során a légijármű által továbbított telemetriai adatok („fekete doboz" jellegű) tárolásra kerülnek további felhasználás vagy ellenőrzés céljából.
	20	Repülési szabályok betartásának ellenőrzése	4. szinttől	Szabálytalan felhasználók kiszűrése.
Repülés utáni tevékenységekhez kapcsolódó funkciók	21	Repülésműveleti adatok elemzése	4. szinttől	Tárolt adatok alapján repülési műveletek, légijármű paraméterek utólagos elemzése, és ez alapján nyilvántartások vezetése, elemzések elkészítése, értesítések kiküldése, stb. *Értéknövelt szolgáltatások biztosítása esetén* az UTM szolgáltatás használatát követő elszámolási tevékenységek összessége.
	22	Szankcionálás	4. szinttől	Szabályellenes magatartás jelzése, a szükséges adminisztratív cselekmények megtétele (pl. feljelentés) és büntetése.

2. táblázat UTM rendszer funkciói a repülési művelet időbeliségéhez illeszkedve



3. ábra UTM rendszer-együttes egyszerűsített működési modell

KITEKINTÉS

A magasabb szolgáltatási szintek elérésének feltétele a stabil, megfelelő kapacitású, nagy sávszélességű és gyors válaszidőt kínáló távközlési hálózat. Jelen várakozások alapján az 5G-s mobilkommunikáció biztosít a következő 3-5 évben olyan áttörési lehetőségeket, mely forradalmasítja a távközlési gerinchálózatot. A jelenlegi 4G-s megoldások csak korlátozott számban tudják kiszolgálni az igényeket, míg az 5G-ben olyan kapacitások állnak rendelkezésre melyek szinte kifogyaszthatatlanok.

Mivel a fejlett UTM szolgáltatások alapját is az új kommunikációs megoldások biztosítják, így az elterjedés – továbbá a fejlesztési centrumok megalapítása is – azokon a földrajzi területeken várhatóak, ahol a távközlési szolgáltatók lehetőséget kapnak az 5G hálózatok kialakítására, és biztosítani tudják azok polgári célú alkalmazását. Jelenleg az Amerikai Egyesült Államok az egyedüli olyan ország, ahol a számítások szerint 2020-ig megvalósul az országos kiterjedésű, teljes hozzáférést biztosító 5G hálózat [11].

A következő években az iparágon belül a technológiai fejlesztések hatására jelentős bővülés várható, ami indokolja, hogy mihamarabb megoldások szülessenek. Ennek hatására az UTM jelentősége felértékelődik, és a biztonságos üzemeltetés érdekében elkerülhetetlen lesz az alkalmazása [12].

ÖSSZEFOGLALÓ

A pilóta nélküli légijárművek használatával kapcsolatos tevékenységek hatékony kezelése és megoldása összetett kihívások elé állítja a légiközlekedési iparág szereplőit. Az UAS megoldások folyamatos fejlődése és a berendezések fokozódó elterjedése a jövőben képes teljes egészében átrajzolni a szolgáltatói térképet. Mivel az UAS piac jelenleg kibontakozóban van, így olyan új – ma még akár futurisztikus szolgáltatások megjelenése is várható – mely a közlekedési

szakmában forradalmasítja a szállítást, a logisztikai feladatokat új alapokra helyezni, a különleges iparági vizsgálatok idejét lerövidíti, és forradalmasítja a szenzorok alkalmazását [8]. Annak érdekében, hogy a fejlődés folyamatos lehessen, szükség van olyan jogi keretrendszer kialakítására, mely a jelenleginél szabadabb hozzáférést biztosít az iparági felhasználók számára az UAV fejlesztéséhez és alkalmazásához.

Szakkifejezések gyűjteménye

- **Irányítás**: a vezérlést megelőző információ-megosztási és intervenciós tevékenységek összessége.
- **Művelet**: a repüléssel összefüggő tevékenységek összessége, mely a légijármű felszállásától annak leszállásáig terjed.
- **Operatív működés**: a repülési műveletek ellátására vonatkozó szolgáltatások.
- **Platform**: légijármű vezérléséhez kapcsolódó szoftver és hardverelemek összessége, melyek biztosítják a légijármű és az irányító berendezés közötti kommunikációt valamint az interoperábilis vezérlési és információ-megosztási lehetőségeket is.
- **UAS rendszer**: a pilóta nélküli légijármű és annak vezérlését biztosító hardver elemek összessége.
- **UAS megoldás**: pilóta nélküli légijármű és annak vezérléséhez szükséges műszaki megvalósítási lehetőségek.
- **Vezérlés**: az a tevékenység, mely által lehetőség van a légijárművet a levegőben helyváltoztatásra kényszeríteni a légijárműbe épített fizikai beavatkozók segítségével

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Kopardekar, P., Rios, J., Prevot, T., Johnson, M., Jung, J., and Robinson, J., "Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) concept of operations," 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA Aviation, 2016. https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2016-3292

[2] T. Spriesterbach, K. Burns, L. Baron, and J. Sohlke: Unmanned aircraft system airspace integration in the national airspace using a ground-based sense and avoid system. Johns Hopkins APL, Technical Digest Vol. 32, No. 3, 2013.

[3] SÁNDOR, Zsolt: Challenges caused by the unmanned aerial vehicle in the air traffic management. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 2017. ISSN 1587-3811. doi: https://doi.org/10.3311/PPtr.11204

[4] Sándor Zsolt, Boros Péter: Pilóta nélküli légi járművek okozta kihívások a légiforgalmi irányításban: 1. rész: Problémák feltárása. Közlekedéstudományi Szemle 67:(6) pp. 49-58. (2017)

[5] Sándor Zsolt, Boros Péter: Pilóta nélküli légi járművek okozta kihívások a légiforgalmi irányításban: 2. rész: Az UTM rendszerek. Közlekedéstudományi Szemle 68:(1) pp. 37-46. (2018)

[6] Global UTM Association – UAS Traffic Management Architecture 2017. April https://www.utm.aero/docs/Global_UTM_Architecture_V1.pdf

[7] C.A. Wargo, Corey Snipes, Aloke Roy, Robert J. Kerczewski: UAS industry growth: Forecasting impact on regional infrastructure, environment, and economy. Conference: 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC) DOI: 10.1109/DASC.2016.7778048

[8] FAA Aerospace Forecast: Fiscal Years 2016-2036, Federal Aviation Administration, 2016.

[9] Report Joseph L. Rios et. al: NASA/TM—2017–219494 UTM Data Working Group Demonstration 1 Final. Ames Research Center 2017.

[10] Thomas Prevot, Jeffrey Homola, and Joey Mercer: From Rural to Urban Environments: Human/Systems Simulation Research for Low Altitude UAS Traffic Management (UTM). 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2016-3291) https://doi.org/10.2514/6.2016-3291

[11] T-Mobile 5G: https://newsroom.t-mobile.com/news-and-blogs/nationwide-5g-blog.htm

[12] Parker D. Vascik and Jaewoo Jung: Assessing the Impact of Operational Constraints on the Near-Term Unmanned Aircraft System Traffic Management Supported Market. 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2016-4373) https://doi.org/10.2514/6.2016-4373

DEVELOPMENT STAGES OF THE UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM TRAFFIC MANAGEMENT SOLUTIONS

Traffic management of unmanned aircraft systems is one of the major challenges of the near future in the aviation industry. The emerging systems provide such functional solutions that enable the integration of unmanned aerial vehicles into the conventional aircrafts in case of low level, perigee flights. The air traffic control system should be abreast of the continuous technological development, thus it is important that the control system possess modular set-up, which ensures the implementation possibility of the emerging technical needs. This article present a system concept with modular set-up, which supports the step by step development of the UTM according to the actual technical needs.

Keywords: *Unmanned Aircraft System, unmanned aerial vehicles, traffic management, drones, air traffic management*

Sándor Zsolt (PhD.)	Zsolt Sándor (PhD.)
okleveles közlekedésmérnök, közlekedési szakértő	certified traffic engineer, traffic specialist
zsolt.sandor1@gmail.com	zsolt.sandor1@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7117-9069	orcid.org/0000-0001-7117-9069

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-16-0485_Sandor_Zsolt.pdf

Horváth Fruzsina, Pokorádi László

VÁLTOZÓK ÉS DIMENZIÓIK

Jelen tanulmányunkban a hazánkban kevéssé ismert dimenzióanalízis módszerét és főbb szabályait mutatjuk be a műszaki hallgatók tanulmányai alatt megismert példákon keresztül. A szemléltetésre kerülő esetek elősegítik a hallgatók későbbi tanulmányait, a kidolgozott példák a mechatronikai mérnök BSc képzés Rendszertechnika tantárgyának e-learningben oktatott tananyagába.

Kulcsszavak: *műszaki képzés; fizika; hasonlóság; változók; dimenziók; mértékegység*

BEVEZETÉS

A dimenzióanalízis egy olyan módszert nyújt számunkra, mellyel komplex fizikai problémákat tudunk egyszerűbb formára hozni annak érdekében, hogy minél könnyebben juthassunk el egy fizikai kifejezés mennyiségi megoldásához. Bridgman így magyarázza: „*A dimenzióanalízis legfontosabb használati lehetősége az, hogy következtetni tudunk a változók dimenzióinak tanulmányozásával bármely fizikai rendszerben, bizonyos korlátok között bármelyik lehetséges kapcsolat formájára a változók között. Nagy általánosságban a módszer a matematikai egyszerűsítés egyik jó eszköze.*” [1]

A dimenzióanalízis középpontjában a hasonlóság feltételezése áll. Fizikai szempontból a hasonlóság két dolog vagy jelenség egyenértékűségére utal, amik valójában különbözőnek tekinthetők. Például, bizonyos körülményeket figyelembe véve közvetlen kapcsolat van a valós méretű, illetve egy arányosan kicsinyített repülőgépre ható erők aránya között. A kérdés csupán az, hogy melyek ezek a körülmények, és milyen kapcsolat húzódik az erők között? Matematikailag a hasonlóság a változók olyan átalakítását teszi lehetővé, amely a független változók csökkentéséhez vezet, ami pontosítja a problémát. Ekkor az a kérdés, hogy milyen transzformációk hozzák meg számunkra ezt az eredményt. A dimenzióanalízis mindkét kérdés megválaszolását egyszerre célozza meg. A fő haszna abból a képességből ered, hogy összevonható, vagy tömörebbé tehető a fizikai kapcsolat formája. A probléma, ami első látásra ijesztően bonyolultnak tűnhet, sokszor egy kis erőbefektetés után a dimenzióanalízis segítségével könnyen megoldható.

Az Új Nemzeti Kiválóság Program keretében folytatott közös munkánk célja olyan módszereket, eszközöket dolgozunk ki, vagy szemléltessünk melyek az egyetemi mérnök hallgatók tanulási készségeinek fejlesztését segítik. Jelen írásunkban ennek keretében mutatunk be szemléltető példákat a fizikai változók dimenziónális tulajdonságaival kapcsolatos ismeretekre.

Tanulmányunk az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet a dimenzióanalízis tudománytörténeti fejlődését írja le röviden. A 3. fejezetben a fizikai változók dinemzióinak értelmezése ismerhető meg. A 4. fejezet a dimenzió aritmetikai szabályok egy újszerű szemléltető módszere ismerhető meg. Az 5. fejezet egy szemléltető példát mutat az úgynevezett dimenziós konstansok meghatározására és értelmezésére.

A DIMENZIÓANALÍZIS TÖRTÉNETE

Az első személy, aki alaposan írt a dimenziós okfejtésekről fizikai vonatkozásban, az nem más, mint Leonard Euler volt, 1765-ben. Euler gondolatai jóval megelőzték korát, ami Joseph Fourierről ugyancsak elmondható, aki az 1882-ben megjelent könyvében körvonalazta, amit ma dimenzionális homogenitásnak nevezünk. Néhány hasonlósági szabályt is kidolgozott a hőáramlás területén. További jelentős fejlődés nem mutatkozott Rayleigh 1877-ben megjelenő könyvéig. Ebben a könyvben Rayleigh bemutatja a „dimenziók egyik módszerét" és különböző példákat ad a dimenzióanalízishez. A végső áttörést, ami a módszert olyanná formálta, mint ahogy azt ma is ismerjük. Buckingham nevéhez köthetjük. Buckingham 1914-ben vázolta a közismert Buckingham π teóriát, a dimenziónélküli paraméterek leírására. Habár ma már azt is tudjuk, hogy egy francia férfi, nevezetten Aimé Vaschy 1892-ben, valamin egy orosz férfi, Dimitri Riabouchinsky 1911-ben függetlenül Buckinghamtől publikálták már saját módszereiket, melyek egyenértékűnek tekinthetők a π-teóriával. Buckingham publikációját követve Bridgman kiadta klasszikusnak számító könyvét 1922-ben, mely a dimenzióanalízis általános elméletét körvonalazza. Buckingham óta számtalan könyv látott napvilágot ebben a témában. A dimenzióanalízis nem csak a folyadékok mechanikájában vagy a műszaki tudományokban kapott helyet. Az alkalmazások közé ma már beletartozik az aerodinamika, a hidraulika, hajótervezés, hajástervezés, hő- és tömegátadás, égés, a polimerek felépítésének mechanikája, fluidumok kölcsön-hatása, az elektromágnesesség elmélete, sugárzás, asztrofizika, mélytengeri és földalatti robbantások, nukleáris robbantások, kémiai reakciók, valamint a különböző megmunkálások előtti kalkulációk elvégzésére is előszeretettel használják.

Speciális könyvek is íródtak a dimenzióanalízis használatának bemutatása céljából különböző, igen változatos tudományterületeken, mint például: metrológia, asztrofizika, közgazdaságtan, társadalomtudomány, gyógyszerészet, sőt még a növénytermesztés témakörében is [5].

A dimenzióanalízis legtöbb alkalmazásához nem fűzhetünk kétséget, hiszen ezek kísérleti tények alapján jól alátámasztottak. A metódus körüli vita elméleti-fizikai alapú és valószínűleg sohasem fog teljes mértékben elcsitulni. A matematikusok hajlamosak a módszer alapvető vonásaiban a merev szabályok hiányát felfedezni, és újra-újra próbát tesznek a módszer tárgyának újbóli meghatározására. Ilyen eset volt például 1957-ben Brand próbálkozása. Eközben pedig a fizikusok és mérnökök sokszor bizonytalanodtak el azt illetően, hogy milyen fizikai jelentése van a dimenzióanalízis különböző meghatározásainak. A probléma az, hogy a dimenzióanalízis olyan gondolatok, ismeretek köré épül, melyek a tudomány olyan pontjára nyúlnak vissza, melyekkel a tudósok és mérnökök nincsenek kapcsolatban. Hogy megérthessük a módszer alapjait, muszáj visszatérnünk a természettudomány néhány alapvető téziséhez.

A dimenzióanalízis lényegében a természet leleményességében gyökerezik, amit a fizikai világ leírása, valamint működésének számokkal, matematikai kifejezésekkel történő leírás érdekében hoztunk létre. Einsteint írta könyvében, hogy: „*A tisztán logikus gondolkodás nem adhatja át nekünk az empirikus világ ismereteit, minden tudás és ismeret a tapasztalásnál kezdődik és ennél is ér véget. Azok a válaszok, melyek a rideg, logikus gondolkodásból származnak, totálisan távol állnak a valóságtól, abból szemernyit sem tartalmaznak.*" [3].

A VÁLTOZÓK DIMENZIÓI

De mégis, mi is a dimenzió?!

Egy jellemző más mennyiségekkel való kapcsolatának jellegét annak dimenziója fejezi ki [2]. A fizikai mennyiségek között meghatározott összefüggések vannak. Ezért, ha e fizikai mennyiségek közül egyeseket alapmennyiségeknek tekintünk, akkor az összes többi fizikai mennyiség dimenziója meghatározott módon kifejezhető az alapmennyiségek dimenziójával. Az alapmennyiségekre vonatkozókat elsődleges, a többire vonatkozót másodlagos vagy leszármaztatott dimenziónak nevezzük. Az alapegységek megválasztása után egyértelműen adódnak a leszármaztatott egységek dimenziói [4].

A dimenzió (általános jele dim *f*, vagy *[f]*) olyan kifejezés (szimbólum), amely megadja, hogy milyen kapcsolat van a fizikai mennyiség és az alapmennyiségek, illetve alapegységek között. Tehát a mennyiségnek a tartalmát fejezi ki, és független a számértéktől és a mértékegységtől; csak azt fejezi ki, hogyan határoztuk meg (definiáltuk) az alapmennyiséggel.

Például a sebesség dimenziója:

$$\dim \mathrm{v} = \frac{\dim l}{\dim \tau} = \frac{[l]}{[\tau]} LT^{-1} \tag{1}$$

vagyis az l távolság dimenziója osztva a τ idő dimenziójával.

A dimenzió és a mértékegység fogalmát sokan összekeverik, amikor gyakran a mértékegység helyett dimenziót mondanak. Ugyanazon fizikai mennyiségnek csak egyféle dimenziója, de többféle mértékegysége lehet. Például a sebesség dimenziója – mint azt az (1) kifejezésből is látszik – csak LT^{-1}, mértékegysége viszont több is lehet, például:

$$\frac{m}{s} = ms^{-1} \quad ; \quad \frac{km}{óra} \quad ; \quad csomó = \frac{\text{tengeri mérföld}}{óra} \quad . \tag{2}$$

Helytelen tehát azt mondani, hogy a sebesség dimenziója ms^{-1}!!

Az alapdimenziók valamely megválasztásával adott egy mértékegység-rendszer, vagyis a mértékegységek egyértelmű összessége. Ezután a fizikai változók egy-egy halmazához (az azonos nevű fizikai mennyiségekhez) tartozó bármely elem nagyságát megadhatjuk egy számmal, amely (általában) azt fejezi ki hányszorosa a mértékegységnek. Ezt a számot mérőszámnak nevezzük.

A DIMENZIÓK SZEMLÉLTETÉSE

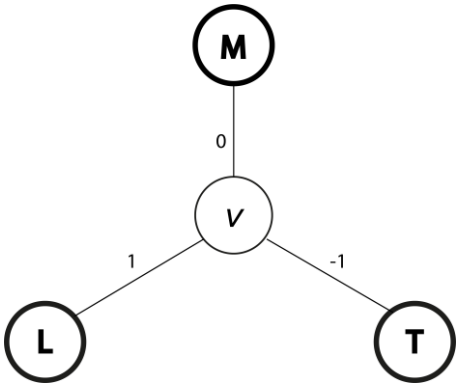
Ebben a fejezetben röviden a dimenziók aritmetikájával kapcsolatos legfontosabb tételek szemléltetésével foglalkozunk. Ezen tételek meglehetősen intuitívnak látszanak, bizonyításuktól eltekintünk. A választott demonstrációs példákat három (M – tömeg; L – hosszúság; T – idő) alapváltozó dimenzióját felhasználva, gráfszerűen szemléltetjük, ahol az adott élhez rendelt súly az adott alapdimenzió a hatványkitevőjét jelenti.

Hányadosok tétele

Bármely két változó dimenziójának hányadosa egyenlő a két változó hányadosának dimenziójával. Azaz, az f_1 és f_2 jelű változók esetén:

$$\frac{[f_1]}{[f_2]} = \left[\frac{f_1}{f_2}\right] \tag{3}$$

A hányadosok tételének bemutatására jó példa a sebesség, ami az elmozdulás és az idő hányadosa. A sebesség dimenzióját már a harmadik fejezetben levezettük és megmagyaráztuk az (1) egyenletben. A sebesség dimenziójának szemléltetését pedig az 1. ábrán láthatjuk, amiből azt olvashatjuk ki, hogy M^0LT^{-1} az a dimenzió, ami a sebességet jellemzi.



1. ábra A sebesség dimenziójának szemléltetése

Differenciálok tételei

Bármely két változó differenciáljaiból alkotott hányadosnak dimenziója a dimenziója egyenlő a két változó dimenziójának hányadosával, azaz:

$$\left[\frac{df_1}{df_2}\right] = \frac{[f_1]}{[f_2]} \tag{4}$$

A differenciálok tételét ugyancsak jól szemléltethetjük a sebesség példájával. Az egzakt fizikai definíció szerint a **v** sebesség az **r** hely τ idő szerinti első deriváltja. A sebesség dimenziója pedig ebből adódóan nem más, mint a hely, valamint az idő dimenziójának hányadosa, azaz

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} \quad ; \quad [\mathbf{v}] = \frac{[\mathbf{r}]}{[\tau]} = LT^{-1} \tag{5}$$

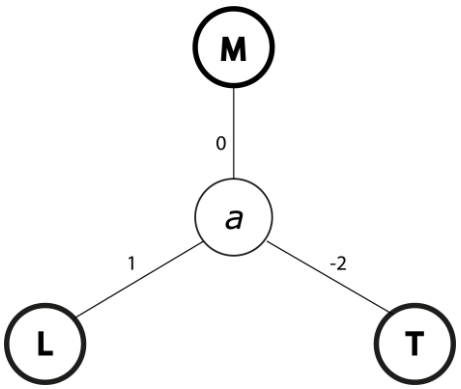
Az f_1 változó f_2 szerinti *n*-ed rendű deriváltjának dimenziója az f_1 és f_2^n változók dimenziójának hányadosával egyenlő:

$$\left[\frac{d^n f_1}{df_2^{\,n}}\right] = \frac{[f_1]}{[f_2^{\,n}]} \tag{6}$$

A (6) összefüggés pedig a gyorsulás példáján könnyen magyarázható, hiszen az **a** gyorsulás nem más, mint az **r** hely idő szerinti második deriváltja, aminek dimenzióját a (7) egyenlet mutatja, szemléltetéséhez pedig a 2. ábra nyújt segítséget. Az ábrából azt olvashatjuk ki, hogy

az **a** gyorsulás dimenziója M^0LT^{-2}, amit úgy kaptunk meg, hogy az **r** hely dimenzióját elosztottuk a τ idő dimenziójának a négyzetével.

$$\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{r}}{d\tau^2} \quad ; \quad [\mathbf{a}] = \frac{[\mathbf{r}]}{[\tau^2]} = LT^{-2} \tag{7}$$



2. ábra A gyorsulás dimenziójának szemléltetése

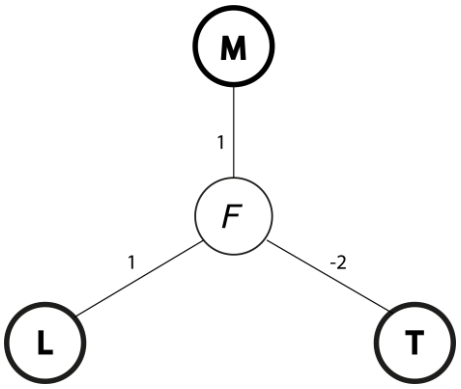
Szorzatok tétele

Bármely két változó dimenziójának szorzata egyenlő a két változó szorzatának dimenziójával. Azaz, f_1 és f_2 jelű változók esetén:

$$[f_1][f_2] = [f_1 f_2] \tag{8}$$

A szorzatok tételének szemléltetésére Newton II. törvényét használjuk fel, ami szerint az **F** erő az *m* tömeg és az **a** gyorsulás szorzatával határozó meg. Ebben az esetben a (9) formulát írhatjuk fel rá, hiszen az erő dimenzióját úgy kaphatjuk meg, ha a tömeg és a gyorsulás dimenzióját összeszorozzuk egymással, azaz az [M] és a $[LT^{-2}]$ szorzatából. Az erő dimenzióját a 3. ábra mutatja be.

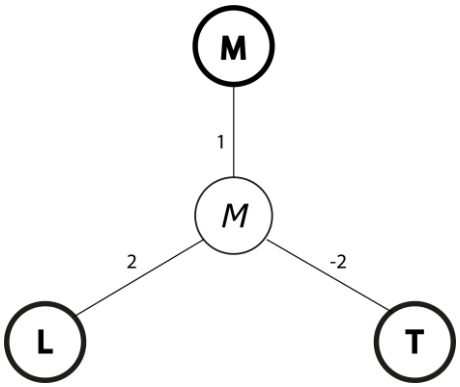
$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad ; \quad [\mathbf{F}] = [m][\mathbf{a}] = MLT^{-2} \ . \tag{9}$$



3. ábra Az erő dimenziójának szemléltetése

Az erő meghatározásán túl, a nyomaték definiálása is igazán jó például szolgál ennek a tételnek a magyarázatára, szemléltetésére, ezért tekintsük meg ezt is. Mivel ismerjük az erőt és annak dimenzióját így nagyon egyszerű dolgunk van, hiszen az **M** nyomaték nem más, mint az **F** erő és az **r** erőkar vektori szorzata, ahogy azt a (10) egyenlet mutatja és a 4. ábra szemlélteti.

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \times \mathbf{r} \quad ; \quad [\mathbf{M}] = [\mathbf{F}][\mathbf{r}] = ML^2T^{-2} \tag{10}$$



4. ábra A nyomaték dimenziójának szemléltetése

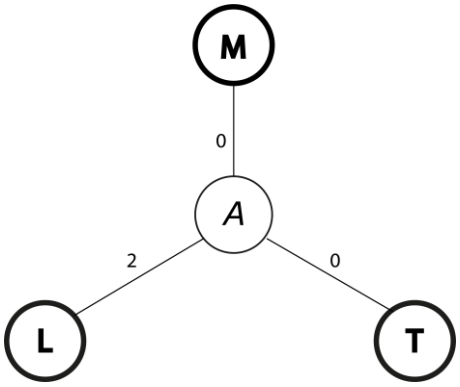
Hatványok tétele

Egy f változó valamely (n-edik) hatványának dimenziója egyenlő az adott változó dimenziójának hatványával, azaz:

$$\left[f^n\right] = [f]^n \tag{11}$$

Ennek a tételnek a bemutatására egy nagyon egyszerű példát választottunk, ez pedig egy téglalap *A* területének meghatározása. A téglalap területe nem más, mint az *x* hosszúság összeszorozva az *y* szélességgel. Ezt a gondolatmenetet követve könnyen megkaphatjuk a terület dimenzióját is, ha a hosszúság dimenzióját, vagyis az [L]-t megszorozzuk saját magával, vagy másként fogalmazva a második hatványra emeljük. A terület dimenzióját a (12) egyenlet adja meg, míg a szemléltetésére az 5. ábra hivatott.

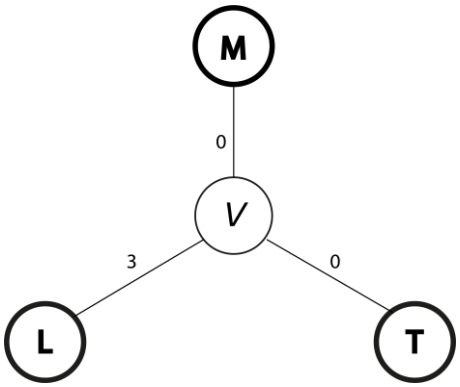
$$A = x \cdot y \quad ; \quad [A] = [L][L] = [L]^2 = L^2 \tag{12}$$



5. ábra A terület dimenziójának szemléltetése

Lényegében ugyanez a helyzet egy téglatest *V* térfogatával is, hiszen a térfogat az *x* hosszúság; *y* szélesség és *z* magasság hosszúságegységek szorzatát jelenti, csak ebben az esetben három tagból áll ez a szorzat. Dimenzionálisan felírva háromszor szorozzuk össze a hosszúság dimenzióját, azaz az [L]-t, így jutunk el a térfogat dimenziójához, az L^3-höz. A térfogat dimenzionális felírását a (13) egyenlet tartalmazza, a 6. ábra pedig ennek szemléltetését szolgálja.

$$V = x \cdot y \cdot z \quad ; \quad [V] = [L][L][L] = [L]^3 = L^3 \tag{13}$$



6. ábra A térfogat dimenziójának szemléltetése

Integráltétel

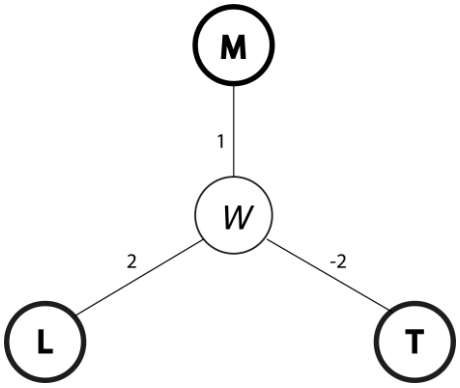
Egy integrál dimenziója az integrandus és a független változó dimenziójának szorzatával egyenlő, azaz:

$$\left[\int f(x)dx\right]=\left[f(x)\cdot dx\right]=\left[f(x)\right]\left[x\right] \tag{14}$$

A tételt a mechanikai munka példájával szemléltetjük. A mechanikai munka meghatározása az **F** erő és a *d***s** elemi elmozdulás skaláris szorzatának P_1 és P_2 pontok közt vett integrálja. Ahhoz, hogy meg tudjuk határozni a munka dimenzióját, az erő – lásd (9) egyenlet – és az elemi elmozdulás L dimenzióját kell egymással szoroznunk. A munka dimenzióját a

$$W=\int_{P_1}^{P_2}\mathbf{F}d\mathbf{s} \quad ; \quad \left[W\right]=\left[\mathbf{F}\right]\left[d\mathbf{s}\right]=\left[MLT^{-2}\right]\left[L\right]=ML^2T^{-2} \tag{15}$$

módon határozhatjuk meg, szemléltetését pedig a 7. ábrán láthatjuk.



7. ábra A munka dimenziójának szemléltetése

Fontos itt megjegyeznünk, hogy a dimenzió a jelenség belső lényegére nem jellemző, ugyanis különböző mennyiségnek azonos dimenziója lehet. Példaként láthatjuk a W munka – (15) egyenlet – és az **M** nyomaték – (10) egyenlet – dimenziója egyaránt L^2MT^{-2}, de fizikai jelentésük, jellegük nagyban eltérnek egymástól.

A DIMENZIÓS KONSTANSOK

Bármely fizikai összefüggést leíró egyenlet, illetve megoldása helyességének két alapvető kritériumát kell megfogalmaznunk. Ezek:

- mindkét oldala numerikusan egyenlő kell, hogy legyen;
- mindkét oldala dimenzionálisan homogén kell, hogy legyen.

Az egyenlet oldalainak egyenlősége magától értetődik. De sok esetben elfeledkezünk a dimenzionális homogenitás kérdéséről.

Minden analitikusan levezetett egyenlet bal és jobb oldala azonos dimenziójúnak, mértékegységűnek kell lennie. Minden szám, mely megjelenik az egyenletben, dimenziómentesnek (pontosabban 1 dimenziójúnak) kell lennie.

Egy kísérleti úton meghatározott vagy levezetett képlet esetén a szabály úgy módosul, hogy ekkor megengedettek a dimenziós konstansok. Ez az jelenti, hogy az egyenletben szereplő számhoz (beleértve magát az 1-t is) rendelhetünk valamilyen dimenziót. Ha valamelyik konstans rendelkezik dimenzióval, a képletben szereplő összes változó dimenzióját, mértékegységét meg kell határozni, különben az adott egyenlet fizikailag használhatatlan.

A fenti tétel értelmezéséhez példaképpen nézzük meg a newtoni folyadékok súrlódásának kérdését.

Newton megfigyelte, hogy az áramló (newtoni) közegben az áramlási sebességgel párhuzamos síkokban τ csúsztató feszültség keletkezik. Ez a csúsztató feszültség, a szilárd testeknél tapasztalható súrlódástól eltérően, nem függ az egymáshoz képest elcsúszó rétegek összeszorító erőtől, hanem csak a szomszédos rétegek közötti sebességkülönbségtől, azaz a Newton formula értelmében:

$$\tau \sim \frac{du}{dy} = \mu \frac{du}{dy} \quad , \tag{16}$$

ahol a jobboldali differenciálhányados a rétegek közti sebességet fejezi ki, a μ pedig (egyelőre) egy arányossági tag.

A csúsztatófeszültség dimenziója az erő MLT^{-2}, illetve a felület L^2 dimenziói alapján határozható meg:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad ; \quad [\tau] = \frac{[F]}{[A]} = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = MT^{-2}L^{-1} \tag{17}$$

A (16) egyenlet jobb oldalán lévő differenciálhányados dimenziója a sebesség LT^{-1}, illetve a (rétegek közti) távolság L dimenziója alapján:

$$\left[\frac{du}{dy}\right] = \frac{[u]}{[y]} = \frac{LT^{-1}}{L} = T^{-1} \tag{18}$$

A (16) egyenlet – a fenti szabály értelmében – csak akkor lehet dimenzionálisan homogén, ha azt a μ arányossági tag olyan – C-vel jelölt – dimenziója biztosítja, azaz:

$$MT^{-2}L^{-1} = C \cdot T^{-1} \tag{19}$$

Ez csak akkor lehetséges, ha:

$$C = MT^{-1}L^{-1} \tag{20}$$

azaz:

$$[\mu] = MT^{-1}L^{-1} \tag{21}$$

A fentiek alapján a Newton formulában – (16) egyenletben – szereplő μ a közeg anyagára jellemző arányossági tényező, melyet az áramlástanban dinamikai viszkozitási tényezőnek nevezünk, dimenziója: $MT^{-1}L^{-1}$, mértékegységei:

- az SI-ben: $kg(ms)^{-1}$, de ekkor a sebességet ms^{-1}-ban kell megadnunk;
- az angol-szász mértékegység rendszerben: *lb(ft·s)-1* (pound per foot second), és a sebességet $ft{\cdot}s^{-1}$-ban (foot per second) kell megadnunk.

Hasonló, dimenziónális megfontolások alapján alakultak ki a különböző anyagjellemzők dimenziói, mértékegységei a műszaki tudományokban.

ÖSSZEFOGLALÁS

A mérnöki munka egyik fontos része a különböző fizikai jelenségek, műszaki folyamatok matematikai leírása. Jelen tanulmányunkban olyan példákon keresztül mutattuk be a fizikai jellemzők dimenziónak kérdéskörét, amelyek az egyetemi hallgatók számára már ismertek.
A dimenzióanalízis módszeréről hazánkban igen kevés szó esik, azonban az angolszász nyelvterületen nagy hangsúlyt kap, az egyetemi fizikaoktatás egyik alapkövének számít a téma. Véleményünk szerint a magyar oktatásban is megállná helyét, sőt kifejezetten hasznos lenne ezeknek az ismereteknek a tanítása.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Horváth Fruzsina, Dimenzóanalízis a mérnöki feladatokban, TDK dolgozat, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet, 2018. (konzulent: Pokorádi László)
[2] Pokorádi László: Rendszerek és folyamatok modellezése, Campus Kiadó, Debrecen, 2008.
[3] Sonin Ain: The physical basis of dimensional analysis, Department of Mechanical Engineering MIT, Cambridge 2001.
[4] Szirtes, Tamás: Dimenzióanalízis és alkalmazott modellelmélet, Typotex, Budapest, 2006.
[5] Szűcs, Ervin: Hasonlóság és modell, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1972.

VARIABLES AND THEIR DIMENSIONS

In this paper, the method and the main rules of the dimensional analysis will be demonstrated that are not well-known in Hungary are presented through the examples learned during the studies of engineering students. The cases illustrated will facilitate students' subsequent studies, the elaborated examples in the course of System Engineering of the mechatronics engineer BSc education in e-learning.

Keywords: *technical education; physics; similarity; variables; dimensions; unit*

Horváth Fruzsina BSc. hallgató Óbudai Egyetem, Műszaki Biztonságtudományi Szakműhely – μβσ hrvt.fruzsina@gmail.com orcid.org/0000-0002-3072-9623	Fruzsina Horváth BSc. Student Óbuda University, Workshop of Technical Safety Sciences – μβσ hrvt.fruzsina@gmail.com orcid.org/0000-0002-3072-9623
Pokorádi László (CSc) egyetemi tanár Óbudai Egyetem, Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-2857-1887	László Pokorádi (CSc) Full professor Óbuda University, Institute of Mechatronics and Vehicle Engineering pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-2857-1887

A dolgozat az Óbudai Egyetem Műszaki Biztonságtudományi Szakműhely – μβσ – keretében készült, az Új Nemzeti Kiválóság Program támogatásával.

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-17-0494_Horvath_Fruzsina-Pokoradi_Laszlo.pdf

Annamária Koncz, László Pokorádi, Gyula Szabó

FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS AND ITS EXTENSION POSSIBILITIES

In the 21th century, mass production is the main method of manufacturing. The occurring failures during mass production cause significant damages and lack of income. There the quality-centered mindset gains more and more importance. Nowadays, the focus is set on prevention instead of problem handling. The (Process) Failure Mode and Effects Analysis is one of the most widely used quality methods. Its aim is to map production failure modes, to prevent failure causes and to detect them. The utilization is specified by standards, but it is advisable as well for companies working in the production sector. In our work, we introduce the formation of Failure Mode and Effect Analysis and we point out the possible extension possibilities.

Keywords: *FMEA, prevention measures, detection measures, severity*

INTRODUCTION

The aim of our work is to introduce Failure mode and Effect Analysis (shortly FMEA) and to point out its extension possibilities.

The development of FMEA started in the 20 century by the Military of the United States in the ’70s [1], afterwards the NASA recorded the method [2]. The American Army published its specification about the usage in 1980 (MIL-STD-1629 1980)[3].

The progress of industry branches show the necessity of FMEA usage. Nowadays, the spectacularly expanding automotive industry is aided by this systematical analyses. For example: with the development of electrical industry, the analysis of failure effects gains more importance [4]. Not only automotive companies, but mechanical manufacturers and even food industry is using it [5].

We can differentiate between four types of FMEA: System FMEA, Design (Product) FMEA, Process FMEA and Service FMEA. These types of FMEA cover the whole cycle of the product: the system, the product itself and its production process. If all analyses are made, it covers the whole product [6].

During FMEA creation, we examine potential failures, with placing them into a failure net. This way the failure is connected with its effect and cause. FMEA is an important element in quality management, because it reveals the non-conformities even on construction level; it identifies the severity, detection and prevention of the failures.

In our work, we focus on the production aspect of FMEA; in Chapter 2 we describe Process FMEA in general; in Chapter 3 we point out the evaluation of measures; in Chapter 3 we focus on the extension possibilities of FMEA and in Chapter 5 we summarize the next step of the research.

DESCRIPTION OF PROCESS FMEA

Process FMEA is mainly used for the analysis of production [7]. It has a connection with other quality tools, such as Control Plan and 8D [8].The outcomes of P-FFMEA are the following: potential failure list ranked with RPN [9], list of special characteristics and a list of potential measures.

The advantage of P-FMEA are the corrective action plans; the development of Control Plans; the priorization of prevention measures and the documentation of process changes [6]. The FMEA process consists of four main steps: structural analysis, function analysis, failure analysis and measure evaluation.

Structural analysis

Firstly, during the structural analysis the system elements are defined. The structural analysis can be a block diagram or even a simple flow chart. In case of P-FMEA the production processes must be divided to sub processes.

Function analysis

In this step, functions are connected to the system elements. Function analysis defines the optimal behaviour of the process by statements [6].

Failure analysis

At this stage the failures are derived from functions, they describe their non-fulfilment. The failure mode is in the centre of the failure net. (The result of the failure mode is the failure effect; the cause is the failure cause.) The connection between them is the following: failure effect-failure mode-failure cause.

During FMEA the failures may be repeated which causes the complexity of failure nets [6].

Definition of measures

Measures are defined to prevent and to detect failure causes.

The rules for defining measures are the following:

- If the risk is very low, there is no need for measure definition (but in practice it is not accepted by customers);
- If the risk is moderate, measures are needed;
- If the risk is high strong actions are needed (validation and evaluation might be necessary);
- If the risk is critical, even the design, product, process or service must be changed.

Certain standards, handbooks of automotive manufacturers and suppliers contain rating catalogues (in this study we introduce the VDA P-FMEA rating catalogues) [6].

Definition of prevention actions

Prevention describes how a failure cause can be avoided.

The rating of prevention effectiveness is evaluated with factor O (Occurrence) [10]. The rating is evaluated between 1 and 10. 1 is the rarest occurrence, 10 is the most common [11].

Ppm (Part Per million) data of production processes help to determine occurrence value [6].

Definition of detection measures

Detection actions show the rectification of failure causes. The effectiveness of detection measures is measured with factor D (Detection) [9]. 1 is the most effective measure, 10 is least effective measure on the scale [6].

EVALUATION OF MEASURES

The index-number of FMEA is the RPN [9]. RPN consists of the multiplication of of S (Severity) factor, O (Occurrence) factor and D (Detection) factor. The highest rating of each factor is 10, so the highest RPN rating is 1000.

Severity evaluation

In case of failure effect rating, factor Severity (S) is used. In Table 1[12] we use the VDA definition of each severity category.

Severity value	Severity category
Very critical 10-9	Very critical failure, which affects safety. The failure costs are not acceptable. The produced products cannot be shipped out.
critical 8-7	Strictly affected/decreased functions, where immediate intervention is needed.
moderate 6-4	Decreased product/process functions. No immediate intervention is needed. High failure costs.
unremarkable 3-2	Unremarkable effect loss, remote rework and failure costs.
very unremarkable 1	Very unremarkable failure effect. Acceptable failure costs.

Table 1 Process FMEA severity categories [12]

The very critical failures (rated with 9, 10) are those which result in the global non-conformity of the manufactured products. The failures effects might result in the scrapping of all products.

Critical failures (rated with 7, 8) need immediate intervention in the process, and cause very high failure costs. In certain cases, the products might be reworked.

Moderate failures (rated with 4-6) decrease the product/process functions. In this case no immediate intervention is needed. High failure costs might occur.

Unremarkable failures (rated with 2-3) have little impact and cause remote rework and failure costs.

Very unremarkable failure (rated with 1) have minimum effect with acceptable failure costs.

Occurrence ratings

In case of occurrence rating the most likely failure cause is rated with 10, and the rarest with 1 (if it is a Poke Yoke solution) In Table 2 [12] we introduce the occurrence ratings according to VDA. We point out the correlation between occurrence ratings and process types.

Occurrence ratings	Process categories
Very high 10-9	New process without experience
High 8-7	New process, with known but still problematic processes.
Moderate 6-4	New process, with experiences of known processes.
Unremarkable 3-2	Processes taken from similar practically tested practises.
Very unremarkable 1	Known process with positive serial experiences and with positive process and machine capability studies.

Table 2 Occurrence categories in P-FMEA [12]

New processes without experience are have very high ratings (rated with 9-10)

Failure causes with high occurence (rated with 8-7) occur at new processes which still have difficulties.

Failure causes of new processes with experiences from known processes have moderate occurence ratings (rated with 6-4).

Processes taken from similar practically tested practises have unremarkable failure causes (rated with 3-2)

Known process with positive serial experiences and with positive process and machine capability studies have very unremarkable failure causes (rated with 1)

Detection ratings

In case of detection the failures causes the hardest to detect are rated with 10, and the failure causes most likely to detect are rated with 1. In Table 3 [12] we define the detection rating categories according to VDA.

Failure cause detection is very low (rated with 10-9), because there is no comparable process.

Failure cause detection is low (rated with 8-7) if the information about the comparable process are insufficient.

Failure cause detection is moderate (rated with 6-4) if there are existing comparable processes among new conditions (machine, material).

Failure cause detection is high (rated with 3-2) if there is an existing comparable process, with proven results.

Failure cause detection is very high (rated with 1) if experiences are available from proceeding comparable processes.

Detection ratings	Detection categories
Very low 10-9	Very low detection, because there is no comparable process.
Low 8-7	Low detection, because the information about the comparable process are insufficient.
Moderate 6-4	Moderate detection with existing comparable process among new conditions (machine, material).
High 3-2	High detection, existing process with proven results.
Very High 1	Very high detection, experiences are available from proceeding comparable process.

Table 3 Detection ratings of P-FMEA [12]

EXTENSION POSSIBILITIES OF FMEA

FMEA is the most known risk assessment and analysis tool. Nowadays, Process FMEA is mainly used for production processes, but the supplementary processes should also described with it to strengthen safety and effectiveness. This way FMEA can be conducted for work safety and ergonomic analyses as well.

Work safety examination studies the effect of 'human factor' on production processes. Safety relevant FMEAs can be very useful in industrial environments, where the employees are working with machines, tools and different materials [13]. Its aim is to define the effect of accident-prone situations, as well as the occurrence and detectability of failure causes. In case of a work safety oriented FMEA, the rating catalogue should be different as used at simple Process FMEAs. For example, in this case severity evaluations focus on the impact of human injuries. The worst-case scenario is death or permanent disability (the less serious effect can be minor injuries, such as scratches or bruises) [13]. The most serious effects as defined can cause a person's death, so the ratings have to be defined very carefully. One possible extension way of the traditional FMEA method to work safety analysis tool is to use further factors in the analysis. The values of possible treatment costs and duration can be also added the evaluation, this way DEA-FMEA is created. With further specification of risks (four categories: minor, tolerable, major intolerable) RDEA-FMEA is formed. DEA-FMEA and RDEA-FMEA carry more information than the 'classic FMEA'[13].

With analysing ergonomic aspect, the effects of work place conditions can be spotted on production effectiveness. Not proper working conditions might cause serious problems to nowadays factories. Different costs may upcome, such as failure costs and costs of not-well utilized time. Ergonomic FMEA approaches might help to prevent the costs before they arise. It is very important to mention that 'back to Gemba' is very important in this situation. The work places have to visualised, which helps to solve the problems.

SUMMARY

The most important aim of our study is to introduce the steps of P-FMEA creation. RPN is the index-number of failure causes. RPN consists of the multiplication of S, O, D factors. In our study we present rating catalogue examples of the VDA Handbook. With using these rating catalogues, each failure can be specified during the analysis. Furthermore, we present the possible extensions of the traditional FMEA into specific work safety and ergonomic FMEA. The aim of the authors is to carry out a sample P-FMEA with the focus on work safety and ergonomic aspects.

REFERENCES

[1] Christian Spreafico, Davide Russo, Caterina Rizzi: A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents, Computer Science Review, Volume 25, August 2017, Pages 19-28, 2017

[2] Hossein Sayyadi Tooranloo, Arezoo sadat Ayatollah: A model for failure mode and effects analysis based on intuitionistic fuzzy approach, Applied Soft Computing, Volume 49, December 2016, Pages 238-247,2016

[3] Koji Komita,Tomohiko Sakao, Yoshiki Shimomura: A failure analysis method for designing highly reliable product-service systems, Research in Engineering Design, April 2018, Volume 29, Issue 2, pp 143–160, 2018

[4] C.J. Price, N.S. Taylor: Automated multiple failure FMEA, Reliability Engineering & System Safety, Volume 76, Issue 1, April 2002, Pages 1-10, 2002

[5] Antonio Scipioni, Giovanni Saccarola, Angela Centazzo, Francesca Arena, FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company, Food Control Volume 13, Issue 8, December 2002, Pages 495-501, 2002

[6] D. H. Stamatis: Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution, 2003

[7] P.C. Teoh, Keith Case: Failure modes and effects analysis through knowledge modelling, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 153–154, 10 November 2004, Pages 253-260, 2004

[8] Koncz Annamária: A 8D problémamegoldó technika http://epa.oszk.hu/02600/02694/00069/pdf/EPA02694_rtk_2015_03.pdf, 2015 Saptarshi Mandal, J. Maiti: Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach, Expert Systems with Applications Volume 41, Issue 7, 1 June 2014, Pages 3527-3537

[9] H. Arabian-Hoseynabadi, H. Oraee, P. J. Tavner: Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 32, Issue 7, September 2010, Pages 817-824, 2010

[10] Seung J. Rhee, Kosuke Ishii: Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability, Advanced Engineering Informatics Volume 17, Issues 3–4, July–October 2003, Pages 179-188

[11] Szilágyi Gábor, Lukács Krisztián, Szamosi Barna, Pokorádi László: A QS 9000 és a VDA szerinti hibamód és -hatáselemzések összehasonlítása, http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-33-0115_Szilagyi_Gabor_et_al.pdf, 2014

[12] Verband der Automobilindustrie: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Produkt- und Prozess-FMEA, Frankfurt/Main, 2006

[13] Samuel Yousefi, Arash Alizadeh, Jamileh Hayati, Majid Baghery: HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: A study of automotive parts industry in Iran, Safety Science, Volume 102, February 2018, Pages 144-158

HIBAMÓD-ÉS HATÁSELEMZÉS ÉS KITERJESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A XXI. században a tömeggyártás vált egyértelműen a termékelőállítás fő metódusává. A tömeggyártásban előforduló hibák jelentős károkat, és bevétel kiesést jelentenek. Emiatt a minőségszempontú megközelítés egyre nagyobb teret hódít. A hangsúly a gyártási problémák kezelése helyett azoknak elkerülésére került. A Hibamód-és Hatáselemzés napjaink egyik legelterjedtebben alkalmazott minőségbiztosításai technikája. A célja a gyártási hibaképek feltérképezése, a hibaokok megelőzése, és azok detektálása. Alkalmazása szabványok által előírt, de egyben ajánlatos is a gyártó szektorban működő vállalatok számára. Tanulmányunkban a Hibamód-és hatáselemzés felépítésének bemutatása a célja, és kitérünk a módszer alkalmazásának kiterjesztésére is.

Kulcsszavak: *FMEA, megelőző intézkedések, detektálási intézkedések, súlyosság*

Annamária Koncz (MSc) PhD Student Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Sciences konczannamaria@gmail.com orcid.org/0000-0002-9171-4441	Koncz Annamária (MSc) PhD hallgató Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori iskola konczannamaria@gmail.com orcid.org/0000-0002-9171-4441
László Pokorádi Dr. (CSc) Full professor Óbuda University, Institute of Mechatronics and Vehicle Engineering pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-2857-1887	Dr. Pokorádi László (CSc) egyetemi tanár Óbudai Egyetem, Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0003-2857-1887
Gyula Szabó Associate professor Óbuda University, Institute of Mechanical Engineering and Safety Sciences szabo.gyula@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-3963-2916	Dr. Szabó Gyula egyetemi docens Óbudai Egyetem, Gépészeti és Biztonságtudományi Intézet szabo.gyula@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-3963-2916

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-18-0495_Koncz_Annamaria_et_al.pdf

Rohács József

A REPÜLÉS ÉS A REPÜLŐIPAR FEJLŐDÉSÉNEK HATÁSA A GAZDASÁGRA

A repülés, a repülőipar csúcstechnológia tudás alapú gazdasági ágazatok. Szervezettségük alapján az egy alkalmazottra jutó hozzáadott érték ezekben a gazdasági szektorokban a legnagyobb. Nem véletlen, hogy minden fejlett ország aktív részvevője a gazdaság ezen részeinek. Ez a rövid tanulmány pont arra hívja fel a figyelmet, hogy a gazdaság fejlesztésére koncentráló stratégiai fejlesztések során nem szabad kihagyni a repülést, a repülőipart. Ráadásul a repülés most érkezett el a fejlődését meghatározó (második) „S"-görbe végéhez. A mostani változó folyamatot egyfajta stratégiai, technológiai és szerkezeti váltás jellemzi. Ilyenkor könnyebb csatlakozni a főbb folyamatokhoz, a koncentrálódó piac főbb szereplőihez. Ez a cikk ennek a lehetőségeit vizsgálja. Először, néhány meghatározó problémát mutat be, majd felvázolja a technológia fejlődés legfontosabb sajátosságait. Ezután elemzi a repülés és a gazdaság, illetve a repülőipar és a gazdaság kapcsolatát. Kiemeli, a stratégiai fejlesztés szempontjából fontos kapcsolatokat és megfogalmazza a fejlesztés szempontjából fontos következtetéseket.

Keywords: *repülés, repülőipar gazdaság stratégiai fejlesztés*

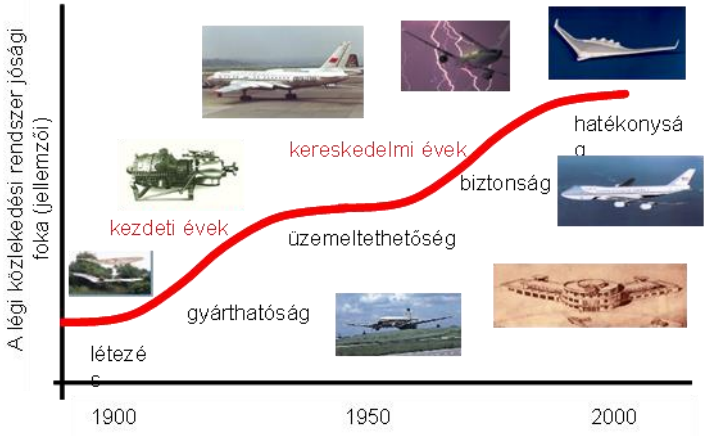
BEVEZETÉS

Többnyire mindenki hallott a MALÉV megszűnéséről. Sokan természetesnek tartották, hogy csődhelyzetbe került a vállalat. Egyesek a piaci koncentráció miatti gyilkos versenyben, mások a menedzsment (sorozatban) által elkövetett hibákban, de voltak, akik a tulajdonosok és a menedzsment felelőtlen gazdálkodásában (működési pénzek kivonásában), nemzetközi gazdasági és politikai nyomásgyakorlásban és a többen ezek együttesében vélték meghatározni az elkerülhetetlen csődhöz vezető folyamatokat. Ma már sokan látják, mit vesztett a magyar gazdaság ezzel a csőddel. Lényegében a repülőteret használó utasok létszámával nincs is olyan nagy baj. Az ideérkező utasok fogyasztási szokásai és fogyasztó képességei viszont elmaradnak a lehetőségektől.

A magyar repülőipar ennél is összetettebb és rosszabb helyzetben van. Két vesztes háború után is leépítették a repülőipart. Lényegében elzárták a magyar gazdaságot a csúcstechnológiától. Sajnos jelenleg egy "önkéntes Trianon" következményeivel kell szembesülnünk. Mostanában – még messze nem elég, de – nem elhanyagolható támogatást kap a magyar repülés, repülőipar. A támogatási célokkal és a felhasználás eredményeivel viszont komoly problémák vannak. Ez a tanulmány pont ebben próbál segítséget nyújtani a stratégiai fejlesztési koncepciót készítők számára. Mint ilyen szervesen kapcsolódik a korábban megjelent a stratégiai fejlesztéssel foglalkozó cikkekhez [1][2].

A tanulmány összeállításának másik fontos aktualitását az adja, hogy a repülés fejlődését meghatározó un „S"-görbék (1. ábra) közül a második végénél tart [3][4][5]. Ez egyben azt jelenti, hogy (i) felerősödnek az ágazatban megjelenő problémák, (ii) megindul egy erőteljes – kezdetben kifejezetten technológiai - fejlesztés, (iii) átrendezik a repülés és a repülőipar. Az átmenet akár 15–25 évig is eltart, mire nyilvánvalóvá válik a következő „S"-görbét meghatározó alapvető technológia. Mindenesetre, ebben az átmeneti időszakban tudnak az új szereplők helyzetbe kerülni.

Most nem az a fontos kinek milyen ipara, gazdasági háttere van. Az a fontos kinek, milyen ötlete van, ki tud többet hozzátenni a problémák megoldásához, új technológiák kifejlesztéséhez.



1. ábra A repülés fejlődéstörténetének két „S” görbéje [3]

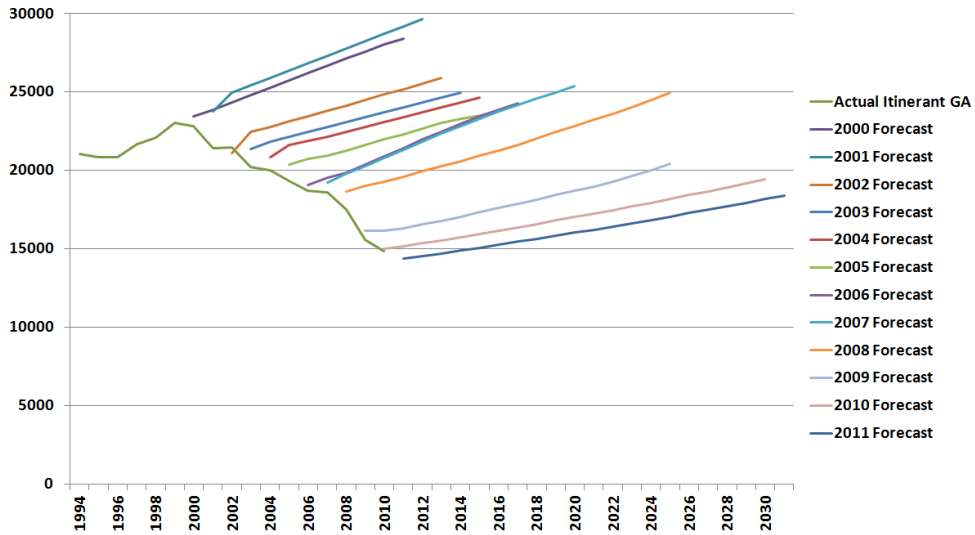
Érthető, ebben az átmeneti időszakban könnyebb bekapcsolódni a nemzetközi folyamatokba a repülés és a repülőipar rendszerébe. Ezzel lehet közvetlen kapcsolatot teremteni a legfejlettebb technológiák forrásához, ezzel lehet a technológiai transzfer folyamatokat erősíteni.

Ez a rövid tanulmány öt pontban foglalkozik a repülés és a repülőipar gazdasági kapcsolataival. Az első pont a legfontosabb ágazati problémák közül néhányat kiemelve jellemzi, mit jelent az repülés fejlődésében megjelent átmeneti időszak. A második pont alapvetően a jövőre koncentrál és néhány jelentős technológia fejlesztést, illetve eredményt elemezve megkísérli felvázolni a változási irányokat. A harmadik pont kifejezetten a repülés a negyedik a repülőipar és a gazdaság kapcsolatát vizsgálja. Célja a kapcsolat jelentőségének az értékelése, a lehetséges fejlődési, fejlesztési irányok bemutatása. Végül az ötödik pont felvázolja a magyar repülőipar fejlesztésére kidolgozandó és alkalmazandó stratégia alapjait.

A REPÜLÉSFEJLŐDÉSÉT MEGHATÁROZÓ PRTOBLÉMÁK

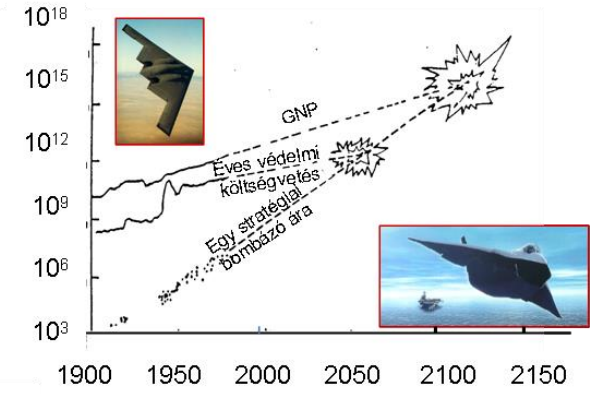
A repülés fejlődése egyfelől elég könnyen előre jelezhető, mivel az folyamatos és „kisebb visszaesésektől” eltekintve töretlen (lásd 3. pont). Másfelől, az új technológiák alkalmazásával – pl. a személyes repülőgépek megjelenésével - új lehetőségek, új piacok nyílnak, de ezek előrejelzése (forecast) szinte lehetetlen (2. ábra) a szabályozási környezet (általában elkéső) változáskövetése (lásd drónok), a piacfejlesztés anomáliái, hibái és a társadalmi elfogadottság miatt. Egy biztos, a 2. ábra előrejelzéseinek készítői töretlenül bíztak abban, hogy az FAA, NASA (National Aeronautics and Space Administration) SATS (Small Aircraft Transportation System) megaprogramba [7] fektetett milliók előbb, utóbb eredményre vezetnek.

A NASA SATS program elmaradt hatásaiért, részben, vagy egészben a 2008-as válság okolható. Ugyanakkor a repülésben egy sor és jelentős probléma jelentkezett (lásd részletesebben az [1]-es forrás). Közülük sokan ismerik pl. a repülésvédelem (security) vagy a környezetszennyezés problémáit. Ennek ellenére érdemes néhány fontosabb problémát kiemelni és röviden bemutatni.



2. ábra Az FAA (Federal Aviation Administration) és a GAMA (General Aviation Manufacturers Association) előrejelzése az általános repülés növekedésére az U.S. toronnyal rendelkező repülőterein [6] (A valós adatokból kiinduló emelkedő vonalak az évente kidolgozott előrejelzéseket mutatja)

Elsőként egy kevésbé ismert, de alapvető és meghatározó problémát, az „ár-konfliktust" érdemes elemezni. Ezt egyfajta ár-robbanásként lehet értelmezni. A repülőgépeket a gyártók egyre több és fejlettebb megoldással, berendezéssel, rendszerrel, felszereléssel látják el. Ezek a gépek ténylegesen jóval többet tudnak az elődjeiknél, de lényegesen drágábbak is. Megfigyelhető a repülőgépárak exponenciális emelkedése.



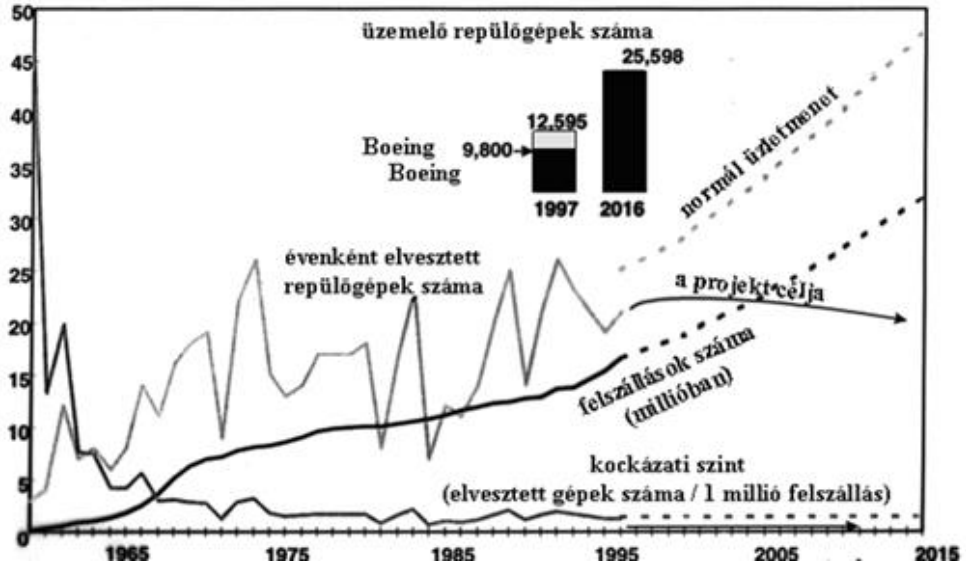
3. ábra Ár-robbanás – a repülőgépár változásának előrejelzése (1998-ból) [8]

A repülőgépek beszerzési költségeinek várható alakulására egy amerikai projekt hívta fel a figyelmet még a múltszázad végén [8]. Az akkori előrejelzés szerint (3. ábra) az amerikai hadsereg éves költségvetése 2060 körül, az amerikai GNP (Growth National Product) pedig 2140 körül éves szinten meg fog egyezni egy stratégiai bombázó repülőgép árával, ha a jelenlegi fejlődési tendencia megmarad. Nem véletlen, hogy az amerikai kormány a jelenség felismerése után a többfunkciós F-16-osok leváltására – akkor még csak készülő – JSF (Join Strike Fighter) repülőgépek árát már maximalizálta.

Szinten mindenki ismeri a repülésbiztonság legfontosabb sajátosságait, hogy a legtöbb katasztrófa a bevezetés és a leszállás során következik be, ezek mintegy 80%-át emberi hiba, 3–5%-át látszólag egymástól független jelentős ok váltja ki. Azt is sokan tudják, hogy a légiközlekedés

a legbiztonságosabb közlekedési ágazat. Azt már talán kevesen ismerik, hogy már az 1990 – es évek közepére felhívták a figyelmet a repülésbiztonság sajátos problémájára [9][10][11].

A 4. ábrán is bemutatott formában [9][10][11] a repülési kockázatot, vagyis a légikatasztrófa bekövetkezésének a valószínűségét elfogadható költségszinten, a jelenleg alkalmazható műszaki és technológiai megoldásokkal tovább csökkenteni már nem lehet. A korabeli előrejelzések szerint a légiforgalom várható növekedése miatt mára durván kétszer több nagyméretű utasszállító repülőgép közlekedik és a műszaki kockázatokkal számolva már akár heti egy légikatasztrófa is lehetne. Ezt elkerülendő menedzsmenti módszereket javasoltak. Például, amennyiben a repülőgép vezetője soron kívüli leszállási engedélyt kér mivel az egyik hajtómű leállt, akkor a légforgalmi irányítók a normál üzemmódhoz képest 50–80%-kal gyakrabban hibázhatnak. Ez a kockázat csökkenthető menedzsmenti módszerekkel, a probléma megjelenésekor pihent légiforgalmi irányító bevonása a feladat megoldásába, az adott repülőgép segítését új, csak ezzel a feladattal foglalkozó irányítóra bízzak stb.



4. ábra A repülésbiztonsági mutatók várható alakulása az elkövetkező években (a NASA becslése)

További fontos probléma a kapacitás probléma, mellyel az utasok a repülőtéren a felszállások késésekor találkoznak. Ma már a nagy repülőtereken a nagyméretű repülőgépek 20–40 percet is várakoznak működő hajtóművekkel a felszállópálya előtt. Ugyanakkor a légtér is telített és a kapacitás probléma miatt pl. az európai légiutakon a repülőgépek az optimálisnál mintegy 7–8 %-kal hosszabb utakon repülnek, többlet üzemanyagfelhasználást és késéseket felhalmozva. (Ennek környezetszennyezési aspektusait ld. 2.fejezet!)

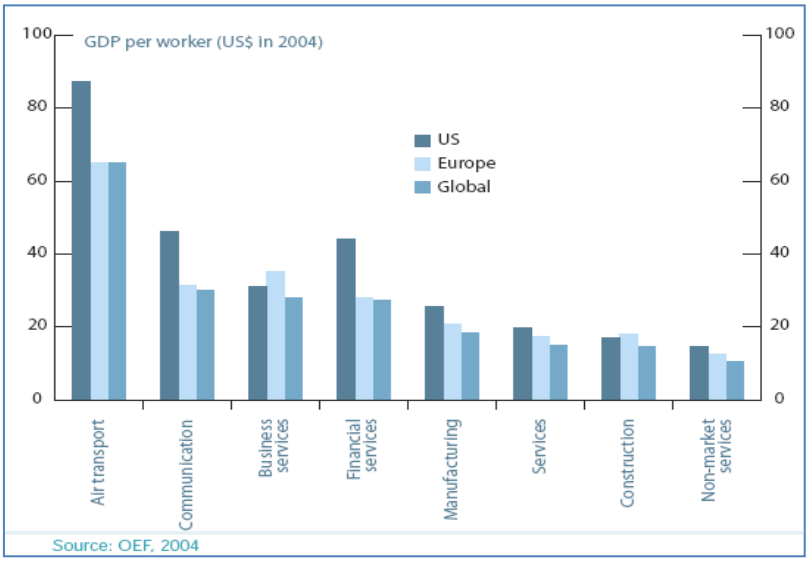
GAZDASÁGI SZERVEZETI PROBLÉMÁK

A technológiai problémák mellett a légi közlekedés egy sor gazdasági és szervezési, szervezeti problémával, sajátossággal is küzd. Egyfelől a légiközlekedés 35 millió menetrend szerinti repülés során 3.8 milliárd utast szállított 2016-ban [13]. Ezzel 9,9 millió közvetlen és összesen 63 millió munkahelyt tartott fenn.

A légi teherszállítás volumene csak 0,5% a globális szállítási teljesítményből, de az értékét tekintve ez 34,6% (!) repülőgéppel jellemzően a nagyobb ár/tömeg arányú árut érdemes szállítani, mivel a költségek jellemzően 4–5-ször magasabbak a közúti és 12–16-szor nagyobbak, mint a tengeri szállításé [13].

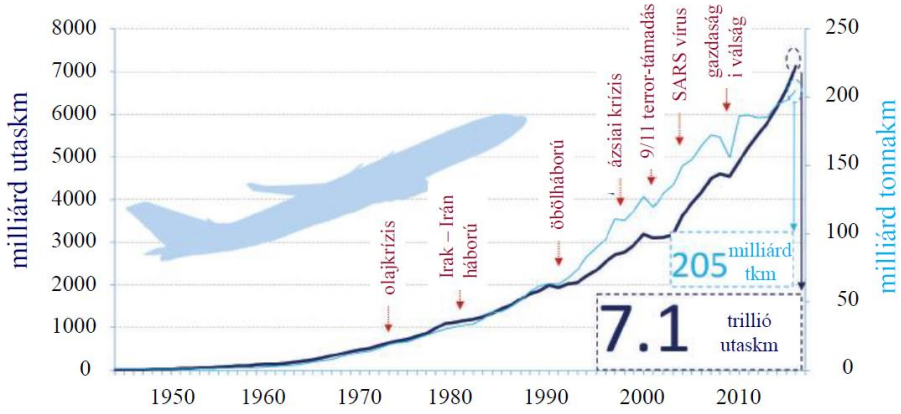
A repülés a közlekedés által kibocsátott CO_2 12%-áért felel, szemben a közúti közlekedés 74%-ával, és ez globálisan 2%-nak felel meg. Egy igaz, a repülés a CO_2 kibocsátásának 80%-a 1500 m felett kerül a levegőben, ahol csak a repülés „szennyez".

A [14] kimutatása szerint egyébként a légiközlekedés a legtőkeintenzívebb ágazat (5. ábra), mivel a tudomány és a technológia legújabb eredményeit használja, gyorsan alkalmazkodik a változásokhoz és az itt foglalkoztatott munkaerő rendkívül képzett.



5. ábra Az egyes gazdasági ágazatok egy főre jutó GDP termelése [14]

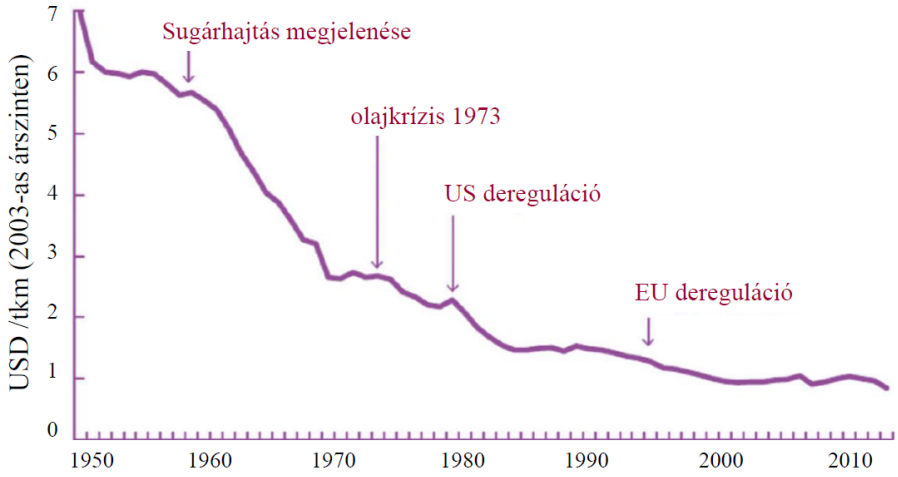
A légi közlekedés alapvető sajátossága, hogy a rendkívül gyors fejlődése. Az első géprepülés (Wright testvérek 1903) óta a repülőgépek sebesség több tízszeresére, a felszálló tömege több, mint 1000 – szeresére nőtt. A fejlődés egyfelől – minden akadályozó tényező ellenére – töretlen (6. ábra), miközben az átlagos szállítási költség folyamatosan csökken (7. ábra).



6. ábra A légiközlekedés teljesítményélnek folyamatos növekedése [13]

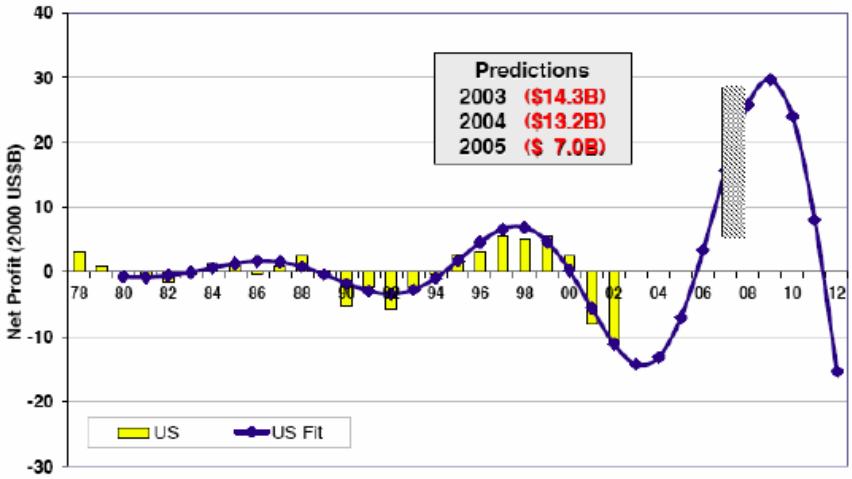
A légiközlekedés volumene a GDP növekedésével változik. Általában elmondható, hogy a GDP 1%-os növekedése a légi utasszállításban mintegy 2%-os, a teherszállításban pedig majd 3%-

os növekedést generál. Számszerűen ez azt jelenti, hogy a GDP az 1962 évi szinthez képest 400%-ot nőtt 40 év alatt, ugyanezen idő alatt a légi utasszállítás pedig 1400%-kal, a légi teherszállítás pedig 4300%-ot emelkedett [14].



7. ábra A légi szállítás költségének folyamatos csökkenése az utóbbi 70 évben [13]

Egyes területeken a légiközlekedés azonban jelentősen eltér a többi gazdasági szektor működésétől. Az egyik legjelentősebb sajátosságot az MIT mutatta ki. (8. ábra). Azt észlelték, hogy a légitársaságok profit termelése ciklikusan, egyre nagyobb amplitúdóval változik [15], míg a légiközlekedéshez kapcsolódó többi vállalkozás (repülőgép-gyártás, karbantartás, légi szállítmányozás, repülőterek) gazdaságosan működik, működhet.

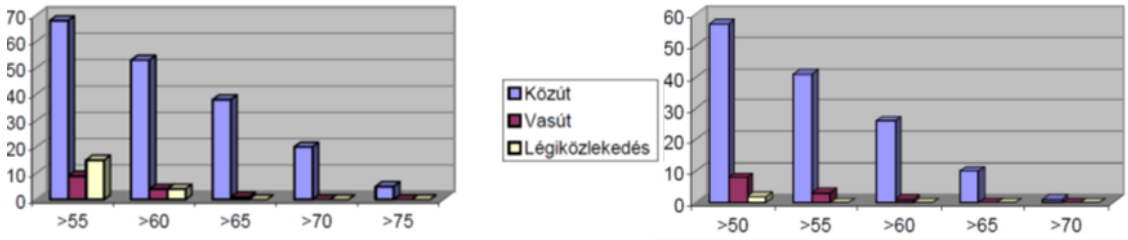


8. ábra Az MIT által felfedezett periodicitás a légiközlekedési vállalatok profittermelő képességében [15]

A profitabilitás hullámzását részben politikai, adózási nyomás, vagy társadalmi elvárás is befolyásolja. Néhány példa erre a furcsa sajátosságra. ha időben vásároljuk meg a repülőjegyet, akkor Brüsszelbe Budapestről olcsóbban elrepülhetünk, mint a Brüsszel Charleori repülőtérről busszal bejutni a városba. Másik jellemző példa: utazás Londonból Párizsba. Amennyiben mintegy két hónappal előre váltjuk meg a jegyet, akkor az Eurostar (vonat) jegy 70 USD alatt lesz (lásd pl. Cheapoair.com (US) portált) és nincs adó. Ezzel szemben a legolcsóbb repülőjegyár 50 USD a Vueling Airlines-nál, melyben nincs adó és bonusszal van számolva. ugyanakkor pl. az EasyJet úgy kínál az Eurostárhoz hasonló árat (annál fél USD-vel alacsonyabbat), hogy abban 19 USD

adó is van. De van jegy 77 USD-ért az Iberiánál, mely már 36 USD adót tartalmaz. Így védik a sokkal nagyobb költséggel kiépített nagysebességű vasútat politikai hátszéllel.

A közhiedelemben egy másik súlyos félreértés is él. Sokan úgy vélik a repülés az igazi környezetszennyező közlekedés. Nos, a valóság ennek pontosan az ellentéte. Egyfelől a repülőgépek üzemanyag-felhasználása és ezzel arányosan a környezetterhelése minden évtizedben 10–15%-kal csökken. A fajlagos energetikai mutató, vagyis az egységnyi szállítási teljesítményre jutó energiafelhasználás szempontjából a repülőgépek nemcsak felveszik a versenyt a többi közlekedési ágazattal, de a közúti és a vasúti közlekedésnél kedvezőbbek is [12]. Egy 300 utas szállítására alkalmas modern repülőgép egy utast egy km távolságra harmadannyi energiát felhasználva visz el, mint a nagysebességű (350 km/h-val száguldó) vonat. A 250 km/h-val haladó gyorsvonat, vagy azt Audi A8 2.5TDI – hez viszonyítva is csak feleannyi energiát használ a repülőgép ugyanolyan szállítási teljesítményre [1][12]. És akkor még nem is számoltunk a nagysebességű pályák építéséhez szükséges óriási beruházási igényekkel. Ráadásul Európában átlagban a villamos energia termelés 50%-a a jelentősen szennyező hőerőművektől származik. A repülőterek környékén élőket zavaró zaj is viszonylag relatív. A 9. ábra szerint a Budapesten élők több mint 50%-kának a lakókörnyezetében még éjjel is a közúti közlekedés által okozott 55 dB-nél nagyobb zaj mérhető [16]. A metróban meg még ennél is rosszabb a helyzet. A „zöldek” persze nem a metró bezárását követelik. Ez nem paradoxon. Ez az un pszichológiai zajhatás. Elfogadjuk, hogy a metrót a zajjal együtt, mivel munkába járva, dolgainkat intézve kénytelenek vagyunk használni. Ugyanakkor a metróból kiérve a felszínre, meghalljuk, hogy valakik most repülnek üdülni. Persze, hogy ez elégé zavaró. A jelenséget az emberek egyéni zajérzékenységét befolyásoló pszichológiai faktorok magyarázzák, melyeket sajátos módszerek, pl. a zaj miatti felébredés alapján [17] lehet figyelembe venni .



9. ábra A budapesti zajterhelés (dB) által érintett lakosság (%-ban) nappal (balra) és éjjel (jobbra)

A 6–8. ábrák együttesen megmutatják, hogy a légiközlekedés nem követi a gazdaság általános gyakorlatát, melyben a piachoz legközelebbi, vagy az azt felügyelő szereplő – legyen az a zöldséges bolt tulajdonosa, vagy egy bank – tesz szert a legnagyobb profitra. Ugyanez magyarázza, hogy miét van ilyen éles verseny és miért buknak el a légiközlekedési vállalatok olyan gyakran.

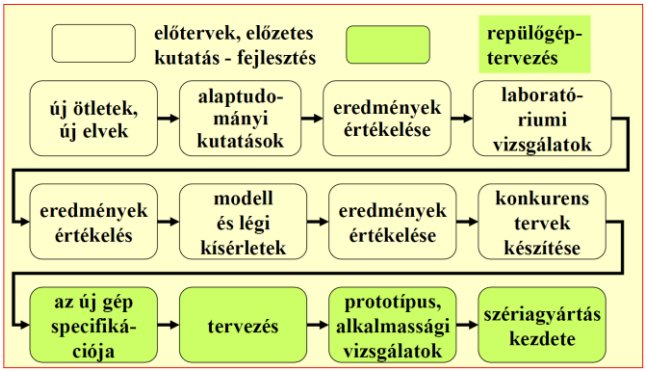
ÚJ TECHNOLÓGIÁK, MEGOLDÁSOK, FEJLESZTÉSI IRÁNYOK

A repülőgépek fejlesztése, a repülés egy új fejlődési ciklusa most kezdődik (1. ábra). Az átmenetet gyors és jelentős változások jellemzik. Közülük néhány – a magyar gazdaság szempontjából is érdekes - néhány fontosabb szemléletbeni és módszertani változást, valamint a jövő repülését befolyásoló új technológiák, megoldások fejlesztését célszerű kiemelni.

Repülőgépek fejlesztési folyamata

A radikálisan új (un. diszruptíve) technológiák és megoldások fejlesztése és alkalmazása egy hosszú, jól szabályozott folyamat, mely négy fontos szakaszra osztható (10. ábra). Az első az ötlet megjelenése és tesztelése. Ezt alaptudományi kutatásnak is nevezni. Általában egyetemi kutatóhelyek és kisvállalkozások jelentkeznek kreatív ötletekkel, melyeket az egyetemeken a „legolcsóbb" ellenőrizni (pl. évfolyam, vagy diplomatervek keretében). Amennyiben az első értékelések azt mutatják, hogy érdemes tovább foglalkozni az új ötlettel, akkor azt – szintén egyetemi környezetben – laboratóriumi vizsgálatokban tesztelik. A fejlesztés harmadik szakaszában – a technológia transzfer kutatóintézetekben – nagyértékű kísérleti eszközök (pl. szélcsatornák, szuperszámítógépek) alkalmazásával és valóságos körülmények közt (kísérleti repülőgépeken) – vizsgálják és felhasználásra előkészítik az új technológiákat, új módszereket, eljárásokat. Végül a felhasználók, azaz a repülőgépgyárak, az új ötletet, eljárást, mint új technológiát betervezik, beépítik az új gépekbe.

Az alkalmazás feltétele, hogy az új ötletet, technológiát, eljárást, illetve a kifejlesztett berendezést, alkatrész, szertifikáltatni (repülési alkalmasságát hatósági engedélyezési folyamatban bizonyítani) kell. A szertifikált termék, technológia egyben mintegy 10-szeres áron értékesíthető.



10. ábra A repülőgép fejlesztési folyamata

A fejlesztés egyes szakaszai általában 4–6 évet igényelnek. Egy új ötlet tehát 20–25 év alatt jut el az alkalmazásig. Mivel az új repülőgépet legalább tíz évig gyártják, majd az utolsót is várhatóan minimum 20 évig tartják üzemben, az új technológiák élete az ötlettől az üzemeltetés végéig 50–60 évre tehető.

A repülőgépek fejlesztési folyamatának (10. ábra) az ismerete kijelöli azt az utat, melyet követni célszerű; azaz először az egyetemi kutató helyet (helyeket) kell fejleszteni (amint azt pl. a csehek tették), illetve a kisvállalkozásokat segíteni a szertifikációs folyamat és követelményrendszer megismerésében (ahogy az, az osztrák Take-off programban megvalósult).

System engineering

A systems engineering, azaz a rendszerek mérnöksége [18] lényegében a modern fejlesztési és a projekt teljes élettartamára kiterjedő menedzsmenti eljárások, eszközök egységes rendszere.

A systems engineering [18] három legfontosabb sajátossága:

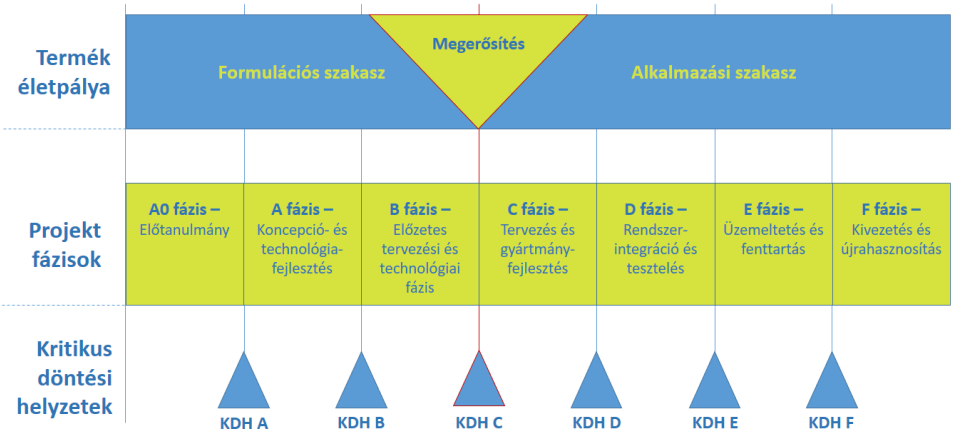
- a termék, a projekt teljes élettartam ciklusára kiterjesztette az egységes, integrált folyamatkezelést (menedzsmentet),
- az életciklust fázisokra bontva (11. ábra) elemzi, vizsgálja és irányítja, és döntési pontokat definiál, valamint

- kiemeli az un kulcsfontosságú döntési helyzeteket, döntéseket.

A projekt (a technológia, termék, vagy szolgáltatás fejlesztését) a systems engineering alapvetően két fő szakaszként értékeli. Az első a projekt megalapozó, un formulációs szakasza, melyben dönteni kell a projekt tartalmáról, megvalósíthatóságáról, a költségekről. A második szakasz a megvalósításról szól, ide értve a tervezést, gyártmány/szolgáltatás fejlesztését, a gyártást, üzemeltetés (használatot, karbantartást, javítást) és az újrahasznosítást is.

A két szakasz közt van a legfontosabb döntési pont, mivel az első szakaszban viszonylag kis költséggel kell számolni, miközben ott kell megalapozni a teljes projekt megvalósíthatóságát és profitabilitását.

Valójában a systems engineering ennél többet is jelent, hiszen módszertant ad arra, hogyan kell a nagy rendszereket részekre bontani, miként oldható meg a rendszerintegrációt stb.



11. ábra A termék, a projekt életpálya fázisai

A tervezési elvek, módszerek

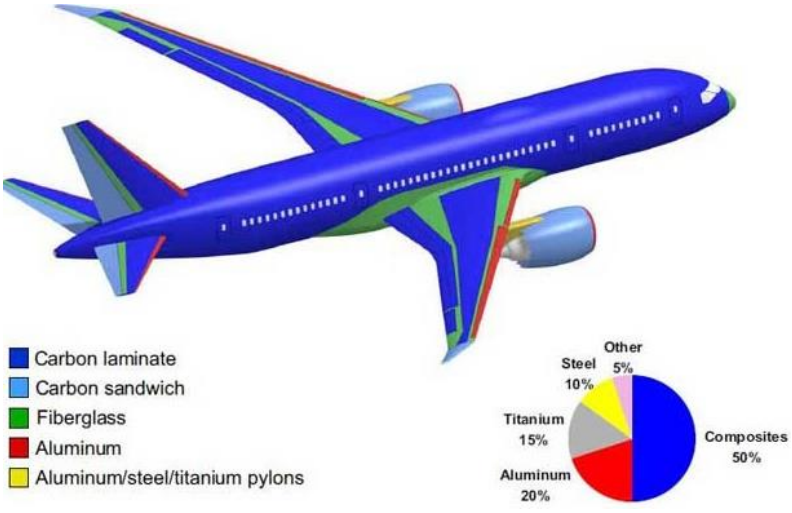
Az informatika robbanásszerű fejlődésének a korában az innováció-központú, tudásalapú információs társadalom és gazdaság legfontosabb, a fejlődést alapvetően behatároló törvényszerűségeit (Moore, Gilder, Metcalfe törvényei, a jólét és a nagy forgalmi dugók íratlan szabályai, Kurzweil gyorsuló visszatérése) Holmes [5] nyomán az [1] ismertette. Ezek az alapvető folyamatok, törvények gyökeresen megváltoztatják a fejlesztési módszereket. Többek közt a klasszikusan mérnöki feladatként definiált tervezésben is egy sor új módszer alkalmazását katalizálja. Így jelennek meg a következő példaként felsorolt és első, rendkívül leegyszerűsített formában meghatározott új eljárások módszerek is.

- koncepcionális tervezés – a koncepció kidolgozása és a termék specifikálása a systems engineering fejlesztési fázisa;
- törésre tervezés – korábban a repülőgépeket törésre, azaz a töréshez vezető terhelésre tervezték;
- repedésterjedési sebességre tervezés – a szerkezeti anyagok kifáradásakor megjelenő repedések terjedési sebességére;
- tervezés károsodástűrésre – a kompozit szerkezetek hasznosítását meggyorsító tervezési eljárás olyan szerkezeteket kialakítására, készítésére, melyek bizonyos károsodások után is egy ideig biztonságosan alkalmazhatók;

- tervezés teljes élettartam ciklusra - a systems engineering elveit követve a termék (itt repülőgép) teljes élettartam ciklusára kiterjed a tervezés, a teljes élettartamra (a tervezéstől a gyártáson, az üzemeltetésen át az újrahasznosításig tartó folyamatra) optimalizálnak;
- konkurens (párhuzamos) tervezés – mikor a tervezés, gyártás idejét az ötlettől a piacra jutásig terjedő időt csökkentik párhuzamosan végrehajtott tervezés, gyártmányfejlesztés és gyártás végrehajtásával;
- multifizikai tervezés – egyszerre több fizikai (pl. áramlástani, hőtani) alaptörvény alkalmazva hajtják végre a tervezést;
- multidiszciplináris tervezés – egyszerre több tudományág elveit használják a tervezéskor a szerkezet, a gyártmány és működés optimalizálásakor;
- evolúciós tervezés – az evolúció elvét követve folyamatosan módosítva, keresik az optimálisabb megoldást, ide értve a piaci igények felmérése alapján meghatározott fejlesztési irányt is;
- genetikus tervezés – genetikus algoritmusokat alkalmazó tervezés;
- revolúciós tervezés – amikor a tervező a piaci igényeknél előbbre „lát" és forradalmian új terméket tervez;
- ökotervezés – minimális környezetterhelés biztosítása a termék teljes élettartam ciklusára optimalizált termék;
- stb.

A Műegyetem Vasúri Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék dolgozói a tervezési, fejlesztési filozófiától [19], a forradalmian ötletek alkalmazásától [20] a módszertan fejlesztésen [21][22] termék és alkatrész tervezésén, optimálásán [23][24] át a fejlesztések menedzseléséig [25][26] a tervezés - fejlesztések minden fázisában részt vesznek.

Anyagtudomány fejlődése



12. ábra Szerkezeti anyagok a Boeing 787-ben

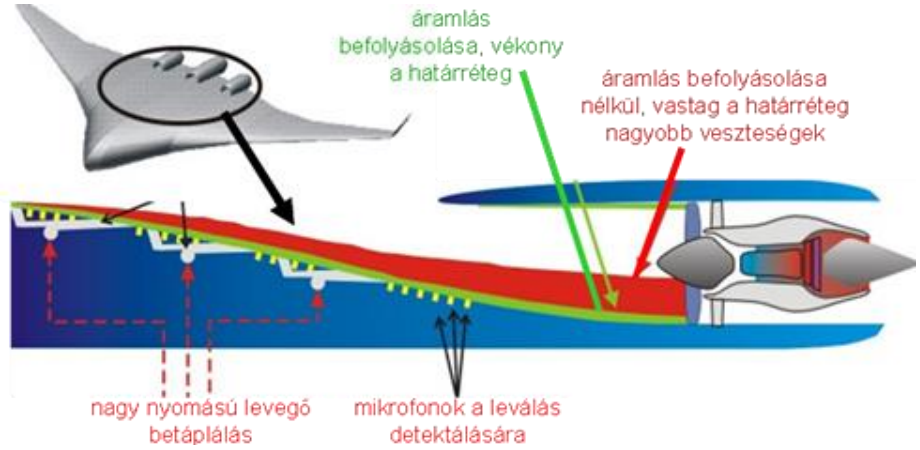
Az emberek többsége az anyagtudomány látványos fejlődéséről elég sok ismerettel rendelkezik. Legalábbis úgy vélik. Ezt részben magyarázza, kompozit anyagok gyors terjedése. Valójában ezek megjelenésekor kiderült, hogy a gyártásuk nem eléggé biztonságos, a meghibásodások diagnosztizálása nehéz. Nem is engedélyezték, hogy repülőgép teherviselő elemei kompozit anyagokból készüljenek. Amikor ezen sikerült javítani, akkor az alumínium lítium ötvözetek

megjelenése hátráltatta terjedésüket. Ma már persze a sok teljesen kompozit kisrepülőgép van, sőt napjainkra a nagy utasszállítók is nagyobb részt ilyen anyagokból készülnek (12. ábra).

A modern kompozit anyagok persze nemcsak szimplán károsodástűrőek, de a rétegrendek tervezésének, a szálirányok variálásának, az öngyógyító (auto health) technológiának és a többi új megoldásnak köszönhetően megbízhatóak és könnyűek is.

Mikro technológia alkalmazása

A mikro-elektro-mechanikai rendszerek (MEMS) technológia forradalmian új lehetőségeket és távlatokat nyit a mikroérzékelők és beavatkozók, beágyazott rendszerek alkalmazásával. Lehetővé válik a repülőgép környezetében és belsejében az áramlások befolyásolására (13. ábra).



13. ábra Csupaszárny repülőgép hajtómű – sárkányszerkezet integrálása és határréteg vezérlés

Az új MEMS útja az ötlettől a piaci bevezetésig általában 15–20 év. Ez egyben azt is jelenti, hogy a termék árában jelentős hányadot 40–60%-ot is kitesz a tudás. Ezért ez egy igazi tudásalapú technológia és termék. Ez az amihez a magyar kreativitás jól használható.

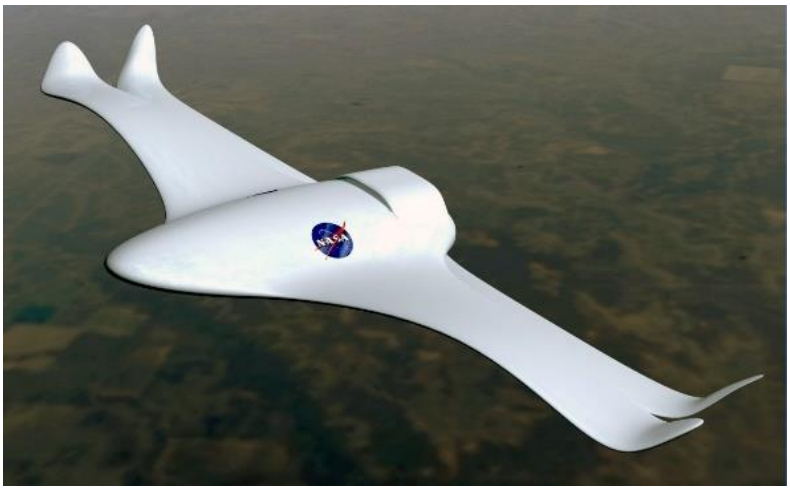
Szoftverfejlesztés

A mai repülőgépek árában több mint 50%-át a szükséges szoftverek fejlesztése alkalmazása generálja, amit az info-kommunikációs rendszerek forradalma katalizál. A szoftverek a repülés és a légijármű üzemeltetés minden területen, – a tervezéstől, gyártmányfejlesztéstől kezdve a tesztelésen, minősítő légivizsgálatokon, az üzemeltetés irányításán át – megjelenik [1]. Jelenleg, talán a legfontosabb hatásokat a légiforgalom menedzsmentje terén érik el. Nem egyszerűen a légtérellenőrzés minőségét javító megoldásokról, a konfliktus detektálás és elkerülésről van szó. Ide tartozik a digitális adatkapcsolat, vagy az összes repülőgép egy infó-kommunikációs rendszerbe integrálása [27], amint azt Amerikában két erre a célra használt műhold segítségével valósítanak meg.

A szoftverfejlesztés, irányítás (kontrol) terén a SZTAKI nemzetközi szinten is az elsők közt van. A HungaroControl pedig Európában az egyik legfejlettebb rendszereket üzemelteti, nagyszerű, önálló szimulációs és kutatás-fejlesztési bázissal rendelkezik és bátran kezdeményez, pl. a szabad útvonalválasztás [28] bevezetésével (Európában elsőként) és a remote tower [29][30] fejlesztésével. A BME (vasúti Járművek, repülőgépek és Hajók Tanszéke) is aktív új megoldások keresésében, új szoftver és új számítási módszereke, eljárások fejlesztésében, alkalmazásában [31][32]. Ezeket a területeket tudományos eredményei miatt is célszerű lenne jobban támogatni.

Bionika

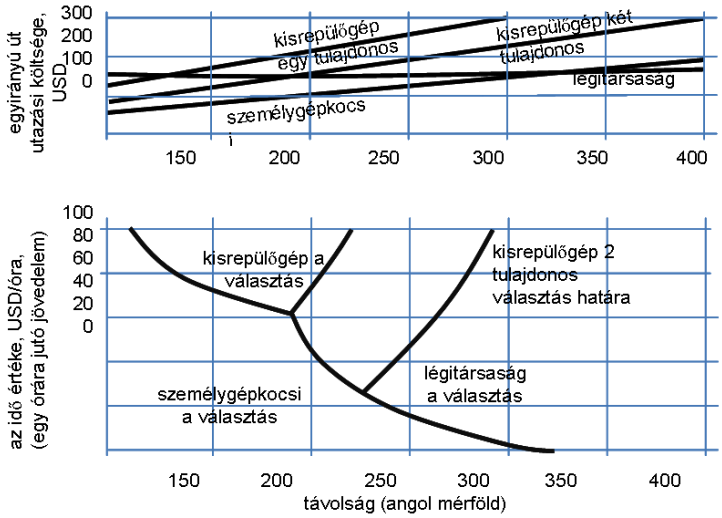
A szakirodalomban gyakran biomimikri, biomimetika, vagy biomimézis néven is szereplő új területe, mely a természetben megtalálható biológiai megoldásokat alkalmazza a mérnöki szerkezetekben (14. ábra). Ismertebb megoldása pl. a látás utáni irányítás, vagy a biológiai alapokra épülő kormányzás. Ide tartoznak olyan szerkezeti megoldások, mint a fejlett adaptációra alkalmas szerkezetek, a morphing, vagyis alakváltoztató technológia. talán a leismertebb alkalmazás a formáció repülés [33], amikor a madarak vonulásához hasonlóan a repülőgépek olyan alakzatban repülnek, hogy az előbbre lévő gépekről leváló áramlás (örvények) segítse a következő gépeket. Másik fontos alkalmazási terület a biológiai elvekre épülő irányítás [34][35].



14. ábra A NASA által közzétett rajz a morphing (alakváltozó) repülőgépről [47]

A Műegyetemen egy, a Szegedi Tudományegyetemmel és a Neumann János Egyetemmel közös, diszruptíve technológiák fejlesztésével foglalkozó EFOP projekt keretében olyan hibrid propulziós teherszállító ember nélküli repülőgép koncepcionális terveit készítik, mely alkalmazza a bionika elveit.

Személyrepülőgépek



15. ábra A személyes kisrepülés választása a távolság és a jövedelmi viszonyok függvényében

A szakemberek többsége egyetért abban, hogy a jövő repülésében a kisrepülőgépek szerepe, a személygépjármű forgalomhoz hasonló jellegű személyrepülés jelentősége drasztikusan nőni fog. Ezért a NASA pl. több megaprojektet is indított. Közülük a NASA SATS (Small Aircraft Transportation Systems) – aza európai repüléstudományi kutatásfejlesztési költségekhez képest – hatalmas támogatással foglalkozott a repülőgépek a repülési környezet fejlesztésével [36][37], ide értve még a rendszer gazdasági megalapozását, a rent a plane rendszer és a gépvásárlás finanszírozását is.

A fejlesztések egyik sajátos eredménye [38][39] megmutatta, hogy a személyrepülés már tényleg itt van, hiszen sokak számára elérhető (15. ábra), mind az egyirányú utazás költségét, mind a jövedelmi viszonyok (egy órára jutó jövedelem) alapján.

A magyar kisgépes repülés, főleg a könnyű repülőgépek fejlesztése – még nemzetközi szinten is – jelen van, fontos eredményekkel büszkélkedhet. A kisrepülőgépek fejlesztésével magyar kutatók már féltucat nemzetközi, EU által támogatott, projektben is részt vettek (lásd pl. [22][26][40][41][42]). Ez egyik potenciális kitörési lehetősége a magyar megújuló repülőiparnak. Igaz ennek feltétele, egy jelentős minőségi ugrás. A csehek pl. úgy támogatták a repülőgépfejlesztőket, hogy kötelezően összekötötték őket az egyetemi kutatóhely fejlesztéssel. Ennek eredménye, hogy a cseh repülőipar már nemcsak benne van a Clean Sky 2 megaprojektben [43], de vezető szerepet is játszik a kisrepülőgép demonstrációs programban (16. ábra).

16. ábra Az Evektor E55 repülőgépe, melyet a Clean Sky 2 is alkalmaznak [48]

Robotizáció

A mai társadalom egyik fontos eredménye és jelentős problémája a gyors robotizáció, mely elérte a repülőgépek gyártását is. A Boeing a 777 gyártásában alkalmazott KUKA robotokkal a törzs szegecselése mintegy 60 ezerszer gyorsabban hajtható végre (16. ábra). A hagyományos (pl. személyautókat készítő) gyártósorokkal szemben a repülőgép törzsek, szárnyak méretei és a termelési darabszám, nem indokolja, nem teszi hatékonnyá a gyártósorok alkalmazását. A jövő pedig most kezdődik amikor definiálják, hogy olyan robotokra van szükség, melyek önjáró módon 20–30 m-es körzetben mozognak és a szükséges helyeken 1 mm-es pontossággal hajtják végre a feladataikat [45].

17. ábra KUKA robotok alkalmazása a Boeing 777 törzs szegecselésében [44]

A hatóság szerepének változása

Utolsó példaként célszerűnek tűnik a hatóság szerepének a változásáról, vagy problémájáról megemlékezni. A hatóságok (ide értve az ICAO – International Civil Aviation Organization, az európai EASA – European Aviation Safety Agency, vagy éppen az FAA - Federal Aviation Administration szabályozó tevékenységeit) általában követő jelleggel alkotják meg a javaslataikat, kötelező előírásaikat. Megfigyelhető, hogy nehézkesen kezelik a gyors változásokat. Az EASA pl. „nem kedveli" a kisrepülőgépeket, azok repülésének a szabályozását. A drónokkal is minden hatóság bajban van, alkalmazásuk sokkal gyorsabban halad, mint ahogy azt a hatóságok „követni képesek". A szakemberek jól ismerik, hogy az FAA először igyekezett tiltani a drónok civil alkalmazását, majd a nagy társaságok (mint pl. az Amazon) nyomására visszavonult és ma talán a kelleténél megengedőbb a szabályozásban. Nem véletlen, hogy az informatikai cégek (pl. a Telekom, a Nokia) komolyan gondolják, hogy megoldásaikkal segíteni tudják a légiforgalom biztonságos szabályozását [46].

JAVASLATOK

A korábbi, repülőipari stratégiák fejlesztésével foglalkozó cikkeink [1][2] részletesen foglalkoztak a saját és a környező államok repülőipari fejlesztési stratégiáival. A gyorsan fejlődő és a környező államok gyakorlatát a [2] alapján röviden összefoglalva a következő eljárásokat lehet kiemelni:

- Dél-Korea - a technológia transzfer kiváló alkalmazásával indult, ma már saját jelentős ipari tevékenysége és eredményei vannak.
- Indonézia – következetes fejlesztést indított meg egy jól kidolgozott stratégia és roadmap alapján, mely a saját kompetenciáik következetes fejlesztésére épült.
- Ausztria – Take-off program keretében egyfelől a kisvállatokat felkészítette a szertifikálási folyamat értelmezésére és annak figyelembevételére már a fejlesztések kezdetekor és kormányzati szinten törekedett a beszállítói, együttműködési kapcsolatok kialakítására az európai repülőiparral.

- Csehország – tudományos alapokat fejlesztett, azokat kapcsolata az iparhoz és következetesen segítette új, magasabb szintű megoldásokat alkalmazó, jobb repülési tulajdonságokat mutató gépek fejlesztésére, rendkívüli figyelmet fordított a nemzetközi kapcsolatok fejlesztésére.
- Románia – a tudományos intézményeit igyekezett jobban bekapcsolni a nemzetközi kutatás-fejlesztéséi rendszerbe.
- Lengyelország – külföldi együttműködések és a hazai fejlesztések összekapcsolásával újította meg a repülőiparát.

Magyarországnak nem szabad lemaradni a repülőiparban, nem szabad elvágni a csúcstechnológiai forráshoz való hozzáférést.
A repülőipari fejlesztési stratégiát a következő egyszerű elvek és módszerek alkalmazásával lehetne viszonylag gyorsan (10–15 év alatt) bekapcsolni, integrálni az európai repülőiparba.

A legfontosabb, a mostani szétforgácsolt támogatási rendszert egységes céllal egy rendszerbe foglalni, továbbá csatlakozni az európai repülőiparhoz és annak integráns részévé válni.

E cél elérését 4 ütemben célszerű megvalósítani.

- **I ütem: a rendelkezésre álló alapok, kompetenciák elemzése, stratégiai terv készítése**. Fontos lenne, hogy a kompetenciák meghatározásakor ne a globális vállalatok igényeit elégítsük ki, hanem a valós hazai tudást és képességeket térképezzük fel. Két javaslat. A képességekkel rendelkezőket meg kell tanítani arra, hogy helyén kezeljék a képességeiket és a repüléstudományok, fejlesztések terében el tudják helyezni a tudásukat, lehetőségeiket. (Másképp fogalmazva nem azt kell támogatni azt, aki globális vállalttal, vagy szervezettel együttműködve egy kis részfeladatot ellátva bedolgozó tevékenységet lát el, vagy a nagyvállat PR tevékenységét támogatva egy jövőbeni új megoldást egy egyszerűbb rendszerben, megoldásban bemutat.) A másik, a képességekkel rendelkezőket fel kell készíteni az eredményeik magasabb szintű alkalmazására, azaz az osztrák Take-off program tapasztalatait alkalmazva széles körben ismertetni kell a szertifikációs eljárásokat.
- **II. ütem: Tudás és kompetencia fejlesztés**. A cseh tapasztalatokat felhasználva minden repülőipari fejlesztést csak akkor célszerű támogatni, ha járulékosan a képességeket, azon belül a tudományos hátteret is fejlesztjük. Talán nem a legbarátságosabban, de pontosabban megfogalmazva ez azt jelenti, hogy a közöségi támogatást, állami pénzt) csak olyan programok, fejlesztések kapjanak, melyek eredményeként az átlagosnál magasabb színvonalú és jobb tulajdonságokkal rendelkező produktumok születnek. Ebben az országban több ezren képesek biztonságosan repülő modellt, robotrepülőgépet készíteni és tucatnyi vállalat tud repülésre alkalmas szerkezetet, repülőeszközt készteni. Ezek nemzetközi szinten akkor lesznek érdekesek és a valós üzleti, piaci értékük akkor jelentkezik, ha a hasonló sok tucat próbálkozásból a termék a színvonalával, a tulajdonságaival kiemelkedik. E nélkül a támogatás csak baráti segítség.

  A magyar sport barátai tudják, hogy a versenysikerekhez hozzátartozik, hogy a nemzetközi szervezetekben is képviseltetni kell magunkat és aktívan kell bekapcsolódni a jövő folyamatinak a tervezésébe, irányításába.

  A II ütem legfontosabb feladatai: (1) szertifikációs képzés, (2) tervezési és tesztelési bázisok fejlesztése, (3) nemzetközi szervezetekben, projektekben a tagság támogatása.

- **III. ütem. Csatlakozás a nemzetközi repülőiparhoz.** A jelenlegi gyakorlati tapasztalatokat és a környező országok gyakorlatát követve négy lehetséges kapcsolódási út létezik:
  - olyan beruházások támogatása, melyben nem egyszerűen bérmunka valósul meg, hanem a technológia transzfer, a fejlesztésekbe való bekapcsolódás prioritást élvez;
  - saját fejlesztések (pl. mikroérzékelők, műszerek, kompozit alkatrészek) felfuttatása és az európai repülőipar részére beszállítói státusz megszerzése;
  - olyan területek művelése, melyben a „nagy játokosok" kevesebb fantáziát látnak (pl. ilyen a karbantartás, a távfelügyeleti diagnosztizálás, stb.);
  - politikai „nyomás" – pl. a Wizz Air nagy megrendelései „feljogosítanak" bennünket, hogy az Airbus-tól több figyelmet kérjünk a saját fejlesztéseink, aktivitásunk értékelésekor.
- **IV. ütem: saját fejlesztésekkel csatlakozás az európai iparhoz**. A következetes fejlesztés, a technológia transzfer, a képességek tudatos támogatása, el fog vezetni a saját terméket megjelenéséhez, melyeket már piaci alapon is érvényesíteni lehet.

ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a tanulmány a korábbi, a repülőipari fejlesztési stratégiákkal foglalkozó cikkek [1][2] folytatásaként, a szerző jelentős szakmai és nemzetközi (eddig 24 nemzetközi, EU által támogatott projektben való részvétel, projektvezetés, illetve egy sor, jelentős nemzetközi szervezetben, konferencia szervezési, tudományos és tanácsadói bizottságokban, tucatnyi fejlesztési stratégia kidolgozásában szerzett) tapasztalatai, alapján, arra szeretné felhívni a figyelmet a repülőiparban most zajló folyamatokra. Jelenleg a repülőipar és a légi közlekedés egy megújulási szakaszát éli, mely idején új szereplőknek - a korábbiakhoz képest - könnyebb bekapcsolódni a nemzetközi kutatás-fejlesztésbe, az európai repülőipari kooperációs munkákba.

A cikk először röviden áttekinti a repülés, és annak szervezeti, gazdasági problémáit. Eztután bemutatja a fejlesztések irányait lehetőségeit. Pontosabban felhívja a figyelmet néhány, a magyar repülőipar és légi közlekedés szempontjából fontos fejlesztési irányra.

A cikk röviden meghatározza a magyar repülőipar fejlesztésével kapcsolatos stratégiai elképzelést, annak ütemezését. Természetesen ezek csak javaslatok. A fejlesztési stratégiákat az érintettek (stakeholder-ek) képviselőiből álló szakmai bizottságnak kell kidolgoznia.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Rohács J. Gondolatok, háttéranyagok a repülés, repülőipar stratégiai szerepéről, Repüléstudományi Közlemények (ISSN 1789-770X), XXVII. évf. 2015, No. 3. p. 19 - 36.

[2] Rohács, J. Repülőipari fejlesztési stratégiák alapjai, sajátosságai, Repüléstudományi Szemelvények (szerk. Békessy, B., Kavas, L.) Nemzeti Közszolgálati Egyetem katonai repülő intézet, ISBN 978-615-5057-70-0, 2016, 9-35

[3] Rohács J. A repüléstudományok második 100 éve (Second Century of the Aeronautical Sciences), „100 éves a motoros repülés – 2003, XIV. Magyar Repüléstudományi Napok" Budapest, CD-ROM, (szerk. Gáti, B., Rohács, J.), GTE, Budapest, 2004. p. 43. o., ISBN 963 214 104 0

[4] National Aeronautics And Space Administration. "NASA Aeronautics Blueprint: Towards a Bold New Era in Aviation." Washington, D.C., 2002, p.

[5] Holmes, B. J. Innovation in air transportation system, National Training Aircraft Symposium, Embry-Riddle Aeronautical University, March, 2009, http://www.docslide.com/innovation-in-air-transportation-systems

[6] Shetty, K. I., Hansman, R. J. Current and historical trends in general aviation in the United States, Report No. ICAT-2012-6, MIT (Massachusetts Institute of technology), International Center for Air Transportation (ICAT), Cambridge, 2012, p. 93.

[7] Viken, S. A., Brooks, F. M., Johnson, S., C. Overview of the Small Aircraft Transportation System Project Four Enabling Operating Capabilities, ", Journal of Aircraft, Vol. 43, No. 6 (2006), pp. 1602-1612.

[8] Harris, W. L. Product and process: a very non-linear relationship in aerospace, Proceedings of the First International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace, (ed. by. Senath Sivasundaram), Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, Florida, USA, 1996, pp. 693 – 717

[9] Shin, J. The NASA Aviation Safety Program: Overview, Nasa, 2000, NASA/TM—2000-209810, http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2000/TM-2000-209810.pdf

[10] white, J. Aviation safety program, NASA, (2009), http://www.docstoc.com/docs/798142/NASA-s-Aviation-Safety-Program

[11] Commercial Aviation Safety Team (CAST), Process Overview, CAST%20Process%20Overview%209-29-03.ppt#2, 2003

[12] Volker Von Tein Status and Trends in Commercial Transport Aircraft, Lecture on the ICAS'98 Conference, ref. number: ICAS-98-0.3, Melburne, 1998.

[13] Aviation Benefits 2017, ICAO, p 68, available at https://www.icao.int/sustainability/Documents/AVIATION-BENEFITS-2017-web.pdf (visited at Nov. 12, 2017)

[14] The Economic Impact Of Air Service Liberalization, InterVISTAS-ga2 Consulting, Inc. Washington, 2006, http://www.intervistas.com/4/reports/2006-06-07_EconomicImpactOfAirServiceLiberalization_FinalReport.pdf

[15] Hansman, R. J. Overview of Recent Trends in the Airline Industry, http://www.nextor.org/Conferences/200406_Industry_Public/2004_06_21_John_Hansman.pdf

[16] Budapest Főváros Stratégiai Zajtérképére Épülő Intézkedési Terv, Budapest, 2008, p. 106.

[17] Rohacs, D., Voskuijl, M., Rohacs, J., 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 (2) 2013, No. 3-4, pp. 161-180.

[18] National Aeronautics And Space Administration (NASA), Systems Engineering Handbook, NASA, SP-610S, 1995

[19] Rohacs, J. Product development philosophy, Proceedings of the International Conference on Innovation Technology in Design, Manufacturing and Production, 14-16 Sept. 2010 Praha, pp. 516 - 520.

[20] Rohacs, D., Rohacs, J. Magnetic levitation assisted aircraft take-off and landing (feasibility study – GABRIEL concept) Progress in Aerospace Sciences 85 (2016), pp. 33-50. doi:10.1016/j.paerosci.2016.06.001

[21] Veress, Á., Felföldi, A., Gausz, T., Palkovics, L. Coupled Problem of the Inverse Design and Constraint Optimization, Applied Mathematics and Computation, 219:(13) pp. 7115-7126. (2013)

[22] Rohacs, J., Veress, A., Jankovics, I., Volescsuk, A., Farkas, CS. Goal oriented aerodynamic design of a new acrobatic aircraft, Research and Education in Aircraft Design, READ 2010 international Conference, Warsaw, Poland, June 28-30, 2010, Proceeding CD. ISSN 1425-2104, 10 p.

[23] Veress, Á., Bicsák, GY., Rohács, D. Pressure Loss and Flow Uniformity Analysis of Baseline and Redesigned Engine Inlet Duct for a Small Turboprop Aircraft, Czech Aerospace Proceedings, 2016 (1) pp. 3-9.

[24] Beneda, K. Development of a modular FADEC for small scale turbojet engine, In: Szakál, A. (ed.) SAMI 2016: IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics. 367 p., New York: IEEE, 2016. pp. 51-56.
[25] Rohacs, J., Voloscsuk, A., Gecse, T., Ovari, GY. Innovation process management for reducing the time to market, Aerospace – The global industry, November 2–4, 2010, Exhibition Centre Frankfurt/Main Germany, Conference Proceedings, AIRTECH GmbH and Co. KG, 2010 ISBN 978-3-942939-00-3 p.21.
[26] Bicsák, Gy., Sziroczák, Dávid., Rohács, D. Changes in Aerospace Development Process Trends In: Rolandas Makaras, Robertas Keršys, Rasa Džiaugienė (ed.) Proceedings of 20th International Scientific Conference Transport Means 2016. pp. 528-535.
[27] Air Traffic Management Revolutionary Concepts That Enable Air Traffic Growth While Cutting Delays, Boeing Air Traffic management, 6/2001
[28] Szepessy, K. HungaroControl Disruptive Technologies in Air Traffic management, 8th European Air Transport regulation "Disruptive technologies in Air Traffic management", 8th Florence Air forum, Oct. 21, 2016, http://fsr.eui.eu/wp-content/uploads/2016_10_21-SZEPESSY-Disruptive-technologies_KSz_en_161021.pdf
[29] Dudás D., Somosi V., Rohács D. A remote tower technológia polgári és katonai alkalmazási lehetőségei, Repüléstudományi Közlemények, XXIX. évf. No. 1, 2017, 205 – 217 o.
[30] Bos, T., Zon, R., Furedi, E., Dudas, D., Rohacs, D. A pilot study into bio-behavioural measurements on air traffic controllers in remote tower operations. H-Workload 2017: The First International Symposium on Human Mental Workload, Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland, June 28-30. doi:10.21427/D7ZH02,
[31] Veress Á, Bicsák Gy, Rohács D, Pressure Loss and Flow Uniformity Analysis of Baseline and Redesigned Engine Inlet Duct for a Small Turboprop Aircraft, Czech Aerospace Proceedings, 2016, (1), pp. 3-9,
[32] Bicsak, Gy. Veress, A. New Adaptation of Actuator Disc Method for Aircraft Propeller CFD Analyses, Acta Technica Hungarica, Vol. 14, No. 6., 2017, pp. 95 - 114
[33] Gu, Y., Campa, G., Seanor, B., Gururajan, S., Napolitano, M. R., Autonomous formation flight - design experiements, chapter 12 in Lam, T. M. (ed.) "Aerial vehicles", In-tech, 2009, pp. 237 - 258
[34] Zsedrovits, T., Bauer, P., Jani Mátyásné Pencz, B., Hiba, A., Gőzse, I., Németh, M., Nagy, Z.,Vanek, B., Zarándy, Á., Bokor, J. Onboard visual sense and avoid system for small aircraft. IEEE Aerospace and Electronic Systems magazine, 31 (9). pp. 18-27. ISSN 0885-8985 10.1109/MAES.2016.150129
[35] Rohacs, J.: Development of the control based on the biological principles, ICAS Congress, Hamburg, 2006 Sept. P. 10. CD-ROM, ICAS, 2006, http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2006/PAPERS/609.PDF
[36] Holmes, B.J., Durhan, M.H., Tarry, S.E. "Small Aircraft Transportation System Concept and Technologies". Journal of Aircraft, Vol. 41, No.1, January-February 2004.
[37] Piwek, K., Wiśniowski, W. Small air transport aircraft entry requirements evoked by FlightPath 2050, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 88, 2016, Issue: 2, pp.341-347, https://doi.org/10.1108/AEAT-02-2015-0065
[38] Downen, T. D., Hansman, R. J. JR. Analysis of Barriers to the Utility of General Aviation Based On A User Survey and Mode Choice Model, Downen and Hansman, MIT-ICAT, Report # 2002-1,
[39] Moore, M.D. Personal Air Vehicles: a Rural/Regional and Intra-Urban on-Demand Transportation System". Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), no. 2003-2646, 2003.
[40] Rohacs, J. Safety aspects of the personal air transportation system, 27th International Congress of the Aeronautical sciences, ICAS (International council of the Aeronautical Sciences), 19 - 24 September 2010, Nice, France, ICAS 2010 CD-ROM Proceedings, ISBN 978-0-9565333-0-2, paper No. ICAS2010-10.7.5. pp. 12 http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2010/PAPERS/527.PDF
[41] Rohacs, J., Rohacs, D., Jankovics, I. Safety Aspects and System Improvements for Personal Air Transportation System „Research and Education in Aircraft Design (READ) 2010" International Conference. Warsaw, Poland, 28/06/2010-30/06/2010. Paper CD-ROM. 22 p.
[42] Rohacs, D. A Preliminary Emission Model to Analyze the Impact of Various Personal Aircraft Configurations on the Environment, Journal of Airspace Operations (2) 2013, pp. 135-144, IOS Press, The Netherlands 2211-002X (Print), 2211-0038 (Online)), DOI, 10.3233/AOP-140040), 2013
[43] Clean Sky 2 project, http://www.cleansky.eu/
[44] Waurzyniak, P. Aerospace Automation Stretches Beyond Drilling and Filling. Manufacturing Engineering. http://www.sme.org/aerospace-automation-stretches-beyond-drilling-and-filling/?taxid=3440
[45] Valeri - Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications projekt, http://www.valeri-project.eu/

[46] Finger, M., Bert, N., Kupfer, D. (ed.) 8th European Air Transport regulation "Disruptive technologies in Air Traffic management" Summary of presentation, 8th Florence Air forum, Oct. 21, 2016, p. 28, http://fsr.eui.eu/wp-content/uploads/162310-Air-Forum-Summary.pdf
[47] https://www.dfrc.nasa.gov/Gallery/Photo/Morph/Medium/ED01-0348-1.jpg
[48] https://en.wikipedia.org/wiki/Evektor_EV-55_Outback

IMPACT OF AIR TRANSPORT AND AERONAUTICAL INDUSTRY ON THE ECONOMY

The air transport and the aeronautical industry are the knowledge based high sectors of economy. Because their well-organised structure, they have largest added values pro employees. It is not sudden; all the well-developed countries are active in these economic sectors. This paper calls the attention on the strategic developments of the economy cannot avoid the air transport and the aeronautical industry developments. The aeronautics just has reached the end of the second „S" – curve of its development. The transition period is characterised by changes in technologies and structures. In such cases, more easy to connect, to the major processes, to the concentrating market leaders. This paper tries to analyse the possible integration of the new developing countries into the international cooperation of the aeronautical industry. At first, the paper introduces the major, technical, economic and structural problems of the air transport and aeronautical industry. At second, it analyses the interconnection of the economy and aeronautics. It underlines the important interactions defining the strategic developments and shortly defines the most important conclusions that mays support the strategic development of the aeronautical industry in developing country like Hungary.

Keywords: *air transport, aeronautical industry, strategic development plans*

Dr. Rohács József (PhD) egyetemi tanár Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vasúti Járművek Repülőgépek és Hajók Tanszék jrohacs@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-4607-9063	Dr. Jozsef Rohacs (PhD) professor Budapest University of Technology and Economics Department of Aeronautics Naval Architecture and Railway Vehicles jrohacs@vrht.bme.hu orcid.org/0000-0002-4607-9063

A cikkrészben kapcsolódik az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 „Diszruptív technológiák kutatás-fejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe" projekthez

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-19-0481_Rohacs_Jozsef.pdf

Estók Sándor

A HÁLÓZATI RENDSZERLOGISZTIKA INTERAKTÍV VIRTUÁLIS INTEGRÁCIÓJA

Elkezdődött a modern logisztikai korszak, amely még nem közismert a gazdaság szereplői számára. Ezt az időszakot az infokommunikációs hálózatközpontú rendszerlogisztika neve és képessége fémjelez. A fénysebességgel halad az infokommunikáció fejlődése, amely megköveteli a tudományosan szervezett hálózati rendszerek interdiszciplináris kialakítását, minőségének javítását. Új korszak körvonala rajzolódik ki és alakulóban van a jövő gazdaságának és társadalmának tudásalapú, hálózatközpontú, virtuális, interaktív, okos rendszerlogisztika felépítménye és működtetése teljes vertikumban. A korszakváltás lépteit hallani a hálózati gazdaságnak, a rendszerlogisztikának [11] és kapcsolódásuk a hálózatok új tudományához [12]. Az együttműködő kapcsolat az évek során partneri kapcsolattá fejlődhet.

***Kulcsszavak**: Rendszerlogisztika, interdiszciplináris, infokommunikáció, korszakváltás, hálózati gazdaság*

A MODERN KORI LOGISZTIKATUDOMÁNY DIMENZIÓ VÁLTÁSA

A logisztikatudomány modern kori fejlődésén elgondolkodva számtalan esemény, emlékkép villan át a gondolatok sokaságában. Visszatekintve a múlt századra, nehéz megállapítani hol alakult ki ennek a tudománynak a bölcsője. Hogyan igazolható, hol van az a neves esemény, ahonnan számíthatjuk a modern logisztika kezdetét. Másik fontos ismérv, ki volt az a kutató, akinek a tevékenysége meghatározta a modern logisztika fejlődésének menetét.

M. E. Porter szemlélete és gondolkodása a 1980-as években felrázta Amerikát, a közgazdasági környezet megmerevedve állt az új lehetőségek előtt [4]. A cégek jelentőségét és a benne rejlő lehetőségeket tárta fel elsőként. Képes volt látni az új közgazdasági dimenziókat. Zsenialitása nagy lehetőséget nyitott a vállalkozások előtt, a versenystratégiai cél elérését és a nyereség megszerzését tűzte ki célul. A vállalatok irányítói és vezető közgazdászai pozícionálták cégjeiket és önmagukat is. Új küldetéssel álltak elő, ahol a stratégia és a verseny már része volt a vállalati céloknak. Világra szóló, gazdaságot formáló közgazdasági szemlélettel alakult ki a ***gazdálkodástudomány***. Az új szemléletet, gondolkodást és az újfajta világlátást közismertségre tett szert számos országban. M. E. Porter a ***versenystratégia*** [4] elméletére építette fel stratégiáját, amelyet új irányzatként fogadtak el Európában [3]. Viszont Amerikában sok vitát keltett és nem ismerték el újító gondolatait [3][4].

M. E. Porter közgazdász kitárta a modern logisztikatudomány fejlődésének kapuját:

- megfogalmazta a versenystratégia értelmezését az iparágban végbemenő verseny mozgató erejének megismerését;
- kialakította a verseny koncepcióját és annak felépítését és lépéseit;
- új irányt adott a közgazdasági gondolkodásnak;
- stratégia tervezését megfogalmazta és a vállalatok alapvető eszközként fogadták el;
- értékláncával egy új minőséget és szemléletet alkotott;
- értékalapokra helyezte a termék (produktum) áramlási folyamatokat;
- az értékteremtő folyamatokat értékviszonyítással értelmezhetővé tette;

- rendezte az értékláncban levő információ áramlást és azok kapcsolatait;
- a stratégia alkotást közgazdasági elvekkel kapcsolta össze;
- a stratégia vállalati gyakorlati megvalósítássá fejlődött;
- a gazdálkodástudomány fegyelmezettebb tudománnyá válását elősegítette;
- az ellátási láncban is szemlélti változást hozott – költségcsökkentés, optimalizálás, később a menedzsment kialakítását.

MAGYAR LOGISZKA KUTATÓK HATÁSA A KIALAKULÓ LOGISZTIKATUDOMÁNYRA

XX. század utolsó két évtizede nagy hatást gyakorolt Magyarországra is. Kihívások elé állította a kibontakozó ***modern logisztikatudomány képviselőit***. A 80–90-es évek időszakában hazánkban két kiemelkedő képességekkel rendelkező közgazdász kutató folytatta a logisztika alapító tevékenységét. A nevezettek Dr. Knoll Imre és Dr. Chikán Attila, egymástól függetlenül végezték alkotó és alkalmazó kutatásaikat. Knoll Imre aktívan bekapcsolódott a magyar és az európai közéletbe, alapító tagja volt az Európai Logisztikai Szövetségnek (1984). Még abban az évben Magyarországon a Magyar Logisztikai Egyesület alapító elnöke. A cégbejegyzés után közvetlenül átfogó projekteket indított a magyar gazdasági ágazatokban. 1992-ben Gödöllőn megalapította elsőként Magyarországon a Gödöllői Agrártudományi Egyetem, Logisztikai Tanszékét. 1999-ben megjelent első kötete – *Logisztika a 21. században – Profitnövekedés logisztikai eszközökkel* című könyvében, ahol elgondolást és jövőképet alkotott.

„*A logisztika filozófiájának klasszikus definíciója szerint,* – Knoll megfogalmazása alapján – *olyan gondolkodásmód és ebből fakadó tevékenység, mely ellátási és szolgáltatási folyamatok egymáshoz kapcsolódó részrendszereit átfogó tudományos szemlélettel szintetizálja*" [5].

A gondolkodásmód több oldalról megvilágított filozófiából indul és eljut a 21. század logisztikájának új definíciójáig, amelyet következőképp fogalmazott meg:

„A logisztika összefüggő gazdasági és társadalmi folyamatok átfogó, egyben integrált kezelésének tudománya. Célja a mikró-, és makro környezet hatásvizsgálataira folyamatosan támaszkodva, a lehetséges maximális gazdasági és társadalmi eredmény elérése." [6]

Az alkalmazói megközelítésben a jövő erejét látta, amelyet a fejlődésben dinamikusnak feltételez. Kutatásaira alapozottan a folyamatosság elvét hangsúlyozta.

Gondolkodása az *értékláncról, az ellátási láncról és az értékteremtő folyamatokról* a vizsgálatát elméletben és gyakorlatban is értelmezi. A *termelésben és a szolgáltatásban* a társadalmi, folyamatokat több tudomány keretei között és azok hatásrendszereivel vizsgálta.

A *logisztikát, a marketinget, az informatikát* közös gondolkodással és együttes alkalmazással értelmezi. Az *ellátási láncban a közreműködésüket* elsődlegesnek tartja, *az együttműködésben az interdiszciplináris hatások érvényesítését csak egységben, és annak széleskörű alkalmazásában tartja hatékonynak.* A *logisztikai közreműködés* alapelemének a működőképes *ellátási láncot tartja.* Ezek az irányzatának alapértékei, amelyek a *Knoll-logisztika* jövő értékeit alkotják.

Knoll Imre személyében a logisztikatudomány nagy ikonikus alakja, sokat tevő elkötelezett mérnök, közgazdász és MTA doktor távozott el körünkből 2016 szeptemberében.

A XX. század vége két utolsó évtizedében Amerikában már zajlott az *iparági értéklánc* átalakítása. *M. E. Porter, értéklánca* alapjai már ismertté váltak. Chikán A. *értékteremtő folyamatok* [7] elemzésének és összefüggéseinek részletes feltárását végezte. Eredménye egy új minőség megismeréséhez vezetett. Először az értékteremtő folyamatok, majd a *vállalati értéklánc* és az ellátási lánc kimunkálásán keresztül folytatódott [4][7].

Munkája elsődlegesen a *vállalaton belül zajló tevékenységekre terjedt ki*. Az értékteremtés a vállalat keretein belüli elsődleges tevékenység révén a fogyasztói igények kielégítésére fókuszált, szem előtt tartva a stratégiában a célul kitűzött nyereség elérését.

Az *érték, mint sikertényező* minősíti az elvégzett munkát, de nem hagyja figyelmen kívül az emberi szükségletek kielégítését. Chikán A. feltárta az *értékteremtés hármas tartalmát*, a termék előállítás folyamatrendszerét, kétirányú információ-áramlását a folyamatokban, ismertette az értékáramlás megvalósulását [8].

Az termelő folyamatokban fontos szerepet kap a *gazdaságosság* – mit képes előállítani kedvező ráfordítással, másrészről *a hatékonyság* – hogyan teszi munkáját a vállalat. Kiemelkedően fontos a cégek képessége – amely megmutatja az értéktermeléshez rendelkezik-e a szükséges feltételekkel – ***Core competences*** - ezt lényegi képességeknek nevezi. A fentiek alapján az üzleti tevékenység hatékonysága rajzolódik ki.

Chikán A. kutatásai vállalati környezetben a legapróbb részletekre is kitér. A prioritások között szerepel a termelés, a szolgáltatás és a logisztika. Ezzel a gondolkodással ad a jövőnek új keretet és új irányt, amelynek alappillére a ***termelői értéklánc*** és az ellátási lánc. A ***vállalat-gazdaságtan*** [9] könyve szerint a végbemenő folyamatokat vizsgálja, új eredményeket tesz közzé, és új definíciókat fogalmaz meg. Komplex összefüggéseiben látja a cégek működésre ható társadalmi és gazdasági tényezőket, így a társadalmi felelősség kérdését, a globalizációt, vagy a tudás szerepének növekedését. Nemzeti és nemzetközi gazdasági téren is elismerés övezi munkáját, úgy az elméleti, mint gyakorlati környezetben. Több évtizedes munkájával ***a logisztikai értéklánc, ellátási lánc, értékteremtés magyar iskolájának ő az egyetlen életben levő kiemelkedő ikonja,*** aki Chikán féle irányzattal***,*** *iskolával* gazdagította és gazdagítja ma is a ***magyar és nemzetközi logisztikatudományt.***

A XX. század vége új lehetőségekkel, kihívásokkal kápráztatta el abban a korban élő tudósokat, akik megoldást kerestek a gazdasági térben zajló eseményekre. Igyekeztek választ adni az akkor ismeretlen folyamatokra. A kutatók a század vége kihívásait keretek közé szorítva mértékadóan definiálták az elméletben és gyakorlatban felmerülő kérdéseket. Tették ezt a közgazdaságtan tudományra alapozva. A kilencvenes évek végén a fentiek elvezettek oda, hogy egy új tudomány születhetett, – ez a ***Logisztikatudomány.***

A XXI. SZÁZAD LENDÜLETET ADOTT AZ ALKALMAZÓ LOGISZTIKÁNAK

A múlt század végén nagy intenzitású, megszervezett hálózatok, ellátási láncrendszerek alakultak. A céljuk a versenyelőny növelése, a profit, valamint az eredményeik, pozíciójuk stabil állapotban tartása. Ennek érdekében egyre jobban előtérbe került a vállalatok átszervezése. Törekedtek csúcsvállalattá lenni, a szakmában meghatározóvá válni. Így a logisztikai ellátási lán-

cok hálózatokká szerveződtek a harmadik évezred első évtizedében. Ugyanakkor a versenyképes ellátási lánc, mint önálló dinamikus erő kialakította az innovatív infokommunikációs képességeket és az interdiszciplináris kapcsolatait a világpiacon. Képes volt új szervezetté átalakulni, új stratégiát alkotni, új termékkel és szemlélettel piacra lépni. De elérhetővé vált más hálózatokkal való összekapcsolódása, *új szervezetben* stabil pozíciót alkotott.

A horizontálisan szervezett hálózatos logisztika

Több különböző logisztikai ellátási lánc és hálózat összekapcsolása valósult meg. A gigantikus rendszer elemei egymással gazdasági kapcsolatba kerültek, jogilag önálló, együttműködő, de szoros gazdasági elszámolással stratégiai kapcsolatban állnak egymással. Viszont a középpontban a piac maradt. Közöttük volt *kommunikáció, koordináció* és *kooperáció*. Mind ezek a múlt század dimenziójának színvonalán lassúnak bizonyultak a XXI. században. A logisztikai képességek minőségi hiányosságokkal működtek.

A világgazdaság színterein kialakult a *Horizontális logisztikai ipar*. Első hallásra ez a felépítmény pozitív hatást keltett a piaci szereplők számára, de összességében lelassította a fejlődést, és egy álló háborúra emlékeztető hatást váltott ki. Kimerevítette a dinamikusan működő ellátási láncokat és a hálózatokat.

A nemzetközi piac lehetőséget adott külföldi környezetben a terjeszkedésre, az ellátási lánc átszervezésére, pozíciójuk megerősítésére új stratégia építésére. A körülményeket vizsgálva az látszik a szolgáltatások előtérbe kerültek úgy külföldön, mint hazánkban. Minőségi változásoknak közelíteni szükséges a fogyasztói igényekhez. A ***logisztikai*** érték-, ár-, és igények összhangjának megteremtését a piacon lehet érvényesíteni. Ha összevetjük a globális és lokális környezet érték arányait, akkor egyértelmű a 20–30 km sugarú körön belül a ***szolgáltatás nyújtás*** és a kereslet egymáshoz közelítése a kedvező mindkét fél szempontjából.

Az első évtized lendületet adott az ellátási láncnak, de alapjaiban még a múlt század tudományos lenyomata volt tetten érhető a szemléletben és a gondolkodásban, valamint az innováció és a kutatás fejlesztés is a múlt dimenziójának jegyeit hordozta. Ennek következményeként a ***globális és üzleti logisztika*** a világ szűk keresztmetszetévé vált. [10] Ismérvei követhetőek *a környezetvédelemben, a kamionforgalomban.* A ellátási láncoknak, hálózatoknak az informatika volt a segítő társa, már az elmúlt évtizedekben is többször kisegítette a fejlődésében.

Megvalósult a kereskedelem felgyorsulása, amely a világpiac mennyiségi és minőségi fejlődésének növelését idézte elő és ez a fellendülés alapját képezte. Így valósulhatott meg *a lokális, a globális elosztó rendszerek csendes forradalma* [10] és a fejlődés hordozója lett. Napjaink értékteremtő folyamati számos kihívásra képes újfajta válaszokat adni. Ezek bizalmat erősítenek a kapcsolatokban, az ellátó – termelő – elosztó rendszerekben. A mikro-, és makrogazdaságban, a társadalom képviselői minden napi kapcsolatban vannak igényeik és érdekeik megvalósulásában. Lépésről-lépésre biztosan csendben halad *a lopakodó logisztika forradalmának szelleme*. „*Figyeljünk, nehogy elhaladjon mellettünk*." [10]

Infokommunikációs Hálózatközpontú Rendszerlogisztika

Az előző fejezetben taglalt rendszer működése már akadályává vált a logisztika fejlődésének. Mindenképpen ebből a helyzetből két megoldási lehetőség nyílt. Egyik az infokommunikációs

rendszer adta lehetőségek megvalósítása. Szükségessé vált ***a horizontális logisztika átalakítása az infokommunikáció rendszereinek szoros együttműködésével***. *A hálózatközpontú rendszerlogisztika* működését vertikális rendszerűvé szükséges átalakítani. Napjainkban a tudás, technológia és a technika fejlettsége már átalakult ***infokommunikációs hálózatközpontú rendszerré***. Az információ virtuális és fizikai térben egyaránt igény szerint mozog. Kialakulóban van az infokommunikációs *Just in Time,* amely felhasználói igények szerint teszi lehetővé az információ és infokommunikáció áramlását. Dinamikus eleme és mozgató rugója ez ***a rendszerlogisztikának:***

- az információ önálló és megszervezett – minden jogosultsággal rendelkező stratégiai partner szervezi, alakítja, használja igény szerint a nap 24 órájában;
- a virtuális interaktív tér már működtethető állapotban van, működik az Információ JIT amely nélkül már elképzelhetetlen a hálózatközpontú rendszerlogisztika működése;
- a Cyber-, Virtuális-, és Űr térben is megvalósul a kép, hang, adat, digitális jel, továbbítás, valamint a Föld három dimenziójában is.

A másik megoldás: a horizontális logisztika vertikálissá alakítása. Ebben a folyamatban több tényező kimunkált megvalósítása adja meg a várva-várt eredményt:

- integrált logisztikából, interaktív logisztikát szükséges kialakítani;
- logisztikai hálózatból vertikálisan működő hálózatközpontú logisztikai rendszert kell megvalósítani [1];
- információs rendszerből virtuálisan szervezett infokommunikációs rendszert szükséges formálni;
- az információt és az infokommunikációs rendszereket virtuális térbe kell helyezni;
- az információ minden rendszerben, hálóban a kezdő ponttól szervezetten a végpontig halad;
- a rendszerekben van szervezett anyagáramlás, információáramlás és szinergia áramlás;
- az infokommunikációs hálóban a rendszerlogisztikai stratégiai, infokommunikáció áramlásai haladnak minden partner tagot érintve;
- az Információ központok (2 db) minden információ és kommunikáció mozgását az archiválásig végzi;
- ebben a stratégiai központban a menedzsmentek helyezkednek el;
- másik központban a logisztikai végrehajtók, az áramlási folyamatok, az ellátási láncok, értékteremtő folyamatok rendszerei, és végül az érzékelők hálói vannak.

A HÁLÓZATOK ÚJ TUDOMÁNYA A HÁLÓZATI GAZDASÁGRA ÉS A RENDSZERLOGISZTIKAI KAPCSOLATOK VIRTUÁLIS INTEGRÁCIÓJÁRA FÓKUSZÁL [11]

A *hálózati gazdaság* modernkori felfogása átformálódott. Értelmezése szerint egy összetett bonyolult háló létét a vállalatok kapcsolatai összessége határozza meg. A szemünk előtt zajló új tudományos forradalom élőképei peregnek, amelyek *a hálózatok új tudománya* jelen és jövő képeit jelenítik meg [12:217–235]. Lehetséges még nem tudjuk megérteni teljességgel az újszerű jelenségek tartalmát. A *hálózati gazdaságot és a rendszerlogisztikát* összetett hálózatként értelmezve, a rendszereket, partnereket, vállalatokat pontoknak jelölve. A linkek az üzleti, gaz-

dasági, pénzügyi kapcsolatokat jelölik. Viszont az összeolvadások, felvásárlások, átszervezések, megszűnések, – ezeket a pontokat lenyeli a hálózat, ez a jelenség egyedi és természetes velejárói a hálózati gazdaságnak [12].

A linkek, és kapcsolatok egyre nagyobb szerephez jutnak és a hálózati jelenségek megértése a modern gazdaságban a túlélés alapfeltételét jelenti. Míg a múlt század gazdasága egy feje tetejére állított fához hasonló hálózatra épült [12], és a megoldás nem igényelt új tudást inkább betanított munkát a tömegtermékek előállításához.

Napjaink globális világában az információ, *az ötletek új értéket jelentenek.* Valószínű, hogy már nincs előttünk akadály, amikor a termelési lehetőségek kerülnek terítékre. A 3D nyomtató már termelő eszközként jelen van, igaz még van némi javítani való rajta.

A termelés szerkezete megváltozott [14], horizontálissá hálózatossá vált, sok kapcsolattal a csomópontok között a virtuális integráció előtérbe került. Az új együttműködés új felépítményt, új szerkezetet igényel. A munka együttműködéssel csoportokban folyik a vállalaton belül és kívül. A dinamikus hálózati szervezet könnyen kialakítható és a működése is rugalmasabb. A globális gazdaság kikényszerítette a vállalatok belső szerkezetének változtatását is. *A hálózatok* fő ismérve az együttműködés – ez nagyban segíti a sikeres módszerek alkalmazását. Egy másik kulcsfontosságú tényező a vezetők kapcsolata a többi cégekkel. Az igazgatói tanácsokban való részvételük hasznára válik, a hálózati kapcsolatokban, ahol alapvető szerephez jut. Az igazgatói tanácsi tapasztalatok összekapcsolása a vállalaton belüli szokások elterjesztésében növeli a gazdaság befolyását. Az igazgatók ismeretségek révén tudnak kezességet vállalni kollegákért – ez a „*haveri kör"* óriási gazdasági befolyással rendelkezik [14].

A piac is átértékelődött, *„… a piac nem más, mint egy irányított hálózat, vállalatok, vállalatcsoportok, a pénzügyi intézmények, a kormányok és a gazdaság minden lehetséges szereplője ennek a hálózatnak egy – egy pontja …."* [14] A pénzpiac is távol van már a közgazdasági érték értelmezéstől.

Új hálózati gazdaságnak vagyunk szemtanúi, ahol a stratégiai kapcsolatok és szövetségek a túlélés záloga. *„A hálózatoknak sokkal előnyösebb, ha hosszú távú elkötelezettséget és bizalmat építenek fel."* [13]

A makro-, és mikro gazdaság szintjén a *hálózati gazdaság* hosszú időre úti társunk lesz. E folyamatrendszerben népszerűségnek örvend a kiszervezés (outsourcing). A globalizáció minden nemzeti és földrajzi határon átível. Egy *új hálózati gazdasági szemléletre, gondolkodásra, világlátásra és összekapcsoltság megértésére lesz szükség dolgaink rendbetételéhez*. *Észjárás igazodik az adott civilizációhoz és az adott földrészhez*. Az új hálózati gazdaság működési elve változatlan – a linkek, pontok, kapcsolatok szélesednek, erősödnek és új ötletek, érdekek és trendek mentén újra szerveződnek. A tudományos felfedezések alapján a modern logisztika okos alkalmazása új távlatokat nyit és a fejlődés határa akár a csillagos ég is lehet.

A rendelkezésre álló képességek azt igazolják, a két infokommunikációs központ köré szerveződik a rendszerlogisztika hangolása számos kapcsolattal, ami azt jelenti ez a hálózatközpontú kapcsolatok sokasága a rendszerlogisztikára hangolt. Képes interdiszciplináris kapcsolatban működni, olyan stratégiai partnerekkel, akik tudnak, és stratégiai képességekkel rendelkeznek, valamint képességük van kapcsolatba lépni céljaik megvalósítása érdekében a logisztikával.

Van lehetőség *megszervezni és kialakítani a komplex rendszerlogisztikai működést, a hozzá kapcsolódó interdiszciplináris partnerekkel.* A képességeket a felvételüket jóváhagyó, ellenőrző menedzsment minősíti és a kapcsolat csak ezt követően elfogadott.

SZÁZADUNK JÖVŐÉRTÉKE AZ INFOKOMMUNIKÁCIÓ, A HÁLÓZATI GAZDASÁG, A RENDSZERLOGISZTIKA ÉS AZ INTERAKTÍV VIRTUÁLIS VALÓSÁG [14]

A rendszerlogisztika és az infokommunikáció rendszereinek együttműködése legmagasabb szintű stratégiai kapcsolat az elmúlt évtizedek tükrében. Nagy erő rejlik a két terület közös értékalkotó tevékenységében. Századunk igazi jövőértékei és az elkövetkezendő évtizedek eredményeinek a záloga. Az új korszak elkezdődött, a logisztikai szervezetek, vállalatok, ellátási láncok, hálózatok, vállalkozások, hálózatközpontú működő rendszert alkotnak.

A jövőértékek alapot adnak a fejlődéshez:

- ismert előttünk a logisztikatudomány bázisán működő logisztikai rendszerek és infrastruktúrák megbízhatóan működnek és a fejlődésük dinamikus és reménykeltő;
- tudásalapon működnek a logisztika-, és infokommunikációs rendszerek és alrendszereik;
- az interdiszciplináris, interaktív, ellátási láncok, hálók a termelő-, ellátó-, elosztó-, szolgáltató rendszerek összekapcsoltak, optimalizáltak és szervezettek.
- a logisztikai, technológiai folyamatok, áramlások a kor színvonalán szervezettek, irányítottak, fejlődőképesek;
- az információ minden logisztikai hálóban megszervezetten, önállóan a teljes rendszeren áthalad a kezdő rendszertagtól az utolsó partnerig, új információkat ad stratégiai partnerek számára. Minden új áthaladás a rendszeren megújult értéket hordoz. Ehhez a részes partner tagok hozzáadhatnak önmagukról, termékeikről és üzleti dolgaikról, új adatokat, feltöltik a mozgásban levő hálóra, amely új tudás, megoldás, adat, átadás a partnerek értékteremtő munkájához;
- a virtuális térben a logisztika egyre jobban hatékonyabbá lesz és egy új formában az interaktív lehetőséget magában hordozza, a rendszerlogisztika így egy erős jövőértékké válik;
- a jövőértékek meghatározó eleme a nagy teljesítményű okos számítógép hálózat rendszer, amely az emberekkel, technikai eszközökkel együttműködő a legjobb megoldás megtalálása érdekében. Segíti a feladatrendszert a megoldó képességek fejlesztésében a okos technológia alkalmazása;
- jövőértéknek tekintem a minőségi professzionális képességekkel rendelkező felkészült, kiválasztott, informatikai és logisztikai munkatársakat és csoportokat;
- a stratégia jövőértéke és annak jelentősége abban áll, hogy az emberi kapcsolatok az üzleti területeken gyümölcsöző, a partnerek jó képességekkel rendelkeznek, a vevői igényeket figyelemmel kísérik és annak kielégítése elsődleges, úgy a termelő, mint a szolgáltatási szektort érintően;
- a rendszerlogisztika és az infokommunikáció együttműködése új dimenzióba helyezi a kapcsolatot minden partner között, akik részesülnek belőle jogosultság szerint. Ez elsődleges kapcsolat, amely meghatározó a működést illetően. Ezt erősíti az *Információ just in time* (JIT) és *az infokommunikáció áramlás*. Mindezt a partnerek igényeinek

megfelelően biztosítja az Információ Központ. (IK) Ez a rendszer üzleti, együttműködő, és versenyző kapcsolatokon keresztül valósul meg;

- a *teljes értékteremtő rendszerben a fizikai folyamatok áramlásai – anyag-, szinergia-, félkész-, késztermék, emberi erőforrás, szolgáltatások sokféleségének fenntartása állandósítja a hálózatközpontú logisztika pozícióját.*

JÖVŐKÉP JÖVŐÉRTÉKEK A KÖZELI ÉVTIZEDEKRE

Az előttünk álló jövő nagyon bonyolult és felgyorsult események sokaságának összhatása érvényesül, szinte kiszámíthatatlan közrehatások következtében. A gazdasági folyamatok éles változása következtében horizontális és vertikális hálózatközpontú hálószerkezetek épülnek ki sok kapcsolattal. Az információ a logisztikai hálózatok meghatározó együttműködő eleme. Többszörös infokommunikáció áramlás hatása alatt képes a rendszer dinamikusan fejlődni. A jövő iránya ez és dominálni fog a hálózati gazdaságban és a hálózatközpontú rendszerlogisztikában.

A jövőben a hálózati rendszerek a cégek teljes működését és területeit lefedik. Az integrált, interaktív, rendszerek működését az okos eszközök és technológiák alkalmazása szervezetten és rendszerszinten segíti.

Az infokommunikáció rendszerei igény szinten képesek információt továbbitani a hálózatoknak, akkor, amikor szükségük van rá a nap bármely időszakában. Ennek az áramlásnak a rendszere az *Információ Just in Time*, ez közvetít mindent a stratégiai hálóban.

A napenergia termelését utánzó magfúzió a nagy remények hordozója, és a jövő nagy energiaígéret [15] lett a magfúziós termonukleáris reaktor kikísérletezése és elkészítése. Napjaink kihívása és versenye folyik, ki lesz a leggyorsabb, aki piacon értékesítheti a magfúziós reaktor mobil változatát. A NASA, a védelmi és energetikai minisztérium kisméretű moduláris reaktort készít, a fúziós energia közvetlenül konvertálódik villamos energiává, amelynek mellékhatási nincsenek. A magfúzióhoz Hélium-3 (H3) terveznek használni. A prototípust, egy 50 MW-os egységet, 2019-re ígérnek. A világban több kísérlet is folyik, várhatóan közülük 2020-ra kereskedelmi forgalomban is megjelenhet. Ehhez kapcsolódó heroikus küldetés a Holdhasznosítás [23], számtalan még ismeretlen kockázatok várnak a Hold misszió bányászaira. A Holdon kibányászásra váró hélium3 megszerzése és Földre szállítása, feldolgozása a tét [24]. Több ország versenyez. Megszerzése eldönti, ki uralja az energia piacot. A magfúziós termonukleáris reaktor mobil kialakítása a döntő kérdés, de fontos az időalapú versenyben ki lesz a kereskedelemi forgalomban az első értékesítő. Franciaországban épül az első reaktor. A hatalmas nemzetközi kísérleti óriás elkészítésének várható ideje 2030-ra tehető.

Egy 5. generációs mobilinternet van az üzleti érdeklődés középpontjában. 1,215 Gb/s átviteli sebességet értek el a Telenor kutatói. A sebesség mellett kiemelkedően gyors a válaszidő – 10 ms. A mobilinternet hálózatnál fontos a minél rövidebb, annál gördülékenyebb a kommunikáció két rendszer között. Felhasználása a hálózati üzleti életben, online kapcsolatokban, távorvoslában, autóversenyeken [16]. Az 5G stratégiai fontosságú, nagy hatása lesz a gazdaságra és a társadalomra az elkövetkezendő években.

A „dolgok internete” [17] az emberközpontú technológiák jövője *a technológia az emberekért*. Napi szinten alakítja az emberi életet, munkát, életvitelt segíti. Előtérbe kerülnek *a tanuló technológiák „az emberért gondolkodni”.*

„Technológia az emberekért” jelentősége az, hogy az emberi képességeket kiterjesztik és felerősítik, ez a gondolkodásmód a legnagyobb haladást idézheti elő. A technológia napi szinten alakítja az életünket, munkánkat. Felvet fontos társadalmi kérdéseket és új lehetőségeket teremt, a változásokat viszont az emberek irányítják.

IoT – ***ügyi igazgató*** [18] szinte minden vállalatnak szüksége van már *digitális igazgatóra*. ***Az innováció új korszakához érkezett a világ, szükség van új többfunkciós igazgatókra.*** Hamarosan *IoT-ügyi igazgatók* sokasága jelenik meg a vállalatok fontos vezetői rendszerében. *Ők lesznek azok,* ***akik a vállalatokra nehezedő terhet, mint az üzemeltetés, a hálózati gazdaság, rendszerlogisztika [14],*** – ***valamint az informatika megoldások között létező szakadékot képesek áthidalni, a nehéz kérdések halmazát megoldani.*** Mindenkivel együtt dolgoznak az üzemek vezetőitől az informatikai igazgatókig és a vezérigazgatókig. A legfontosabb az, hogy ***ők felelnek a változások megvalósításáért.*** Ezek után éri el cégük azt a minősítést, mi szerint megfelel a *negyedik ipari forradalom követelményeinek.*

ÖSSZEGZÉS

A modern logisztikatudomány kialakulását vizsgálva, az első pillanattól az a gondolat forgott a fejemben, hogy egy közgazdász alakítja ki a ***közgazdaságtanból a logisztikát.*** Hiszen M. E. Porter első ismert képlete az ***értéklánc***, amire odafigyelt a világ. Néhány év eltelte után Porter gondolataiban és írott formában is megjelent a ***gazdálkodás tudomány.*** Ahogy haladunk a XX. század utolsó évtizedébe, már ***logisztikáról, értéklláncról, ellátási láncról*** beszélünk. A harmadik ezredforduló előtt néhány évvel a ***Logisztikatudomány*** megjelenésének voltunk tanui. A felsorolt tudományos események sora szinte bezsúfolódott tizenöt-húsz évbe. Ahogy teltek az évek a logisztika megszervezte önmagát úgy elméleti, mint gyakorlati vonatkozásban. A legnagyobb szervezettől a legkisebb vállalkozásig és beindult a lehengerlő fejlődése. ***A jelenségként haladt át régiókon, határokon, civilizációkon, földrészeken*** nem kihagyva a gazdaságot és a társadalmat sem. Elmondhatom, tanúja voltam ennek a folyamatnak, de akkor nem így fogtam fel, mint ma. Tudom, minden tudománynak ki kell alakítani a saját nyelvét, akkor lehet csak fejlődőképes és csak akkor maradhat fenn a hosszú időre a történelem nagy olvasztó tégelyében.

A XXI. században eltelt majdnem két évtized kellően ***lendületbe hozta a logisztikatudományt, az ellátási láncot, hálózatot, hálózatközpontú logisztikát, rendszerlogisztikát.*** *Vele több interdiszciplináris partnerkapcsolatban levő tudományt, az infó kommunikációt,* amellyel együtt negyedszázados stratégiai partnerkapcsolatban működtek. Valószínűsítem az elkövetkezendő években a két tudományterület várhatóan összeolvad a területrészeit illetőn. Sokat fejlődtek együtt, hiszen kölcsönösen segítették *az interaktív együttműködést, a* ***virtuálisvalóságot*** *emberközelibbé tenni.*

Közben az Amerikai Egyesült Államokban Barabási Albert László kutató egy új tudomány alapjait lerakta, és azt a ***Hálózatok új tudománya*** [11] névvel jelölte. Ebben a tudományágban a gazdaságot összetett hálózatként értelmezte, benne részrendszereivel és más alkotó elemeivel együtt. *A modern logisztika fejlődése során kialakult új minőség változásai is helyet kaptak. A* ***rendszerlogisztika is része ennek***, hiszen a kutatásom kezdeti éveiben – 2007 évben már ***hálózatközpontú logisztikaként fogalmaztam meg*** [20] [21] [22]. ***Ez nagy mérföldkő, új eredmény***, amely ösztönzően hat rám és a kutatási területemen motivál hatékonyabb munkára. Gondolom

a doktoranduszaim is még nagyobb érdeklődéssel fogadják, és nagy hatással lesz kutatási területük eredményes feltárásában.

Az elmúlt évtizedek fejlődését követően a ***modern logisztikatudomány*** kapuja még nagyobbra nyílik, hiszen az előttünk álló fejlődés üteme egyre gyorsabb és gyorsabb lesz a közeli és távolabbi jövőben. Új távlatok nyílnak, rendszerlogisztika kiterjed néhány éven belül a Holdra [23], főleg a bányászati kultúrába bevonható területeket illetően, de számos logisztika területet említhetek meg. Főleg a Hélium3 izotóp Földre juttatása rakéta-szállító logisztikai eszközökkel, létrejön a hibrid-logisztika gyakorlati, bányászati, szállítási műveleteinek rendszere. Viszont van egy kiemelkedő fázisa ennek a magfúziós atomrektor ***logisztikai műveleti támogatása a Hold és a Föld között működő ellátási láncban*** [24].

A későbbi évtizedekben a Mars kerül előtérbe, ott az élet minden feltételeinek meghonosítása lesz a fő feladat, nehéz körülmények között.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Estók S.: Hálózatközpontú integrált interdiszciplináris logisztika. Bolyai Szemle, XVIII 3 (2009), 23-33.
[2] Barabasi A. L.: Hálózatok Új tudománya Budapest Helikon Kiadó, 2008 – Könyvében kialakította a hálózatok új tudományos rendszerét, a Hálózati Gazdaság modelljét, a gazdaságot összetett hálózatként értelmezte.
[3] Porter, M.E.: A versenystratégia 63 kiadást élt meg, 19 nyelvre fordították le, a Versenyelőny 38 kiadása jelent meg. A Nemzetek versenyelőnye bemutatta hogyan versenyeznek a nemzetgazdaságok, és mi a nemzetek gazdasági fejlődésének forrása. (Porter M.E. fontos művei)
[4] Porter M. E. (2006): Versenystratégia., 14.
[5] Knoll I. (2001): Logisztika a 21. században. Profitnövekedés logisztikai eszközökkel. Budapest: KIT Képzőművészeti Kiadó (3. kiadás), 9.
[6] Knoll I. (2001): Logisztika a 21. században. Profitnövekedés logisztikai eszközökkel. Budapest: KIT Képzőművészeti Kiadó (3. kiadás), 14.
[7] Chikán A., Demeter K. (2006): Értékteremtő folyamatok menedzsmentje. Budapest: Aula Kiadó (5. kiadás), ISBN 9639585 21, 1-17.
[8] Chikán A. (1992): Vállalatgazdaságtan. Budapest: KJK Aula Kiadó
[9] Chikán A. (2008): Vállalatgazdaságtan. Budapest: Aula Kiadó
[10] Chikán A. (2016): Lopakodó forradalom. Logisztikai Híradó, XXVI 5 (2016)
[11] Barabási A. L. (2008): Behálózva. A hálózatok új tudománya. Budapest: Helikon Kiadó, ISBN 978 963 227, 216-236.
[12] Barabási A. L. (2008) In Powell, W. W. (Ed.) Neither Market for Hierarchy: Network of Organization., 226.
[13] Barabási A. L. (2008): Behálózva. Hálózati gazdaság., 216-235.
[14] Szentgyörgyi Zs.: A jövő nagy energiaígérete. Metropol, (2015. február 4.)
[15] Az idei év a chatbotok és a mesterséges intelligencia éve. Technokrata, (2017. 01. 26.), http://www.technokrata.hu/egazdasag/2017/01/26/az-idei-ev-a-chatbotok-es-a-mesterseges-intelligencia-eve/
[16] Az emberközpontú technológiák jövője. Technokrata, (2017. 01. 26.), http://www.technokrata.hu/egazdasag/2017/01/26/az-emberkozpontu-technologiak-jovoje/
[17] Ez vár ránk 2017-ben. Technokrata, (2017. 01. 18.), http://www.technokrata.hu/egazdasag/dotkom/2017/01/18/ez-var-rank-2017-ben/
[18] Estók S.: XXI. század logisztikai kihívásai, trendjei és lehetőségei. Logisztikai trendek és legjobb gyakorlatok, 1 1 (2015), 35-38.
[19] Estók S.: Hálózatközpontú integrált interdiszciplináris logisztika. Bolyai Szemle XVIII 3 (2009), 23-33.
[20] Estók S.: Szervezett és önálló információ vezérli a hálózatközpontú logisztikát. 1. rész. Tranzit: szállítmányozási szaklap, 13 2, 43-45.
[21] Estók S.: Szervezett és önálló információ vezérli a hálózatközpontú logisztikát. 2. rész. Tranzit: szállítmányozási szaklap, 13 2, 45-48.
[22] Estók S.: Holdhasznosítás műveleti logisztikai támogatásának biztonság és kockázat elemzése. Logisztikai trendek és legjobb gyakorlatok, II 1 (2016), 56-58.
[23] Estók S.: Kozmikus ellátási lánc a Föld és a Hold között. Hadtudományi szemle, 8 1 (2014), 21-23.

INTERACTIVE, VIRTUAL INTEGRATION OF NETWORK SYSTEM LOGISTICS

A new, modern logistic era has begun, yet unknown to those who practice logistics. It is characterized by the designation and capacity of ICT and network centric system logistics. The advancing of smart info communication at the speed of light demands the interdisciplinary elaboration of scientifically organized logistic systems, and the improvement of quality. As the new logistic era is being designed, a new con-struction and operation of a knowledge-based, network centric, virtual, interactive, smart system logistics emerges for the future economy and society in the entire chain. There will also be a major change in net-work economy, system logistics and its links to the new science of networks. This cooperation can develop into partnership in the future.

Keywords: *system logistics, interdisciplinary, info communication, new era, network economy*

Estók Sándor (PhD)
ny. alezredes, közgazdász
Óbudai Egyetem
Biztonságtudományi Doktori Iskola
estok.sandor@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2422-5293

Sándor Estók (PhD)
r. Lt.Col, economist
Óbuda University
Doctoral School on Safety and Security Sciences
estok.sandor@gmail.com
orcid.org/0000-0002-2422-5293

http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_1/2018-1-20-0491_Estok_Sandor.pdf