

Rácz Gábor¹ – Veress Árpád²

INDUKÁLT SEBESSÉGELOSZTLÁS MEGHATÁROZÁSA ÉS ALKALMAZÁSA LÉGCSAVAROS REPÜLŐGÉP KÖRÜL KIALAKULT ÁRAMLÁS MODELLEZÉSÉRE³

A BME⁴ Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék munkatársai számos hazai és nemzetközi kutatásban vesznek részt. Ezek közül az egyik az ESPOSA⁵ projekt. A munka egyetemünkre eső része, egy turbólégcsavaros repülőgép szívócsatornájának és hajtóműgondolájának CFD⁶ vizsgálata és továbbfejlesztése. Ezen cikk a feladat kidolgozásának első lépéseit mutatja be, azaz a légcsavar működésének modellezését Schmitz féle módszerrel, az indukált sebességeloszlásának meghatározását és ezek felhasználásával egy áramlástan szimuláció elkészítését. A kapott eredményeket értékelve kitekintést teszünk a további lépések elvégzésének irányába.

DETERMINATION AND APPLICATION OF INDUCED VELOCITY DISTRIBUTION IN FLOW MODELLING AROUND A TURBOPROP AIRCRAFT

The colleagues of BME³ Department of Aeronautics, Naval Architecture and Railway Vehicles participate in several industrial and international research projects. One of them is the ESPOSA⁴ program, in which the task of the Department is to improve design specifications of the engine intake channel and nacelle of a newly developed turboprop aircraft by means of CFD⁵. The recent article shows the first steps of the work. The induced velocity distribution of the propeller is determined by Schmitz's method and used in the flow modelling software as boundary conditions. The preliminary results of the CFD analyses are presented, evaluated and the next steps of the investigation are outlined.

1. BEVEZETÉS

A BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék munkatársai és hallgatói számos nemzetközi munkában vesznek részt. Ezek közül az egyik az Európai Unió 7. keretprogramjának 4. felhívására benyújtott és kidolgozásra elfogadott ESPOSA projekt.

Az ESPOSA projekt 2011-ben kezdődött, európai kis repülőgép és hajtómű gyártók, illetve a repüléstudományokban érdekelt egyetemek és kutató intézetek közreműködésével. A célja az, hogy biztosítsa az innovatív technológiák fejlesztését a kis gázturbina családok számára. A tervhez kiválasztott hajtóművek – turboshaft/turboprop – teljesítmény tartománya 180–450 kW, amely szinte egyedülálló, mivel az általános légiközlekedési szektorban – General Aviation Sector – az ESPOSA hajtóművei az egyik legkisebbek. A program további része a

¹MSc hallgató, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, gabor656@gmail.hu

² PhD, egyetemi docens, BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, averess@rht.bme.hu

³ Lektorálta: Prof. Dr. Óvári Gyula, egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, ovari.gyula@uni-nke.hu

⁴ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (Budapest University of Technology and Economics)

⁵ Efficient Systems and Propulsion for Small Aircraft

⁶ Computational Fluid Dynamics



meghajtó egységekkel szoros kapcsolatban álló elemek hatékonyságának és biztonságának növelése, továbbá a pilóták munkaterhének csökkentése. Nem utolsó sorban, a fejlesztési műveletektől, a kis repülőgépek – direct operating cost – üzemeltetési, fenntartási költségeinek csökkentését (10–14 %) várják eredményül [2].

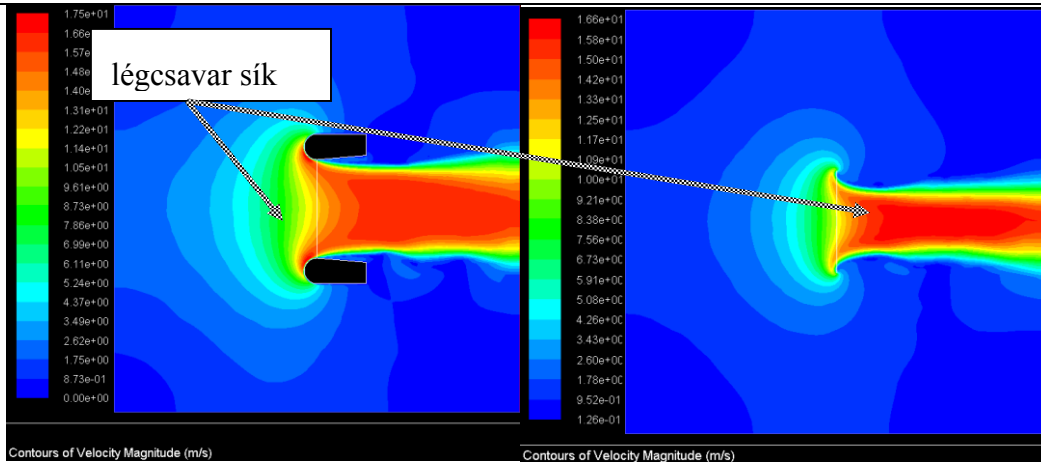
A program nem véletlenül tűzte ki célul ezt a konfigurációt. A turbólégcsavaros repülőgépekkel ugyanis jó propulziós hatásfok érhető el (max. kb. 80–92 %), melynek köszönhetően jelentősen javul a tüzelőanyag fogyasztás. Ez pedig a légijármű fenntartási költségeinek csökkentését is maga után vonja. Az ESPOSA a további hatékonyságnövelés érdekében a meghajtó és a léglátó rendszer számos elemének továbbfejlesztését vette tervbe.

A munka egyetemünkre eső része, egy turbólégcsavaros repülőgép szívócsatornájának és hajtóműgondolójának áramlástani vizsgálata és javaslatok kidolgozása a tervezési specifikációk (pl. nyomásvesztései tényező, részecske-kiválasztási hatékonyság, ellenállás tényező) javítása érdekében. A műveletek első lépéseként a légcsavarok működésének modellezését végeztük el. Ez a hajócsavarok és szélturbinák tervezésében már elterjedt „actuator disc” teórián alapul, ami nem más, mint egy, az áramlásban elhelyezett, a légcsavar sugár hatását modellező vékony tárcsa. Előnye, hogy nem kell a valóságos légcsavar geometriát felhasználni és behálózni, ezáltal jelentős számítógépi kapacitás takarítható meg a szimulációk során. A módszer elméleti háttere a későbbiek során ismertetésre kerül. E munka folytatásaként mindenképpen meg kell győződni arról, hogy az alkalmazott módszerrel végrehajtott vizsgálat eredményei mennyire felelnek meg a valóságnak.

A légcsavar 3D-s modelljének megléte esetén és a megfelelő numerikus áramlástani opció kiválasztásával (pl. forgó „domain”) és alkalmazásával szintén modellezhető a légcsavar hatása. A két módszer összehasonlításával már korábban egy végző hallgató szakdolgozatában foglalkozott a témával [3].

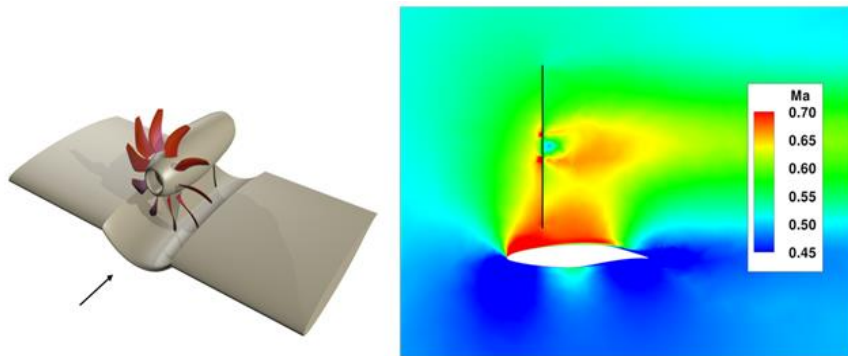
Kitekintésként bemutatunk néhány, mások által elkészített analízist, amelyekben légcsavarok hatását használták fel CFD szimulációkban. Elsőként egy UAV (Unmanned Air Vehicle) pilóta nélküli robotrepülő CFD-s vizsgálatát emelnénk ki, mivel a szimuláció során szintén az „actuator disc” módszert alkalmazták. A cikkben, „Unmanned Air Vehicle (UAV) Ducted Fan Propulsion System Design and Manufacture” összehasonlításra kerül, egy légcsavaros és egy csőlégcsavaros kialakítású repülőgép [4]. A 2D-s szimuláció eredményei közül kiragadva egyet, az 1. ábra jól szemlélteti a sebességmező alakulást mindkét esetben.

Másodikként említjük meg azt a cikket [9] melyben, ahogy a korábbi esetben is, az „actuator disc” szimulációs eljárásra építve alapvetően a helikopter rotorok aeroelasztikus jelenségeit, de kiegészítőleg akusztikai jellemzőit is vizsgálták.



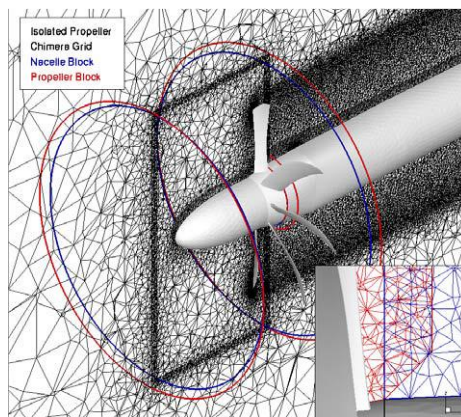
1. ábra A zárt és nyitott propeller konfiguráció sebességmezőjének alakulása [4]

További jó példa a „Technische Universität Braunschweig” által végzett kutatás, melybe egy integrált légcsavar hatásának vizsgálatát végezték el szintén az „actuator disc” módszer segítségével [5]. A modellt és egy kiragadott eredményt a 2. ábra szemlélteti. A kutatás az aerodinamikai jelenségek elemzésén túl, a szerkezet akusztikai vizsgálatára alkalmazták.



2. ábra Az integrált propeller 3D-s CAD modellje és az erről készített „actuator-disc”-es szimuláció egy eredménye [5]

Az utolsó felhasználási példaként említjük a „Unsteady Simulation of a Transport Aircraft Propeller Using MEGAFLOW” [6] munkát, amelyben a forgó „domain” szimulációs módszert alkalmazva vizsgálták egy hajtóműgondola-légcsavar együttest (3. ábra), két különböző működési állapotban (0° és 10° -os állásszög esetén).



3. ábra A gondola és légcsavar hálózott modellje [6]

Az irodalmi áttekintés után, visszatérünk a saját munkánk bemutatásához. Ebben először az „actuator disc” módszert ismertetjük a légcsavarszámításokhoz szükséges elméleti háttér, a Schmitz-féle módszer bemutatásával, a légcsvavar indukált sebességeinek meghatározása érdekében. A következő lépésben ismertetjük a számítás programozott alakjának felépítését. A matematikai modell eredményeit ezt követően összehasonlítjuk az ESPOSA projekt számunkra rendelkezésre bocsátott adataival. Az értékelés után, a kapott indukált sebességeloszlásokat beillesztjük a CFD modellbe. Végezetül megtekintjük és értékeljük a numerikus számítás eredményeit, és felvázoljuk, hogy milyen további lépések szükségesek az eredmények pontosítása és a program folytatása érdekében.

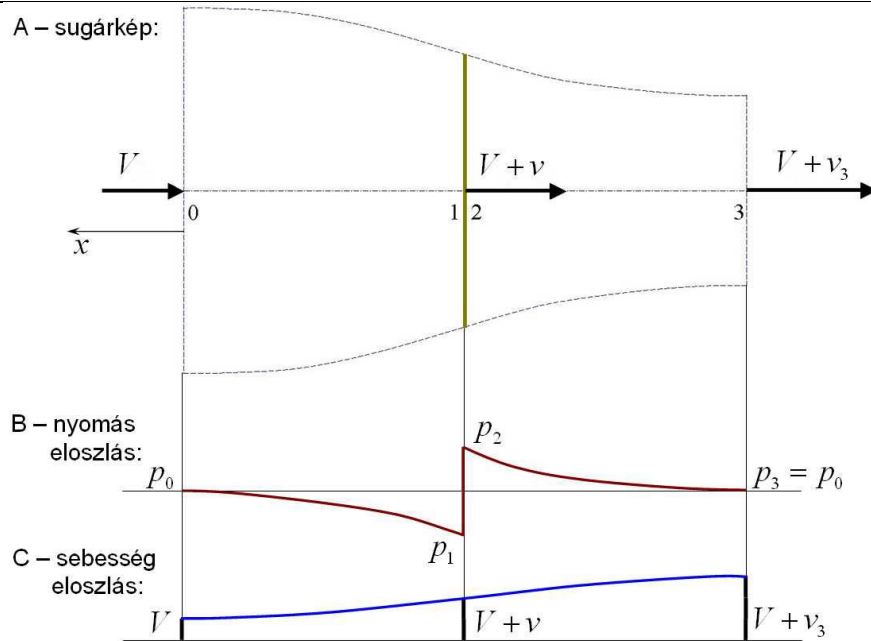
2. A légcsvavar impulzus elmélete [1] – „actuator disc” módszer

Az „actuator disc” módszer kellő mélységű bemutatása érdekében, átvettük az [1] forrás ide vonatkozó fejezetét.

A légcsvavarok a vonóereje vagy tolóereje a rajtuk áthaladó levegő felgyorsításához szükséges erő reakció-ereje, mely számításának legegyszerűbb módja az áramlástan impulzus tételére alapozott, impulzus elmélet. A vizsgálathoz feltételezzük, hogy a légcsvavar egy olyan, végtelen vékony tárcsa, amelynél az átáramló levegő nyomása ugrásszerűen, de a tárcsa minden pontjában azonos értékkel nő, és ennek megfelelően a levegő sebességváltozása is (ezt nevezzük közeli indukált sebességnek) minden pontban azonos értékű. Első lépésben feltételezzük még, hogy a sugár nem forog. Ez, az egyszerű sugár elmélet – a fentiek alapján – egyméretű feladat, mivel az egyes jellemzők (lásd 4. ábra) csak a hossz mentén változnak.

Az egyszerű, impulzus elmélet szerinti működés jellemzőit a 4. ábra szemlélteti. A légcsvart jelentő, végtelen vékony korong az „1” és „2” pontok között látható, ahol szaggatott vonallal határolva felrajzoltuk a körülötte kialakuló áramlást, a légcsvavar sugarának egy részét. A sugár belépő keresztmetszete (jele „0”) nagy, és a „0”-tól a „3”-as pont felé haladva, az áramlási sebesség növekedésével, az ábrázolt jellegnek megfelelően szigorúan monoton módon csökken.

A következőkben feltételezzük, hogy a légcsvavar pontosan az ebben az áramcsőben áramló levegőre hat. A hozzá érkező zavartalan levegőáram sebessége V – ez, ellenkező előjellel éppen a repülés sebessége – ha az állásszög változások és az esetleges csúszás hatásától eltekintünk. Ezt a sebességet látjuk a 4. ábra „0” jelzésű pontjában. Az „1” és „2” pontban – a folytonosság következtében – egyaránt „ $V + v$ ” a sebesség. Ez a zavartalan áramlás és a közeli indukált sebesség összege. A kilépésnél („3” pont) a legnagyobb a sebesség ($V + v_3$).



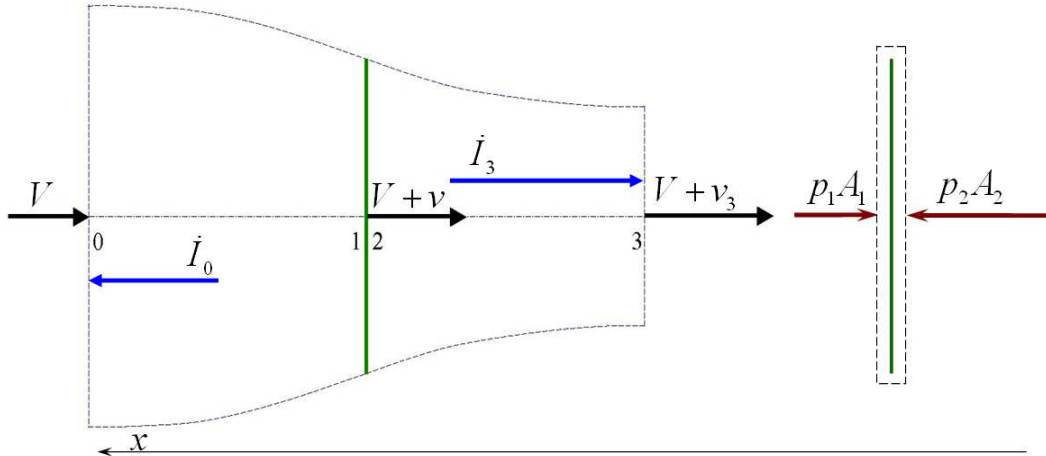
4. ábra A légsavár működése [1] – „actuator disc” módszer

A 4. ábra „B” részén, az áramcső hossza mentén kialakuló nyomásváltozás látható. Mivel a belépő keresztmetszetet elég távol választottuk, azért ott a belépő nyomás egyenlő a környezeti nyomással (p_0). A légsavár működése következtében közvetlenül a légsavár-tárcsa előtt, a nyomás – az ábra „B” részén vázolt görbének megfelelően – $p_1 < p_0$ értékre csökken. E nyomáscsökkenés miatt nő a sebesség a légsavár előtt, mely működése során energiát (teljesítményt) közöl a rajta áthaladó levegővel. Ez az oka, illetve ez magyarázza a nyomás ugrásszerű megnövekedését, p_1 -ről p_2 -re.

A 4. ábra „C” részén a sebesség hossz menti változását tüntettük fel. Látható, hogy a megnövekedett nyomás (p_2) értéke a sebesség növekedésével a környezeti nyomásra csökken. Vagyis a kilépésnél $p_3 = p_0$, azaz a kilépő nyomás – elég távol a légsavár mögött – egyenlő a környezeti nyomással. A „3”-as pontban az úgynevezett távoli indukált sebesség (v_3) alakul ki.

Az fentiekben leírt áramlás a folytonosság törvényének, az úgynevezett impulzus tételnek és a Bernoulli egyenletnek a segítségével vizsgálható. Az áramlástan impulzus tételének felírásához egyszeresen összefüggő, zárt ellenőrző felületet kell kijelölni és koordináta rendszert is szükséges definiálni.

Az 5. ábra jól megfigyelhető két ellenőrző felületet jelöltünk ki: a bal oldalon a már tárgyalt légsavár sugár darabot (szaggatott vonallal határolva); a jobb oldalon pedig, szintén szaggatott vonallal határolva, egy, a légsavár tárcsát szorosan körülfogó, egyszeresen összefüggő, zárt felületet rögzítettünk. Mivel, ez a feladat egydimenziós, elegendő egyetlen irány, az „x” tengely kijelölése. Ebben az esetben a vektor mennyiségek vektori voltát az előjelük jelenti (pozitív előjel esetén a vektor a „+ x” irányba, negatív előjel esetén pedig ellenkező irányba mutat).



5. ábra A légszár működése, ellenőrző felületek [1]

Írjuk fel először az impulzus tételt a bal oldali ábra-rész ellenőrző felületére:

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) \cdot V \quad \text{és} \quad \dot{I}_3 = -\rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) \cdot (V+v_3) \\ \dot{I}_0 + \dot{I}_3 &= \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) \cdot V - \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) \cdot (V+v_3) = -T \end{aligned} \quad (1)$$

Az impulzus tétel bal oldalán az időegységre eső mozgásmennyiség-változás vektorok (\dot{I}_0 és \dot{I}_3) található. A jobb oldalon a közeg idegen testre gyakorolt erőhatása ($-T$) áll. Az erő előtti negatív előjel itt azt jelöli, hogy ez egy reakció erő; alapesetben a közegre ható erőt kell (pozitív előjellel) az egyenletbe beírni. A környezeti nyomásból származó erőt nem írtuk ki, mivel, első közelítésben feltehető, hogy a nyomás az ellenőrző felület mentén mindenütt azonos a környezeti nyomással, ezért ez az erő nulla.

Az (1) egyenletben a $\rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) = \dot{m}$ kifejezés a légszár-sugarban haladó, állandó értékű tömegáramot jelenti. Ezt a sűrűségnek (ρ), a légszár felületének ($R^2 \cdot \pi = A_1 = A_2$) és a légszárnál érvényes sebességnek ($V+v$) a szorzataként kapjuk meg.

Fejazzük ki az (1) egyenletből a légszár vonóerejét:

$$T = \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) \cdot (V+v_3 - V) = \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot (V+v) \cdot v_3 = \dot{m} \cdot v_3 \quad (2)$$

Írjuk fel az impulzus tételt az 5. ábra jobb oldalán látható ellenőrző felületre is:

$$0 = -\int_A p \cdot dA - T = -p_1 \cdot R^2 \cdot \pi + p_2 \cdot R^2 \cdot \pi - T \quad (3)$$

Ebben az esetben az időegységre eső belépő és kilépő mozgás-mennyiség változás abszolút értéke azonos, előjelük különböző, az összegük tehát nulla – ez a nulla szerepel az (3) egyenlet bal oldalán. A jobb oldalon viszont ki kell számolni a felületi erőt (ez a középső tagbeli integrál) és az idegen testre ható (reakció) erőt is figyelembe kell venni.

Végeredményben kapjuk:

$$T = R^2 \cdot \pi \cdot (p_2 - p_1) \quad (4)$$

A vonóerőt (tolóerőt) kiszámíthatjuk, akár a (2), akár az (4) kifejezésből. Az erőre (általában) pozitív értéket kapunk, ez azt jelenti, hogy a vonó (toló) erő a pozitív „x” tengely irányában mutat – ez pontosan igazolja a fizikai elvárásainkat.

Az 5. ábra alapján két Bernoulli egyenlet írható fel: az egyik a nulla és egyes pont közé, a másik a kettes és hármas pont közé. (Az egyes és kettes pont között energia bevezetés van, ezért oda Bernoulli egyenletet felírni csak a feltétlenül szükséges megfontolások megtétele után, a bevezetett teljesítmény figyelembe vételével szabad.) A két egyenlet:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{(V+v)^2}{2} \quad (5)$$

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{(V+v)^2}{2} = \frac{p_0}{\rho} + \frac{(V+v_3)^2}{2} \quad (6)$$

Vonjuk ki (6)-ból (5)-öt:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = \frac{(V+v_3)^2}{2} - \frac{V^2}{2} = \frac{2 \cdot V \cdot v_3 + v_3^2}{2} = \frac{(2 \cdot V + v_3) \cdot v_3}{2} \quad (7)$$

A fenti egyenletbe a nyomáskülönbség alapján beírható a vonóerő:

$$\begin{aligned} \frac{(2 \cdot V + v_3) \cdot v_3}{2} &= \frac{p_2 - p_1}{\rho} = \frac{T}{\rho \cdot R^2 \cdot \pi} = \frac{\dot{m} \cdot v_3}{\rho \cdot R^2 \cdot \pi} = (V+v) \cdot v_3 \\ \Rightarrow \frac{(2 \cdot V + v_3)}{2} &= (V+v) \Rightarrow v_3 = 2 \cdot v \end{aligned} \quad (8)$$

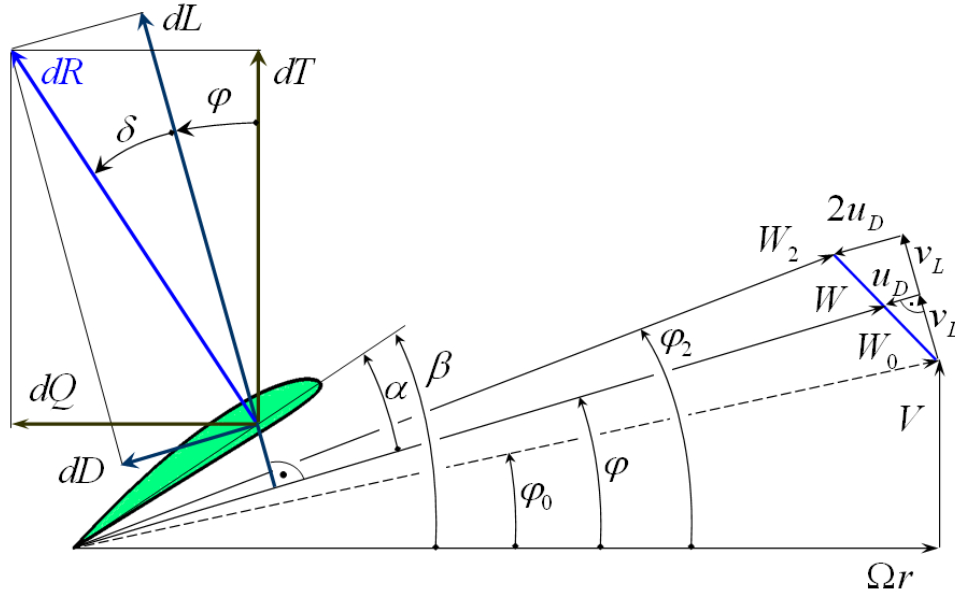
A (8) egyenlet szerint a távoli indukált sebesség kétszerese a közelinek. Ez fizikailag azt jelenti, hogy a légcsvár előtti nyomáscsökkenés ($p_0 \Rightarrow p_1$) következtében jön létre a közeli. Ezután, a bevezetett motorteljesítménynek köszönhetően a nyomás hirtelen megnövekszik ($p_1 \Rightarrow p_2$). Mivel a légcsvár síkja után kialakuló nyomás nagyobb az atmoszférikusnál, ez a nyomás lecsökken, miközben létrejön a „második” indukált sebesség, azaz végeredményben a távoli indukált sebesség (kb. 4–5 m távolságra a légcsvarsík mögött).

Ez az eredmény csak ideális közeg áramlására érvényes és csak akkor, ha nem vesszük tekintetbe a légcsvár-sugár forgását (amely forgás mindig létrejön, ha vonóerő keletkezik). Azaz állítás, ami szerint a távoli indukált sebesség a közeli kétszerese valóságos áramlásokban ugyan csak közelítőleg igaz, azonban – egyszerű, de jó közelítés lévén – nagyon sok más kérdés tárgyalásakor is alkalmazzák.

3. A LÉGCSAVAR LAPELEM VIZSGÁLATÁNAK SCHMITZ FÉLE KÖZELÍTÉSE [1]

A Schmitz féle közelítés bemutatása érdekében, átvettük az [1] forrás ide vonatkozó fejezetét.

A légszavak egyesített impulzus és lapelem elméletének, a modern számítástechnika szempontjából jobban megfelel a sebességi sokszögek Schmitz féle változata (lásd 6. ábra) – ahol az eredő indukált sebességet felhajtóerő irányú (v_L) és légellenállás irányú (u_D) összetevőre bontjuk fel (lásd 6. ábra).



6. ábra A légszavak lapelem Schmitz féle sebességi sokszöge [1]

Az itt következőket, kifejllesztője nyomán Schmitz-féle eljárásnak is nevezik, ahol indulásaként az állásszöget határozzuk meg:

$$\alpha = \beta - \varphi \quad (9)$$

Egyszerű geometriai megfontolásból következően (6. ábra) a felhajtóerő irányába eső indukált sebesség összetevőt az alábbi módon számítható:

$$v_L = W_0 \cdot \sin(\varphi - \varphi_0) \quad (10)$$

Az ábrán egyébként háromféle eredő sebesség látható. A középső, index nélküli (W) a profil eredő sebessége. Ezt a kerületi sebesség és a repülési sebesség eredőjeként számított (alap) eredő sebesség (W_0) segítségével fejezhetjük ki:

$$W = W_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) - u_D \quad (11)$$

Írjuk fel az ábrán látható légellenállás összetevőt (dD) az impulzus tétel segítségével (6. ábra):

$$dD = d\dot{m} \cdot (2 \cdot u_D) = \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot W \cdot \sin \varphi \cdot (2 \cdot u_D) \quad (12)$$

Írjuk fel ugyanezt az erő összetevőt a lapelem elmélet segítségével. A lapátszám (jele: B) figyelembe vételével írható:

$$dD = B \cdot c_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot c \cdot dr \quad (13)$$

A lapelem és impulzus tétel egyesítésének első kapcsolati egyenlete tehát (a jelen közelítésben) a következő:

$$\rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot W \cdot \sin \varphi \cdot (2 \cdot u_D) = B \cdot c_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot c \cdot dr \quad (14)$$

Fejazzuk ki az (14) kapcsolati egyenletből a légellenállás irányú indukált sebesség összetevőt:

$$u_D = \frac{B \cdot c}{8 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{c_D}{\sin \varphi} \cdot W \quad (15)$$

Helyettesítsük be a (15)-öt a (11)-be, illetve fejazzuk ki innen az alap eredő sebességet (W_0):

$$W_0 = \frac{W}{\cos(\varphi - \varphi_0)} \cdot \frac{\frac{8 \cdot \pi \cdot r}{B \cdot c} \cdot \sin \varphi + c_D}{\frac{8 \cdot \pi \cdot r}{B \cdot c} \cdot \sin \varphi} \quad (16)$$

Határozzuk meg a második kapcsolati egyenletet is. Ebben az esetben a felhajtóerőt írjuk fel az impulzus tétel és a lapelem elmélet segítségével:

$$dL = d \dot{m} \cdot (2 \cdot v_L) = \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot W \cdot \sin \varphi \cdot (2 \cdot v_L) = B \cdot c_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot c \cdot dr \quad (17)$$

A (17) kifejezés utolsó egyenlőség jelének két oldalán látható a keresett kapcsolati egyenlet. Ebből az egyenletből, (10) felhasználásával, illetve a lehetséges egyszerűsítések elvégzése után az alábbi kifejezést kapjuk:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot [2 \cdot W_0 \cdot \sin(\varphi - \varphi_0)] = \frac{W}{2} \cdot B \cdot c \cdot c_L \quad (18)$$

Helyettesítsük be a (18)-ba az alap eredő sebesség (W_0) (16) szerinti alakját:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot \left[\frac{2 \cdot W}{\cos(\varphi - \varphi_0)} \cdot \frac{\frac{8 \cdot \pi \cdot r}{B \cdot c} \cdot \sin \varphi + c_D}{\frac{8 \cdot \pi \cdot r}{B \cdot c} \cdot \sin \varphi} \cdot \sin(\varphi - \varphi_0) \right] = \frac{W}{2} \cdot B \cdot c \cdot c_L \quad (19)$$

A (19) kifejezés, a lehetséges egyszerűsítések elvégzése után az alábbi formában írható fel:

$$c \cdot c_L - \left[\frac{8 \cdot \pi \cdot r}{B} \cdot \sin \varphi + c \cdot c_D \right] \cdot \tan(\varphi - \varphi_0) = c_L - \left[\frac{4}{\sigma} \cdot \sin \varphi + c_D \right] \cdot \tan(\varphi - \varphi_0) = 0 \quad (20)$$

Ez az egyenlet a számítás alap-egyenlete. Amennyiben (20)-ba a megoldást jelentő (c_L, φ, c_D) érték-hármaszt írjuk be, akkor a kifejezés értéke nulla lesz. Ha azonban a megoldástól különböző értékekkel próbálkozunk, akkor a jobb oldalon nullától különböző értéket (Reziduomot) kapunk:

$$c_L - \left[\frac{4}{\sigma} \cdot \sin \varphi + c_D \right] \cdot \tan(\varphi - \varphi_0) = F \cdot c_{L\infty} - \left[\frac{4}{\sigma} \cdot \sin \varphi + c_D \right] \cdot \tan(\varphi - \varphi_0) = \mathfrak{R} \quad (21)$$

Az (21) felírásánál figyelembe vettük a (33) egyenlettel meghatározott lapátvég veszteséget (lásd a 4.3 alfejezet). A számításban a profil felhajtóerő és ellenállás tényezőjéből indulunk ki. Az ellenállás tényezőt változatlanul hagyjuk, ezzel a ténylegesnél valamivel nagyobb ellenállást veszünk figyelembe. A felhajtóerő tényezőt azonban a lapáton kifelé haladva az „F” lapátvég veszteség tényezővel meghatározott módon csökkentjük – úgy, hogy a lapátvégen mindig nulla felhajtóerő tényezőt kapjunk, hiszen ott felhajtóerő nem keletkezik.

Az (21) egy nemlineáris egyenlet, amelyben azonban a (c_L, φ, c_D) érték-hármas lényegében egyetlen ismeretlent jelent, hiszen a felhajtóerő-tényező és az ellenállás-tényező értéke egyaránt a φ - szög értékétől függ. A numerikus számítást például a Newton-iteráció segítségével végezhetjük:

$$\varphi_{új} = \varphi_{régi} - \frac{\mathfrak{R}}{\left(\frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \varphi} \right)} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \varphi} = & \frac{\partial F}{\partial \varphi} \cdot c_{L\infty} + \frac{\partial c_{L\infty}}{\partial \varphi} \cdot F - \left[\frac{4}{\sigma} \cdot \cos \varphi + \frac{\partial c_D}{\partial \varphi} \right] \cdot \tan(\varphi - \varphi_0) - \\ & - \left[\frac{4}{\sigma} \cdot \sin \varphi + c_D \right] \cdot \left[1 + \tan^2(\varphi - \varphi_0) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

A tényleges számítás elvégzéséhez szükség van a felhajtóerő-tényező és az ellenállás-tényező értékére, melyek különböző változók függvényei (állásszög, Mach-szám, profilvastagság, Reynolds szám stb.).

A lapátvég működési viszonyainak számítása speciális eljárást igényel. A 4.3 alfejezetben leírt lapátvég veszteség számítás módszere szerint ugyanis a lapátvégen mindig nulla a felhajtóerő – és ezzel a v_L indukált sebesség is mindig nulla lesz. Ezért a lapátvégen a fent leírt iteráció nyilván nem alkalmazható. Másrészt az ábrán látható sebességi háromszög is változik (lásd 6. ábra): a $v_L = 0$ miatt a $\varphi_0 = \varphi = \varphi_2$, vagyis a három eredő sebesség (W_0, W, W_2) egy egyenesre esik. Felírható tehát, hogy:

$$W + u_D = W_0 \quad (24)$$

A φ_0 szög minden további nélkül számolható:

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{V}{\Omega \cdot r}\right) \quad (25)$$

Ezzel a helyi geometriai állásszög is meghatározható:

$$\alpha = \beta - \varphi_0 \quad (26)$$

Feltesszük, hogy a lapátvégen felhajtóerő nem, ellenállás viszont keletkezik. Feltesszük továbbá, hogy a lapátvég profil ellenállás tényezője a fenti, geometriai állásszöghöz tartozó ellenállás tényező (c_D), a lapátvégen alkalmazott profil profiljellemezői közül kiválasztható.

Ezután, a (15) kifejezés felhasználásával az alábbi eredményre jutunk:

$$u_D = \frac{B \cdot c}{8 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{c_D}{\sin \varphi} \cdot W \quad \text{és} \quad W = W_0 - u_D \Rightarrow u_D = \frac{\frac{B \cdot c}{8 \cdot \pi \cdot R} \cdot \frac{c_D}{\sin \varphi_0} \cdot W_0}{1 + \frac{B \cdot c}{8 \cdot \pi \cdot R} \cdot \frac{c_D}{\sin \varphi_0}} \quad (27)$$

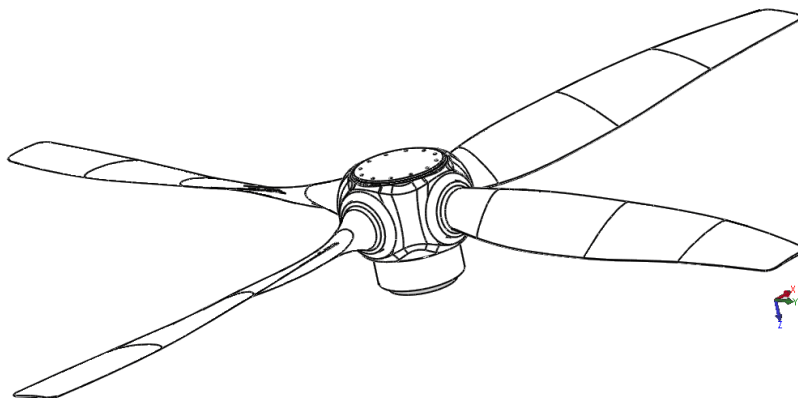
A fenti kifejezésbe a légszavar lapát végének jellemző adatait kell behelyettesíteni, illetve ezzel a lapátvég működési viszonyainak számítása megoldott.

4. A SCHMITZ-FÉLE ELJÁRÁS ALKALMAZÁSA

A Schmitz módszer alkalmazását az elkövetkezőekben fogjuk részletezni, bemutatva hogyan is épül fel az eljárás. A módszer MATLAB környezetben került implementálásra. Először a számításokhoz szükséges információkat határozzuk meg az ismert légszavar geometriából. Ezt követően szintén a geometria adatokra alapozva, felvételre kerülnek a felhajtóerő tényező és ellenállás tényező – állásszög függvények. A műveletek során törekedtünk a valósághűségre, ezért lapátvég veszteséggel is számoltunk, ezzel is közelítve a 3D-s áramlást. Mindezek után részletes bemutatásra kerül a számítási algoritmus felépítése. Végezetül összehasonlításra kerül a kapott eredmény és az ESPOSA társintézmény által rendelkezésünkre bocsájtott specifikáció.

4.1 A légszavar geometria

A számítás elvégzéséhez, első közelítésben, négy különböző információ előállítására vagy meghatározására szükséges. Az első a profil geometria azonosítása a légszavar modellje alapján (lásd. 7. ábra). Ez elengedhetetlen a felhajtóerő tényező és ellenállás tényező állásszög függvényében történő változásának előállításához.

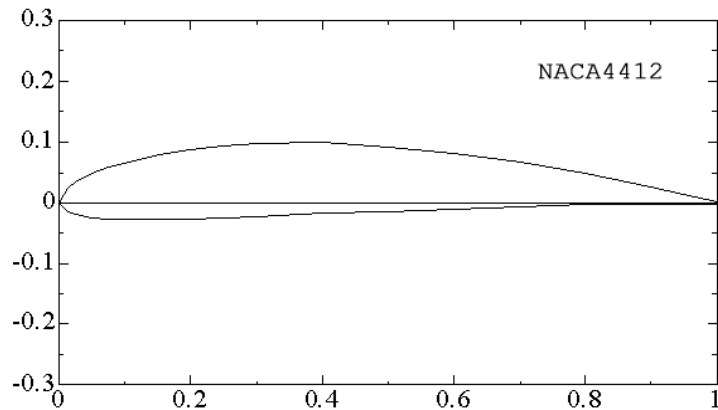


7. ábra A légszavar perspektivikus rajza [8]

A profil azonosítása hasonlósági alapon történt. Metszetek vizsgálatával, megállapítottuk, hogy a profil jól közelíthető a NACA-4412-es számú profillal (lásd 8. ábra). Ez egy igen elterjedt

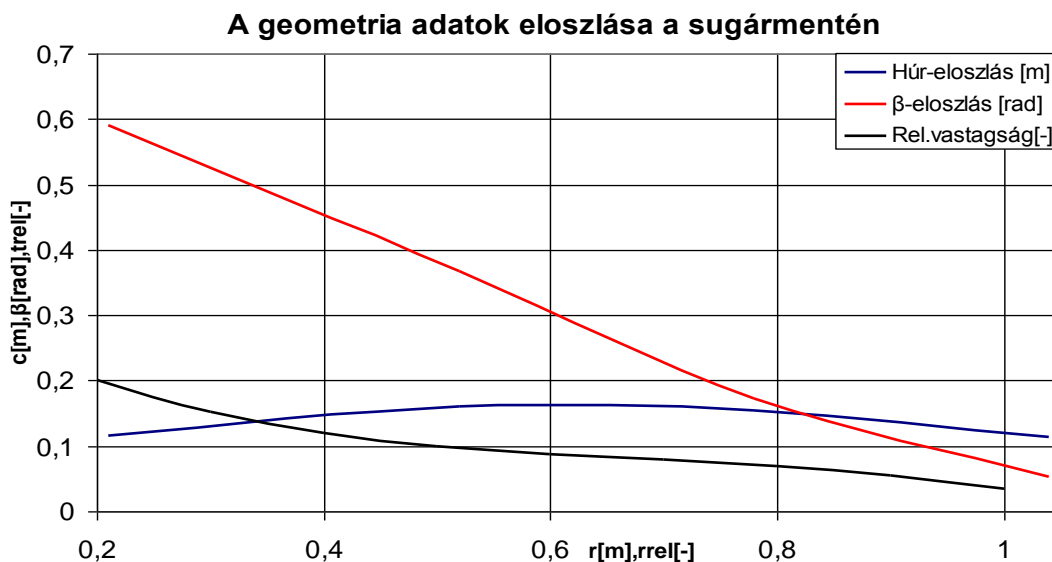
geometria a változtatható beállítási szögű légsavarak között. Mivel ez a légsavar szintén állítható beállítási szögű, így ebből a szempontból is elfogadhatónak tűnik a választásunk.

A profilválasztás után, következő lépésként szükséges megállapítani a húr hossz, a beállítási szög, és a relatív vastagság változását a sugármentén. Kiemelendő, hogy a fenti adatok csak egy adott tartományban szükségesek. Ez az intervallum, a légsavar forgástengelyétől számítva a lapát sugár 20%-tól a lapátvépig tart. Ennek oka az, hogy a lapát bekötési környezetében a profilgeometria jelentősen megváltozik, az itt lejátszódó folyamatok leírása nem szükséges számunkra.



8. ábra A légsavar lapelem típusa – NACA 4412 [6]

A fent említett jellemzőket a CAD rajz metszeteinek vizsgálatával állapítottuk meg, majd ezeket függvényekké alakítottuk az egyszerűbb kezelhetőség és a műveleti automatizálás érdekében. Ezeket a függvényeket a 9. ábra ábrázoltuk. A húr hossz- és a beállítási szög-eloszlás a sugár mentén, a relatív vastagság a relatív sugár ($r_{rel}=r/R$, ahol $R=D/2=1,04$ m) függvényében lett felrajzolva.



9. ábra A geometriai adatok eloszlása a légsavarsugár mentén

A húr hossz eloszlás:

$$c(r) = \frac{q_0 + q_1 \cdot r + q_2 \cdot r^2}{1000} [m] \quad (28)$$

A beállítási szög eloszlás:

$$\beta(r) = \left(a + b \cdot r + c \cdot r^2 + d \cdot r^3 \right) \frac{\pi}{180} [rad] \quad (29)$$

A relatív vastagság eloszlás:

$$t_{rel}(r_{rel}) = x_0 + x_1 \cdot r_{rel} + x_2 \cdot r_{rel}^2 + x_3 \cdot r_{rel}^3 [-] \quad (30)$$

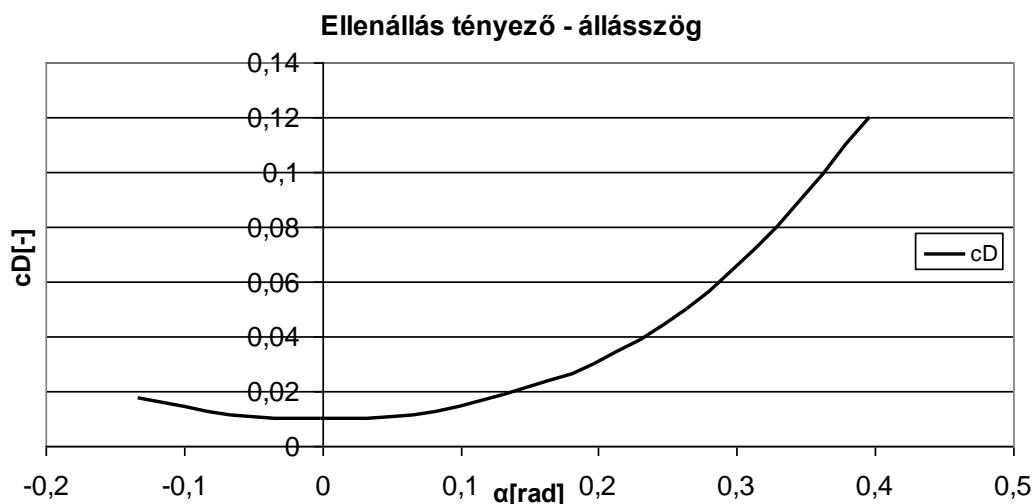
4.2 A felhajtóerő és ellenállás tényezők előállítás

A légcsavarok, illetve szélkerekek aerodinamikai számításához szükség van az alkalmazni kívánt profilok felhajtóerő tényező, ellenállás tényező és nyomatéki tényező eloszlásaira; az állásszög, a Mach szám és a Reynolds szám függvényében. Ezekhez a szerkezetekhez általában különböző vastagságú profilokat alkalmaznak, rendszerint a lapátvégen vékonyak, illetve a tő felé haladva egyre vastagabbak. A lapáttőnél pedig – szilárdsági és merevségi szempontok alapján – már igen vastag, profilnak nem is igazán nevezhető metszeteket alkalmaznak. A lapáttő éppen ezért alapvetően ellenállást termel, vonóerőt nem, ennek részletes aerodinamikai vizsgálatával nem is foglalkozunk [1].

A változó profilvastagság a legtöbb esetben egy, változó vastagságú profil család alkalmazását jelenti. Ilyen profil család a szakirodalomban kevés található, illetve az elérhető profil családok adatai meglehetősen hiányosak. Konkrét tervezési feladat megoldásához választható egy már kifejlesztett profil család, amelynek az esetleg hiányzó adatai valamilyen numerikus módszerrel (pl. XFLR5 program) határozhatók meg [1].

Ebben a munkában, a felhajtóerő és az ellenállás tényezők változásának bemutatásai az állásszög függvényében, a 824-es NACA [7] riportból származnak. Az itt található adatokat mérések segítségével határozták meg, így az időigényesebb elméleti megközelítésű műveletek (lásd. [1]) helyett ez került alkalmazásra. Azonban azt a pontatlanságot el kell fogadjuk, így nem számolunk a propeller sugara mentén a profilvastagság (t_{rel}), a Mach- és Re-szám változásával. Mindazonáltal kimondható, hogy az "aktív" légcsavar sugár – relatív sugárral kifejezve, az az intervallum: $r_{rel}=[0,2; 0,8]$, mely a vonóerő termelés túlnyomó részét biztosítja – tartományban a tényezők változása közelíthető egyetlen felvett $c_L-\alpha$ és $c_D-\alpha$ függvényekkel. Az ellenállás tényező alakulását az állásszög függvényében a 10. ábra szemlélteti. A tényező közelítésére szolgáló polinomot a (31) egyenlet írja le. (Az α radiánban értelmezendő).

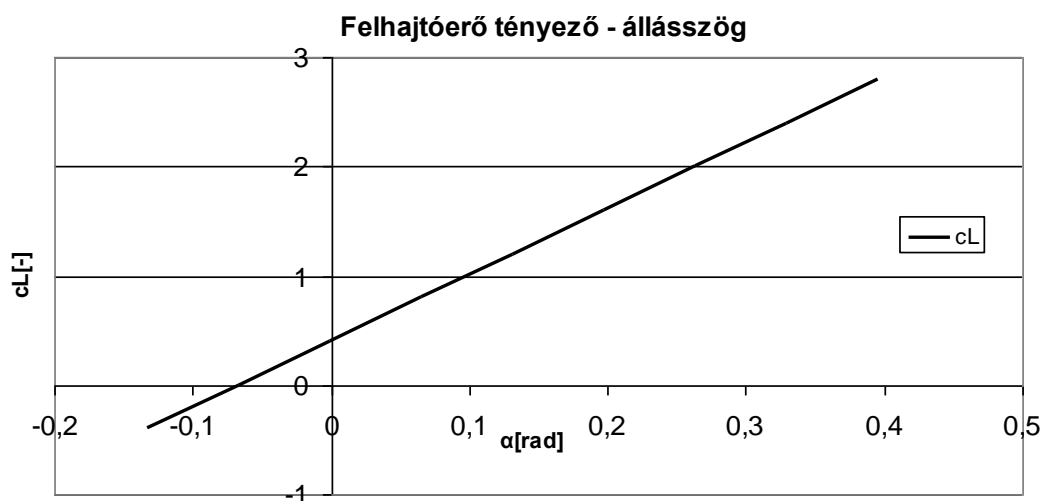
$$c_D = 0,0099931245 - 0,010127944 \cdot \alpha + 0,41481317 \cdot \alpha^2 + 0,78787907 \cdot \alpha^3 \quad (31)$$



10. ábra Az ellenállás tényező – állásszög függvény közelítése (NACA 4412) [7]

A felhajtóerő tényezőt egy egyenessel közelítettük (lásd. 11. ábra). Ennek magyarázata az, hogy azokban a működési tartományokban – utazó repülés – ahol a vizsgálatainkat végezzük, olyan állásszögek fognak realizálódni a légszár sugara mentén, amik a lineáris szakaszára esnek a függvénynek, így eltekintettünk a görbe átesés közelébe eső tartományától. Ebben az esetben a közelítő összefüggést a (32) egyenlet írja le. (Ahogy az korábban is az α itt is radiánban értelmezendő).

$$c_L = 6,052 \cdot (\alpha + 0,06685) \quad (32)$$



11. ábra A felhajtóerő tényező – állásszög függvény közelítése (NACA 4412) [7]

4.3 A lapátvég veszteség figyelembe vétele

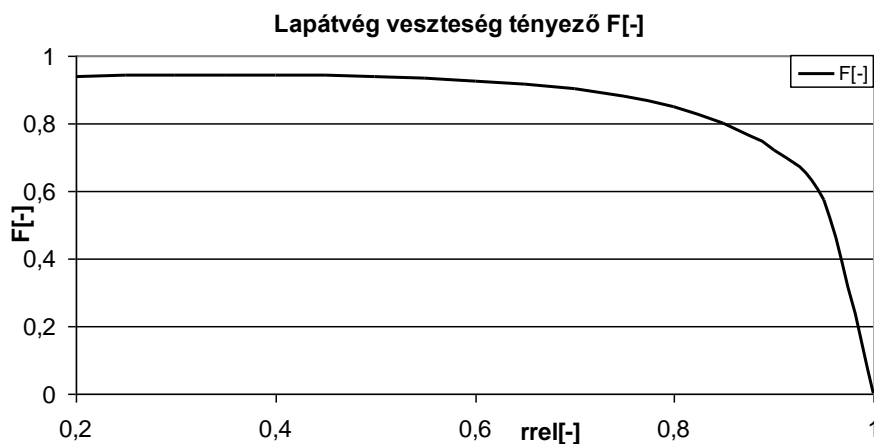
A korábbiakban ismertetett okok alapján a légszár metszet működésének vizsgálatában a karcúság nem kap szerepet, a légerő tényezőket profilmérések szolgáltatják. Ugyanakkor a légszár-lapátok véges hosszúságúak, ezért a körülöttük kialakuló áramlás térbeli, vagyis háromdimenziós [1].

A térbeli áramlás vizsgálatára az örvény-elméletek alkalmasak. Ludwig Prandtl fejlesztett ki egy viszonylag egyszerű összefüggést, amelyet sok munkában mind a mai napig az eredeti formájában alkalmaznak. Ez az összefüggés megadja a kapcsolatot a sík és a térbeli áramlásban értelmezett felhajtóerő-tényező között [1]:

$$c_L = F \cdot c_{L\infty}$$

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-\frac{B}{2} \frac{R-r}{R} \frac{1}{\sin \varphi} \right) \right] \quad (33)$$

A (33)-ban szereplő „ F ”-et lapátvég veszteségtényezőnek nevezzük. Értéke a lapát mentén közel egy, a lapátvéghez közeledve rohamosan csökken és a lapátvégen pontosan nulla. Ezt a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra A lapátvég veszteségtényező alakulása a relatívsugár mentén

A lapátvég veszteségtényező a lapát mentén kifelé haladva a hordozó örvény erősségét csökkenti, úgy, hogy a lapátvégen az pontosan nulla értékű. Az egyesített impulzus-lapelem elméletben a felhajtóerő tényező értékét csökkentjük a fent leírtakkal analóg módon [1].

4.4 A programozott eljárás főbb lépéseinek bemutatása

A Schmitz módszer leírásánál már említettük, hogy a probléma megoldásához szükséges egy numerikus megoldó eljárás készítése. Erre a korábbi fejezetben és a szakirodalmakban Newton-iterációt javasolnak. Ettől azonban eltértünk, de szintén egy numerikus megoldó algoritmus készült. A lényege a következő, a Reziduumot számos állásszög értéken felvéve „feltérképezük”, majd a pontthalmazra függvényt illesztünk, és ennek keressük a gyökeit. A két jellemző között egy könnyen kezelhető parabolikus függvény-kapcsolat áll fenn. A másodfokú polinomnak két gyöke van, matematikailag mindkét eredmény helyes. Azonban a kisebb állásszög érték, ami elfogadható, mivel fizikailag ez realizálódik a tapasztalatok alapján [11].

A numerikus megoldás az alábbi lépéseket valósítja meg:

- állásszög értékeket generál számos pontban (kb. 2500 db);
- $\varphi = \beta - \alpha$, a sebességi háromszög jellemző szögének képzése;
- a külön eljárásokként megírt légerő tényezők és lapátvesztések kiszámítása;
- a Reziduum \Re meghatározása;

- függvényillesztés az összetartozó állásszög és Reziduum \mathfrak{R} értékekből álló pont halmazra;
- a gyökök keresése (MATLAB beépített függvény segítségével: roots (polinom));
- választó logika – a gyökök közül – előállítja a szükséges állásszög értéket.

Természetesen a műveleteink sora folytatódik, mivel számunkra az axiális és tangenciális irányú indukált sebességek meghatározása a cél. A Schmitz – eljárás végeztével azonban felhajtóerő (10) és ellenállás irányú (27) indukált sebességeket kapunk meg. Ezt orvosolandó, egy koordináta transzformációval élve (34), meghatározásra kerültek a szükséges sebesség értékek.

$$\begin{aligned} v_{ax} &= v_L \cdot \cos \varphi - u_D \cdot \sin \varphi \\ u_{tan} &= v_L \cdot \sin \varphi + u_D \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (34)$$

A számításai műveletünk utolsó lépése a "hangolás" az adott üzemállapotra. Ez azért szükséges, mivel nem bocsájtották rendelkezésre az adott repülési helyzetekhez tartozó konstans beállítási szög értékeket. Azonban, a motor teljesítmény felvételét igen. Ennek tudatában a beállítási szöveget addig változtattuk, míg a teljesítmények megközelítő azonosságát nem biztosítottuk. A teljesítmény meghatározását a [11] szerint, numerikus integrálási módszerrel határoztuk meg, a következő két összefüggés alapján:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta r} = B \cdot c_Q \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot c = B \cdot (c_{L3D} \cdot \sin \varphi + c_D \cdot \cos \varphi) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot W^2 \cdot c \quad (35)$$

$$P = \Omega \cdot \sum_{i=1}^n \left. \frac{\Delta Q}{\Delta r} \right|_i \cdot \Delta r_i \quad (36)$$

A fenti képletek eredményei közelítőek, pontosabb eredményre juthatunk, ha más integrálási módot választunk pl. Simpson-formula vagy trapéz-szabály [11]. A saját alkalmazásunkba ez utóbbi módosítást beépítettük.

4.5 A számítási művelet kezdeti feltételeinek megadása és a kiszámított eredmények összevetése rendelkezésre álló adatokkal (Schmitz-féle eljárás – ESPOSA specifikáció)

A műveleteket ebben a munkában, egyetlen működési állapotra – utazó üzemmódra – végeztük el. A számítások alapjául, a következő adatkészletet bocsájtották – lásd 1. táblázat – részünkre az ESPOSA projekt más részvevői:

Az utazó repülés		
Motorteljesítmény	364	kW
Magasság	3048	m
Hőmérséklet	-4,81	°C
Repülési sebesség	112	m/s
Propeller átmérő	2,08	m
Propeller fordulatszám	1950	1/perc
Levegő sűrűség	0,904	kg/m ³

1. táblázat Az utazó repülés számításaihoz szükséges kiinduló adatok

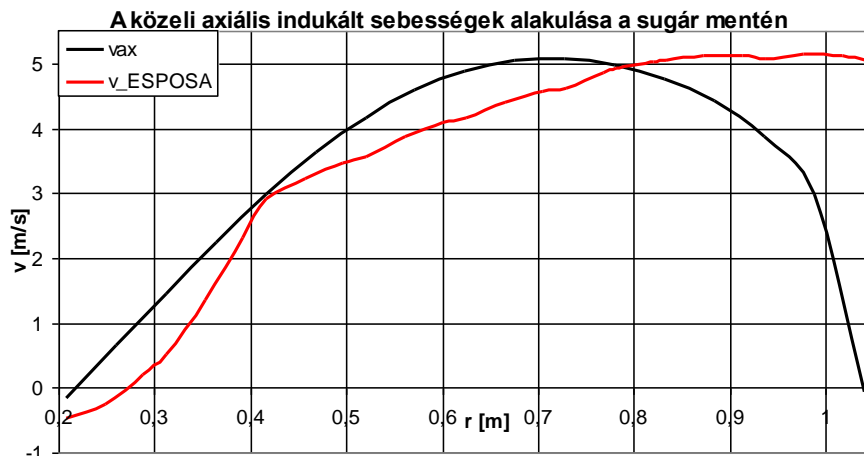
Az 1. táblázat paramétereit alapján, már a korábbi fejezetben leírt eljárás futtatásához, minden

szükséges információ a rendelkezésünk áll.

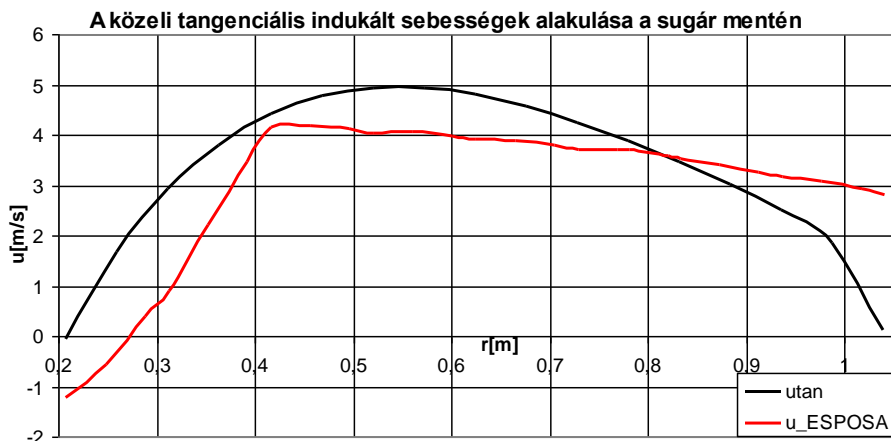
Az utazó üzemmód számítási eredményei

A 13. ábra és 14. ábra szemlélteti a számítási eredményeinket, illetve a rendelkezésünkre bocsátott eloszlásokat. A függvények menetéből jól látszik, hogy ha a lapátvég és környezetétől eltekintünk az adatok közötti maximális eltérés akár $\sim 2,025$ m/s is lehet. A lapátvégen kialakuló sebességi eloszlást megfigyelve, szembeötlő, hogy míg az ESPOSA specifikációja nem számol a lapátvég veszteséggel, addig a saját modellünkénél a szárnyvég irányában – a Prandtl féle tényező által – az indukált sebességek nagymértékben, szinte nullára lecsökkennek. Megjegyzendő, hogy a saját eljárásunk felépítésének kezdeti szakaszában, a számításainkban, még nem szerepelt a szárnyvégi veszteség-tényező, így a modellünk akkori állapota hasonló jelleggel bírt (a függvény-változás tekintetében), mint az ESPOSA-s eredmény. Így kimondható, hogy az eltérés fő okát, a szárnyvég veszteségi korrekció beépítésében látjuk, illetve megállapíthatjuk, hogy ezzel a számításainkat a valóság pontosabb leírásának irányába mozdítottuk el. További eltérést jelenthet az is, hogy a saját eljárásunk nem veszi figyelembe a légsavár tövében, a bekötési környezetben ébredő veszteségeket.

Ezzel szemben számolnunk kell a saját modellünk felépítési hibáival. Ez alatt értendő pl. a légsavár geometriai adatainak – húr-, beállítási szög -, és relatív vastagság eloszlás – CAD modellből történő kiolvasása. Továbbá, a propeller profil típus pontos ismeretének hiánya miatt eltérőek lehetnek a felhajtóerő- és ellenálláserő tényező függvények. Utolsó sorban, mint ahogy azt már korábban is említettük, a kiinduló adatok közül hiányzott az adott működési állapothoz tartozó konstans beállítási szög értéke. Ezek ismeretében pontosabb modell készíthető.



13. ábra A közeli axiális indukált sebességek alakulása a sugár mentén (a saját (fekete) és az ESPOSA specifikáció (piros))



14. ábra A közeli tangenciális indukált sebességek alakulása a sugár mentén (a saját (fekete) és az ESPOSA specifikáció (piros))

A megoldásunk szimulációs programban történő beépítése és korlátai

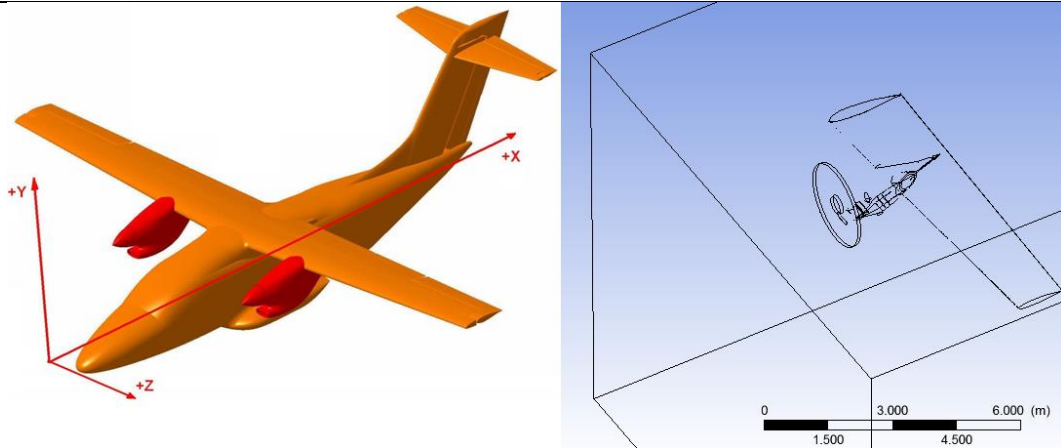
A szimulációs programba való beépítés előtt az eredményeinket alkalmassá kellett tenni az importálásra. Ennek magyarázata érdekében érdemes visszatekinteni az „actuator disc” elméleti bevezetéséhez. A 4. ábra az áramcső mentén mutatja a létrejövő sebesség és statikus nyomás eloszlását. Azonban a felhasznált áramlástan szoftverrel nem tudunk statikus nyomásváltozást és sebesség eloszlást egyszerre definiálni, mivel így egy túlhatározott peremfeltételt kapnánk, ami a számítási műveleteket elvégzését tenné lehetetlenné. Probléma kiküszöbölése/átalakítása érdekében azt tételeztük fel, hogy a légsavartárcsából kilépő axiális sebesség: $V+v$ helyett, számoljunk az indukált sebesség kétszeresével: $V+2v$, azaz a távoli indukált sebességgel (a tangenciális sebességek vonatkozásában is $2u$, azaz távoli tangenciális indukált sebességet építettük be).

5. AZ „ACTUATOR DISC” MÓDSZER ALKALMAZÁSA A „BE-2 TRACTOR” MODELLJÉN

Az indukált sebességek meghatározását követően összeállítottunk egy CFD modellt. Az elkövetkezőkben bemutatjuk a szimuláció felépítésének főbb lépéseit azaz, a hálózást, az anyagtulajdonságok, perem feltételek és megoldó beállítások definiálását, illetve az eredmények értékelését. Mint hogy azt már korábban jeleztük, a vizsgálatainkat egyetlen üzemállapotra – utazó repülésre – végeztük el.

5.1 A modellalkotás

A légsavaros repülőgép 3D-s CAD rajza a 15. ábra baloldalán látható. Ezzel szemben, a szimulációhoz készített áramlási tér modellje – mely a gép adott szegmensének az áramlási tartományból történő kivonásával képeztük – az ábra jobb oldalán látható. A számítógépi kapacitásigény csökkentése érdekében szimmetria-feltétellel éltünk (bár a légsavár hatása miatt ez egy jelentős közelítés jelent), illetve a légsavart egy vékony tárcsa helyettesíti, az „actuator disc” metodikának megfelelően (lásd. 15. ábra).



15. ábra A BE-2 Tractor CAD [8] és CFD modellje [10]

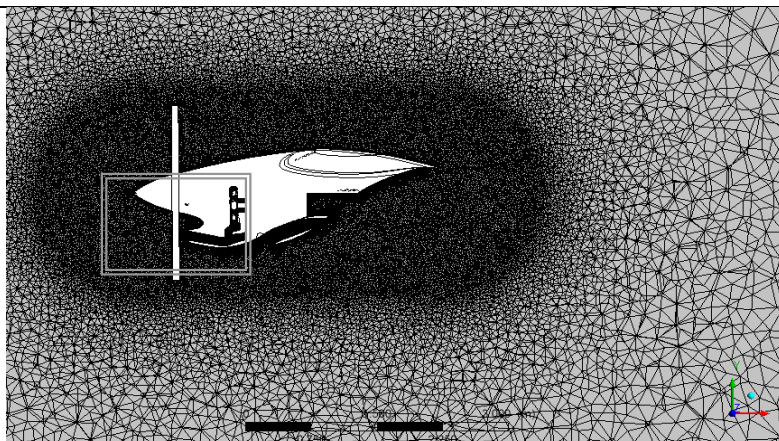
5.2 A hálózás

A fent említett áramlási tér a programba történő importálását követően elkészítettük a geometria diszkretizációját, azaz véges számú térfogat-elemre való bontását (lásd 16. ábra). Ha az áramlás álló fal mentén történik, a falon a közeg sebessége (a tapadás törvénye értelmében) zérus, attól távolodva rohamosan növekszik. Ennek érdekében a szerkezet felületeinek irányába besűrítettük a hálót, ami elengedhetetlenül szükséges a megfelelő számítási pontosság elérésének érdekében [3]. A már behálózott áramlási tartomány egy adott metszetének kinagyított képét a 17. ábra mutatja. A határréteg hálózást, pedig az itt téglalappal kijelölt szegmensének nagyított ábrája szemlélteti.

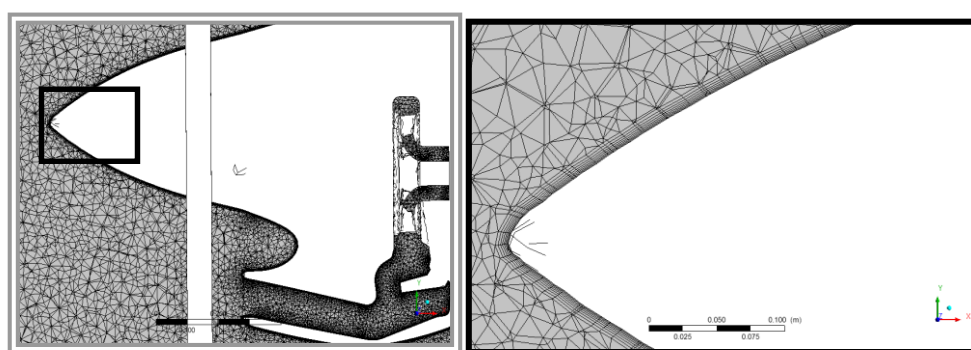
A dimenziótlan faltávolság

A hálózási művelet, egyik kiemelkedően fontos és vizsgálandó része a dimenziótlan faltávolság (y^+). Ennek jelentősége abban rejlik, hogy a határrétegben a logaritmikus faltörvényt milyen érvényességi feltétel mellett használjuk, milyen közelítést alkalmaz a szoftver. A határrétegben lezajló folyamatokat modellezésére kétféle közelítés létezik, a „*Wall Function Approach*” és a „*Near-Wall modell Approach*” (ezen cikk keretein belül a határréteg-modellek pontos ismeretése nem volt célunk). A program automatikusan alkalmazza az elkészült háló és az áramlás tulajdonságai alapján azt, hogy melyik közelítést célszerű figyelembe venni. Az y^+ értékének ellenőrzésére természetesen csak a számítás lefuttatása után kerülhet sor. Az eredményeknek a hálómérettől és a határréteg-felbontástól függetlennek kell lennie, azonban ennek ellenőrzésre időbeli korlátok és terjedelmi okok miatt nem került sor.

Az elkészített háló tulajdonságai a következők. Az alkalmazott csomópontok és elemek száma rendre 2537796 és 10843829.



16. ábra Az áramlási tér egy metszetének behálózott képe



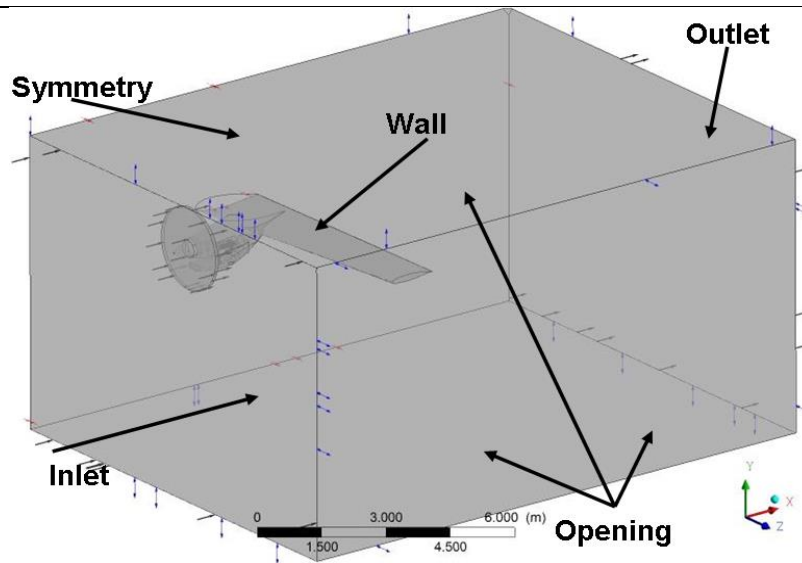
17. ábra A 16. ábra kijelölt része és a keretezett részen a határréteg hálózás

5.3 A peremfeltételek definiálása

A modell kialakítása olyan, hogy további szerkezeti elemek – pl. olajhűtő, szívócsatorna, jég-telenítő – vizsgálatát is lehetővé teszi. Azonban e cikk keretein belül csak a légszavas repülőgép körül kialakuló áramlás vizsgálatához szükséges peremfeltételek bemutatására szorítkozunk. Az analízis beállításai során a tér anyagtulajdonságait ideális gázként értelmezett levegőnek állítottuk be. A referencianyomás 94091,5 Pa, az ettől eltérő nyomás peremfeltételeket relatív nyomásként definiáltuk ott, ahol ennek megadása szükséges volt. A hőtranszport beállítási lehetőségei közül a „Total Energy”-t választottuk. A turbulencia modellt Menter SST⁷ módszere alapján állítottuk be. Az előírt peremfeltételek tartományait a 18. ábra mutatja be, értékeit a 2. táblázat foglalja össze. A 19. ábra pedig az „actuator disc” felületelemre definiált peremek elhelyezkedéséről szolgáltat információt.

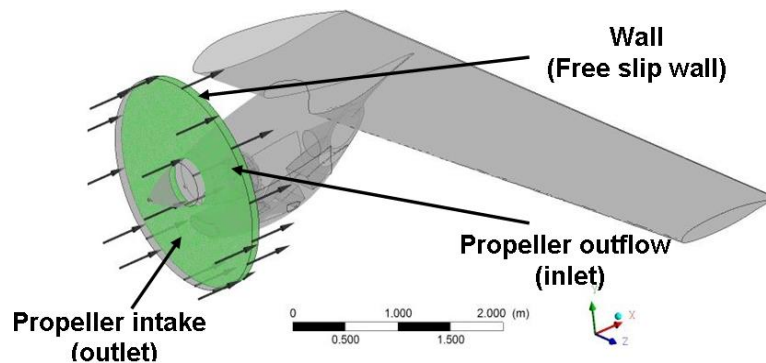
Boundary/Perem	Nyomás [Pa]	Hőmérséklet [K]	Sebesség [m/s]
Inlet - belépés	$p_{\text{stat, ref}}=0$	$T_{\text{stat}}=273,15$	112
Outlet - kilépés	$p_{\text{stat, ref}}=0$	$T_{\text{stat}}=273,15$	-
Symmetry - szimmetria	-	-	-
Opening - nyitott perem	$p_{\text{entrainment}}=0$	$T_{\text{opening}}=273,15$	-
Wall - szilárd fal	No slip wall – fal tapadási feltétellel		

2. táblázat Az áramlási tér felületei mentén definiált peremfeltételek



18. ábra Az áramlási térre előírt peremfeltételek (Inlet: belépés, Outlet: kilépés, Opening: nyitott perem, Symmetry: szimmetria feltétel és Wall: szilárd fal perem)

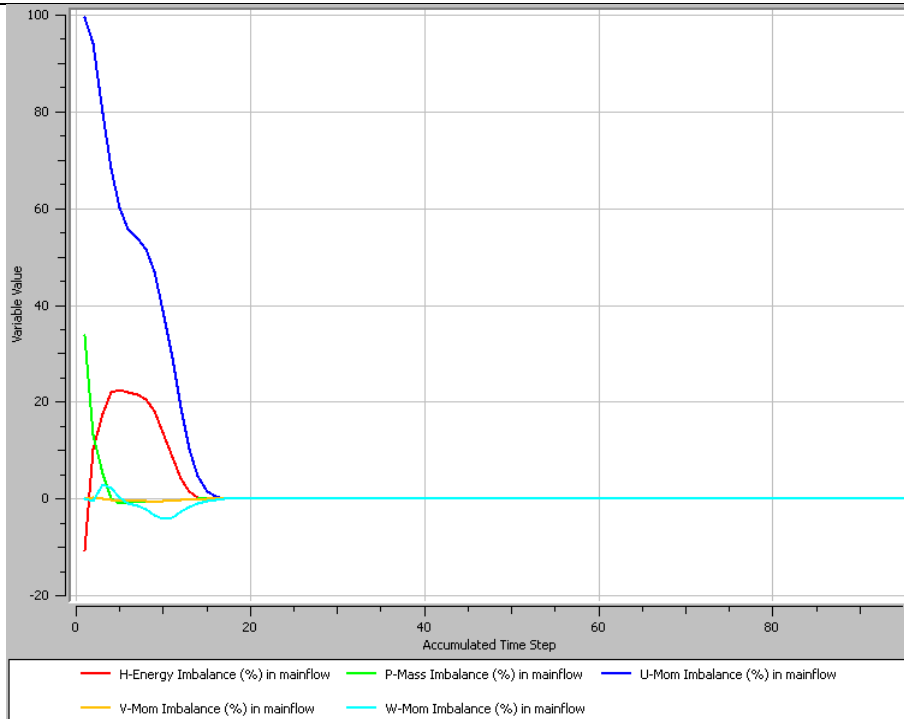
A korábbiakban, a propeller sugár mentén, meghatározott indukált sebességeket a légsavár „tárcsa” felületén, lokális henger koordináta rendszerekben definiáltuk a sugár függvényében (axiális irányban $(V+2v)(r)$ tangenciális irányban $2u(r)$), ellenkező előjellel a be-, illetve a kiáramlási felületeken axiális irányban.



19. ábra A légsavarra – az „actuator disc”-re – definiált peremfeltételek elhelyezkedése

5.4 A „Solver” futtatása

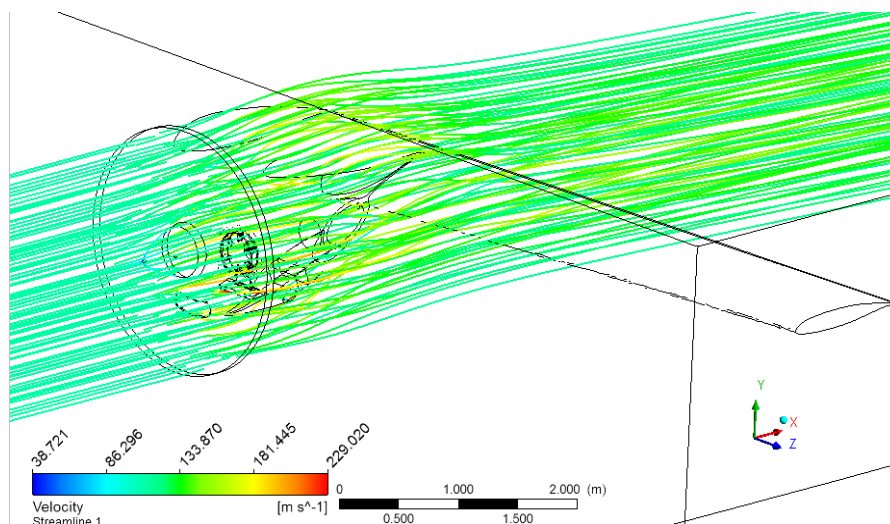
A „Solver”, a megoldó, az egyenleteket iteratívan oldja meg. A szimuláció indítása előtt, megadtuk a maximális iterációk számát, illetve, hogy milyen konvergencia-kritérium esetén álljon le a számítási folyamat. A program sikeresen lefutott, konvergens eredményt kaptunk. Az egyenletek maradék-tagjainak értéke („imbalance”-ok) beálltak közelítőleg zérusra (lásd 20. ábra). Ezt követően, a további futtatások már nem okoznának érdemleges változásokat az eredményekben.



20. ábra A numerikus áramlási számítás konvergencia görbéi

5.5 A számítási eredmények bemutatása

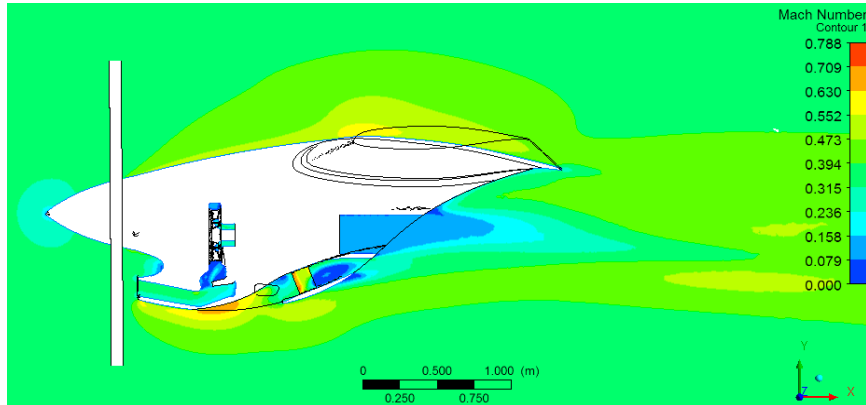
A program futtatását követően vizsgálhatóak az eredmények, azaz következik a CFD-Post (poszt-processzálás). A 21. ábra szemléletesen mutatja a légsavarhoz, azaz az „actuator disc”-hez érkező levegő-áramot, annak mozgásállapotát a kétszeres indukált sebességek hozzáadásával változtatja meg. A közeg a szárny felső részénél a konvex áramlásnak megfelelően felgyorsul, miközben a nyomása lecsökken (a nyomás-eloszlást ld. a 23. ábra).



21. ábra A légsavarhoz érkező és attól távozó közeg áramképe az áramlási térben

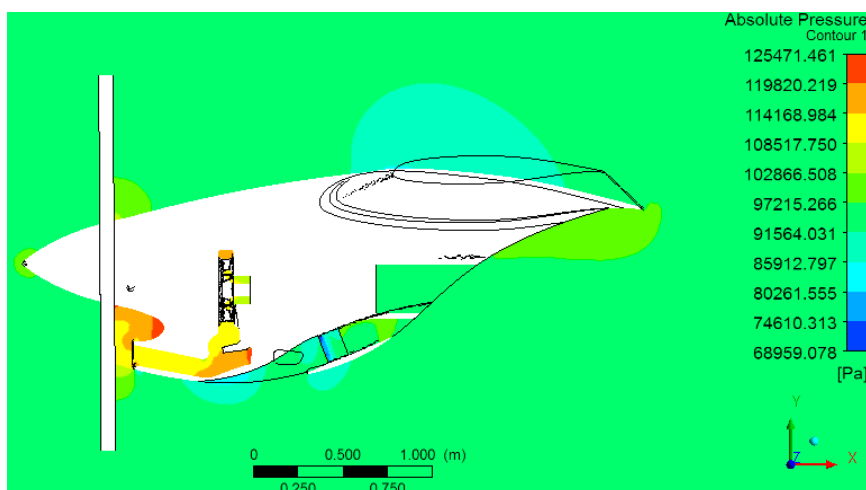
A Mach-számok vizsgálatával folytatva (lásd 22. ábra), a következő ábra szintén szemléletesen mutatja a konvex áramlási képet a szárny felett, továbbá az orrkúpon kialakuló torlópontot. A

hajtóműből kilépő munkaközegről elmondható, hogy alacsony sebességgel hagyja el a fűvőcsövet, ezért az itt definiált peremfeltételek pontos értéke további egyeztetésre szorul az ESPOSA-s partner-intézményekkel. A belső szerkezeti elemek szempontjából fontos, hogy a gondola alján található olajhűtő egy leválási zónában van. Ezért, erre különös figyelmet kell fordítani majd a jelenlegi konfiguráció továbbfejlesztésekor.



22. ábra Az áramlási tér Mach-szám eloszlása a hajtómű keresztmetszetét magába foglaló síkban

A 23. ábrán a statikus nyomáseloszlás látható szintén a hajtómű keresztmetszetét magába foglaló síkban. A nyomásértékek megfelelnek az elvárásainknak, azonban a légcsavarsík és a hajtóműgondola között jelentős statikus nyomásnövekedés figyelhető meg. Ennek oka az, hogy a légcsavarsíkot elhagyó áramlási sebesség nagyságának és irányának biztosítása érdekében nagyobb torlóponthoz vezet el a perem ezen részén, ami megemeli a statikus nyomás értékét is. A valóságban azonban nem homogén a légcsavarsíkot elhagyó sebességeloszlás, mert a hajtóműgondola torló hatása eltéríti a légcsavarsíkról lelépő levegőáramot (sebességvektorokat). E tények ismeretében mindenképp szükséges további vizsgálatok (pl. más számítási módszer: forgó áramlástan, illetve mérés) elvégzése a szimulációs közelítés pontosságának, hibájának meghatározására.



23. ábra Az áramlási tér statikus nyomás-eloszlása a hajtómű keresztmetszetét magába foglaló síkban

Megjegyzendő, hogy ebben a munkában a hálópáraméter érzékenységi vizsgálat nem történt meg, de a későbbiekben ezt el kell végezni, mivel a pontos szimulációk biztosításához elengedhetetlen.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az ismertett kutatási projekt keretében implementáltunk egy számítási módszert a légsavar hatásának modellezésére MATLAB környezetben abból a célból, hogy annak eredményeit repülőgép körüli áramlások modellezésére alkalmazhassuk „actuator disc” közelítés esetén CFD szimulációkban. A légsavar-számítási eljárás Schmitz módszerén alapul, amelyben felhasználtuk Prandtl lapátvég-veszteség számítására alkalmas összefüggését. Az eredmények jó egyezőséget mutattak az ESPOSA-s társintézmények által rendelkezésünkre bocsájtott indukált sebességeloszlással. A forgó áramlási teres módszerhez képest, - a számítógép kapacitásigény-csökkentésére - az 1D-s (sugár menti) számítás eredményeit egy numerikus áramlástan környezetbe elkészített modellbe implementáltuk „actuator disc”-es közelítés alkalmazása mellett. A konvergencia számítás elérését követően megállapítottuk, hogy az eredmények közelítik a valóságos értékeket, azonban az „actuator disc” áramlási térbe belépő peremen megadott sebesség-eloszlás nem veszi figyelembe a hajtóműgondola hatását. Olyan torlóponti nyomás alakul ki a peremen, ami jelentősen megnöveli a lokális statikus nyomást a légsavar kilépő síkja és a hajtóműgondola között. Ennek következtében további vizsgálatok (pl. más számítási módszer: forgó áramlástan teres, illetve mérés) szükségesek a közelítés pontosságának, hibájának meghatározására. További vizsgálatokat igényelnek a CFD szimulációk egyéb beállítási paraméterei és a hálóméret érzékenysége, amelyekre ez idáig idő-, kapacitás- és terjedelemtorlátok miatt nem került sor. Mindezeket követően, ha már megfelelő, validált numerikus áramlástan eredmény és modell áll rendelkezésünkre, elkezdődhet a szívócsatorna és a hajtóműgondola analízise, majd továbbfejlesztése.

JELÖLÉSJEGYZÉK

Latin betűk, jelölések:

- V : a légsavarhoz érkező zavartalan levegőáram sebessége [m/s];
- v : a közeli axiális irányú indukált sebesség [m/s];
- v_3 : a távoli axiális irányú indukált sebesség [m/s];
- x : az egy dimenziós impulzus elmélet felvett koordinátája [m];
- p_0 : a belépő keresztmetszet nyomása [Pa];
- p_1 : a légsavartárcsa előtti nyomás [Pa];
- p_2 : a légsavartárcsa utáni nyomás [Pa];
- p_3 : a kilépő keresztmetszet nyomása [Pa];
- R : a légsavar sugár [m];
- A_1 : a légsavartárcsa belépőoldalának keresztmetszete [m²];
- A_2 : a légsavartárcsa kilépőoldalának keresztmetszete [m²];
- A : a légsavartárcsa keresztmetszete [m²];
- \dot{I}_0 : a belépő keresztmetszet impulzus vektora [kg · m / s];
- \dot{I}_3 : a kilépő keresztmetszet impulzus vektora [kg · m / s];
- T : a közeg idegen testre gyakorolt erőhatása [N];
- \dot{m} : a közeg tömegárama [kg/s];

- v_L : az indukált sebesség felhajtóerő irányú komponense [m/s];
- u_D : az indukált sebesség légellenállás irányú komponense [m/s];
- W_0 : a profil alap eredő sebesség [m/s];
- W : a profil eredő sebesség [m/s];
- U : a profil kerületi sebesség [m/s];
- r : az adott lapelem metszékhez tartozó légcsavarsugár értéke [m];
- B : a légcsavar lapátok száma [-];
- c : a profil húrhossza [m];
- dD : a légellenállás [N];
- dL : a felhajtóerő [N];
- dR : az eredő légerő [N];
- c_D : a légellenállás tényező [-];
- c_L : a felhajtóerő tényező [-];
- \mathfrak{R} : a Reziduum [-];
- t_{rel} : a profil relatív vastagsága [-];
- r_{rel} : a relatív légcsavarsugár [-];
- F : a Prandtl-féle lapátvég veszteségtényező [-];
- v_{ax} : a közeli axiális irányú indukált sebesség [m/s];
- u_{tan} : a közeli tangenciális irányú indukált sebesség [m/s];
- $c(r)$: a húr eloszlás [m];
- $t_{rel}(r_{rel})$: a relatív vastagság eloszlás [-];
- P : a légcsavar teljesítménye [W];

Görög betűk, jelölések:

- ρ : a közeg sűrűsége [kg/m³];
- φ : a profil sebességi háromszögének jellemző szöge [rad];
- φ_0 : a profil sebességi háromszögének jellemző alap szöge [rad];
- α : a profil állásszöge [rad];
- β : a profil beállítási szöge [rad];
- σ : a befedési tényező [-];
- Ω : a légcsavar szögsebessége [rad/s];
- δ : a profil siklőszöge [rad];
- $\beta(r)$: a beállítási szöge eloszlás [rad];

Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. GAUSZ Tamás: Légcsavarok, egyetemi jegyzet, BME, Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, 2011, url: http://rht.bme.hu/letoltesek/Dr.Gausz%20Tamás%20anyagai/Legcsavarok/LEGCSAVAROK_konyvecske_2013.pdf (2013.01.17)
- [2] <http://www.esposa-project.eu/en/efficient-systems-and-propulsion-for-small-aircraft-2.html>
- [3] TOKAI Balázs: Légcsavaros repülőgép numerikus áramlástan szimulációs lehetőségeinek vizsgálata, BSc szakdolgozat, BME, Repülőgépek és Hajók Tanszék, Budapest, 2012
- [4] WAH Keng Tian: Unmanned Air Vehicle (UAV) Ducted Fan Propulsion System Design and Manufacture, BSc thesis, National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, 2010, url: [http://dynamicslab.mpe.nus.edu.sg/dynamics/thesis0910/Unmanned%20air%20vehicle%20\(UAV\)%20ducted%20fan%20propulsion%20system%20design%20and%20manufacture.pdf](http://dynamicslab.mpe.nus.edu.sg/dynamics/thesis0910/Unmanned%20air%20vehicle%20(UAV)%20ducted%20fan%20propulsion%20system%20design%20and%20manufacture.pdf) (2013.03.02.)
- [5] <https://www.tu-braunschweig.de/ism/forschung/ag-ftw/projekte/intprop/index.html>
- [6] http://www.geocities.jp/torinani/airfoil_data/naca4412.gif
- [7] Ira H. ABBOTT – Albert E. Von DOENHOFF – Louis S. STIVERS, Jr. : NACA Report No. 824 – Summary of airfoil data, 1945. Január, url: <http://hdl.handle.net/2060/19930090976> (2011.01.14)
- [8] A. EVEKTOR: BE2 Tractor Nacelle and Inlet Design Requirements, BE2_NP_03D_PROPELLER_AV_844_1_e_c_f_r_p.stp
- [9] A.P. VERWEIJ: An investigation in actuator disc CFD solution applicability for aeroacoustic analysis of propellers and rotors. University of Twente, 2010. Július, Capua, Italy, S0096830, url: <http://essay.utwente.nl/60144/1/Verweij.pdf> (2013.03.02.)
- [10] Prof. ROHÁCS József – Dr. GAUSZ Tamás – Dr. VERESS Árpád – BICSÁK György: ESPOSA - WP624 -- BE2-Tractor – BME CFD Analyses, 2012. November 6-8, Prague
- [11] GAUSZ Zsana – GAUSZ Tamás: Gyakorlati számítási módszerek a forgószárnyak aerodinamikájában, XX. Évfolyam, Repüléstudományi Közlemények 2008. 2. szám, HU ISSN 1789-770X, 2008. április 11, Szolnok.