

Rácz Gábor¹ – Veress Árpád²

HÁLÓ- ÉS ANYAGTULAJDONSÁG-ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLAT FORGÓ ÁRAMLÁSI TÉR ELVÉN ALAPULÓ LÉGCSAVAR-SZIMULÁCIÓS MÓDSZER ESETÉN³

Napjaink légiközlekedésében a légszaváros meghajtó-rendszerek vizsgálata aktív kutatási terület, mivel alkalmazásukkal jó propulziós hatásfok érhető el, ami pedig szoros kapcsolatban áll a hatékony tüzelőanyag felhasználással. A légszaváros propulziós rendszerek költséghatékony tervezéséhez azonban elengedhetetlenül szükséges egy jól működő, a szoftverbeállításoktól független számítási eljárás, mely által a szerkezetek vizsgálata elvégezhetővé válik. Ezért a jelen cikk keretében egy kísérleti légszavárháló- és anyagtulajdonság-érzékenységi vizsgálatát végeztük el forgó áramlási tér elvén alapuló légszavar-szimulációs módszer esetén abból a célból, – a paraméterfüggetlenségi vizsgálatok mellett – hogy meghatározzuk az optimális konfigurációt a számítástechnikai kapacitás-szükséglet szempontjából. A tesztesetek vizsgálatához, kiértékeléséhez és összehasonlításához kumulatív relatív hiba-számítást végeztünk.

NUMERICAL ANALYSES AND PARAMETER SENSITIVITY ANALYSES OF THE ROTATING DOMAIN BASED PROPELLER SIMULATION METHOD

Nowadays, the examination of the propeller-driven propulsion systems is the active field of the research and developments due to their high propulsion efficiency and low fuel consumption. However, to design of a propeller-driven system, it is essential to have a well-established, validated and computationally cheap calculation procedure, which can be used independently from the parameter settings of the simulation. Hence, the main goal of the present investigation is to perform sensitivity analyses by means of mesh type, size and material properties in case of rotating domain based CFD simulations for an experimental propeller in order to keep the same results and having the most reasonable computational costs. Cumulative error has been used to ensure the quantitative comparisons of different configurations and to compare the results of different test scenarios with each other.

BEVEZETÉS

A járműiparban a hatékonyság növelése általánosan megfogalmazható célkitűzés. Ez alól természetesen a légi-járművek sem képeznek kivételt, jelentős számú kutatás foglalkozik innovatív módszerek alkalmazhatóságának vizsgálatával [15][16][17].

A meghajtó rendszerek tüzelőanyag fogyasztásának csökkentése és ez által a jármű hatékonyságának növelése, az adott gép típus vonatkozásában, annak piacképességét, továbbá távlati viszonyokat vizsgálva gazdasági sikerességét is jelentheti a gyártó számára.

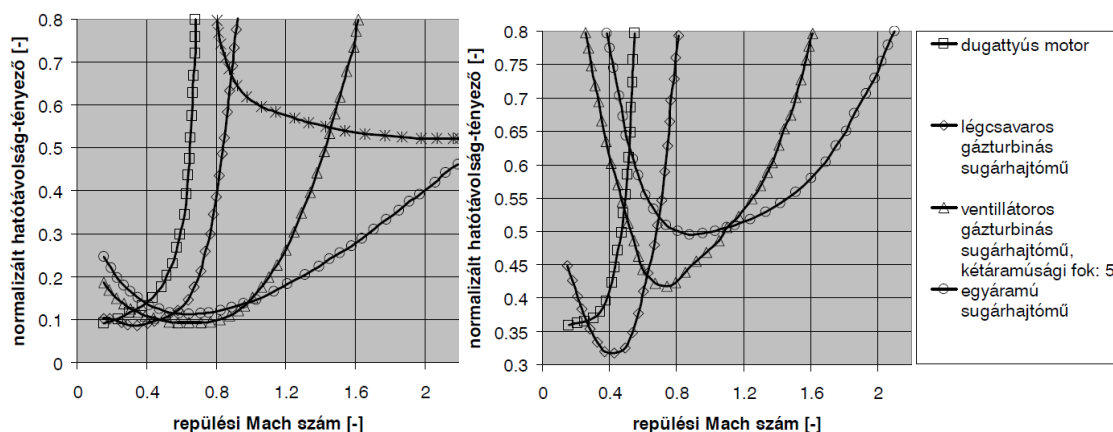
Az adott hajtómű típusok tulajdonságai jól jellemezhetők a normalizált hatótávolság-tényező segítségével, amely a tüzelőanyag és a hajtómű össztömegének, illetve a hajtómű tolóerejének a hajtóműgondola ellenálláserejével csökkentett hányadosa adott repülési sebességen és hatótávolságon. Az 1. ábra két hatótávolságon értékeli ki a normalizált hatótávolság-tényezők ala-

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

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

³Lektorálta: Dr. Varga Béla alezredes, főiskolai docens, NKE Katonai Repülő Tanszék, varga.bela@uni-nke.hu

kulását a repülési Mach-szám függvényében. Az összefüggésből következik, hogy az alacsony értékek a jobbak [1].

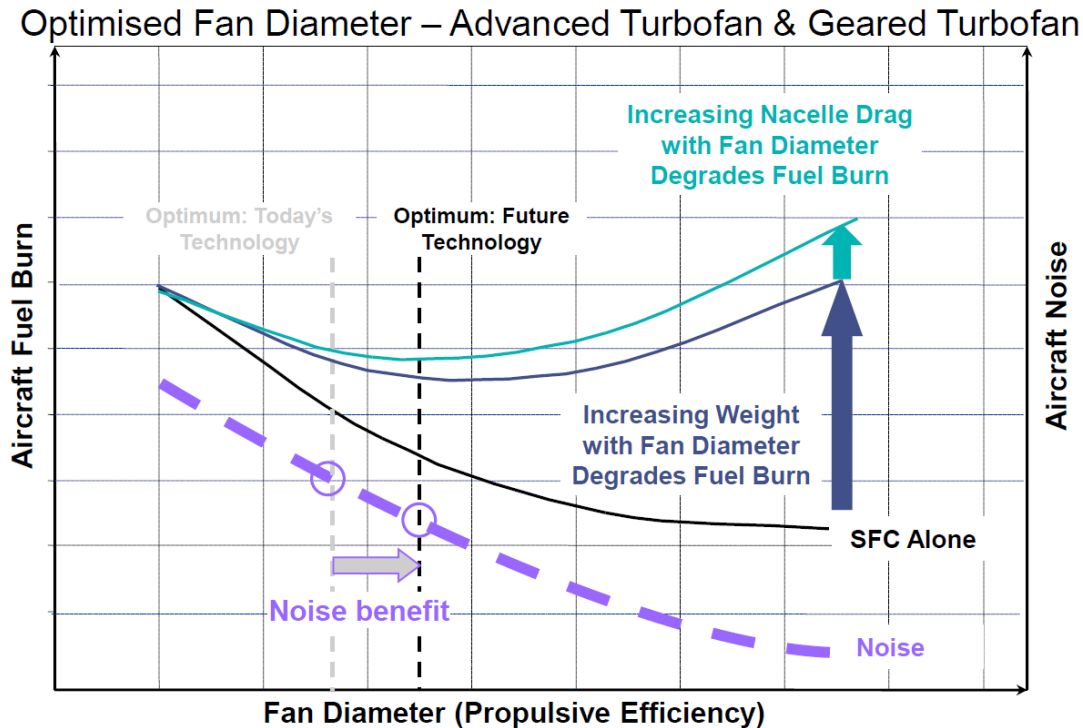


1. ábra A normalizált hatótávolság-tényező a repülési Mach szám függvényében (bal: 8000 [km] és jobb: 1000 [km] hatótávolság esetén) [1]

Jelen cikk keretben elsősorban a kis és a közép hatótávolságú légi járműveket helyezük vizsgálataink középpontjába, ugyanis napjainkban jelentős érdeklődés övezi ezt a tartományt. Ennek okai jól nyomon követhetők az 1. ábrán. Alacsonyabb repülési Mach-számok esetén a hatótávolság-tényező karakterisztikáiról leolvasható, hogy kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkeznek a légszavas dugattyús motorok és a légszavas sugárhajtóművek. Mindkét típusról elmondható, hogy jó propulziós hatásfokkal rendelkezik (80–92%), mely jelentősen hozzájárul az alacsony tüzelőanyag-fogyasztás eléréséhez. Természetesen mindkét rendszer esetén beszélhetünk fizikai korlátokból fakadó hátrányokról is. A légszavas dugattyús motorok esetén a teljesítmény sűrűség problémakörét érdemes kiemelni, illetve azt, hogy a repülési Mach-szám növekedésével növekvő teljesítményigény lép fel, mely a dugattyús motorokra jellemzően a propulziós rendszer homlokfelületének növekedését eredményezi. Ez pedig nagymértékben növeli a hajtóműgondolán ébredő légellenállás nagyságát. A turbólégszavas hajtóművel szerelt járművek – ahogy az ábrán is látható – nagyobb repülési sebességek esetén is alkalmazhatók, azonban ebben az esetben beszélhetünk korlátokról. A repülési Mach-szám és ezzel párhuzamosan a légszavar fordulatszámának növekedésével a légszavarlapátok szilárdságtani igénybevételei jelentős mértékben megnövekednek (húzófeszültség a lapáttőben és vibráció), továbbá a lapátvégeken hangsebesség feletti áramlások kialakulását követően leválások alakulhatnak ki. Ez egy kerülendő üzemállapot, mivel a rendszer hatékonyságát nagyban csökkenti. Továbbá a zajterhelés is megnövekszik, ami polgári repülés viszonylatában jelentős problémát jelenthet.

A nagyobb repülési sebesség elérésének érdekében, illetve az előzőekben említett hátrányok leküzdésére alkalmas meghajtó rendszerek a nagy kétáramúsági fokú hajtóművek (lásd 1. ábra). A ventilátor lapátok köré épített ház és a lapátok kitérítése a vibrációt és a lapátvégeken kialakuló hangsebesség feletti áramlási sebességek kialakulását elkerülendő (illetve ez utóbbit bizonyos esetekben megengedő) megoldást szolgáltat. A módszer hátránya azonban az, hogy a kétáramúsági fok csökkenésével a propulziós hatásfok is csökken a korábbi légszavas repülőgépekhez képest. Ha ennek ellenére nagy kétáramúsági fokot szeretnénk elérni,

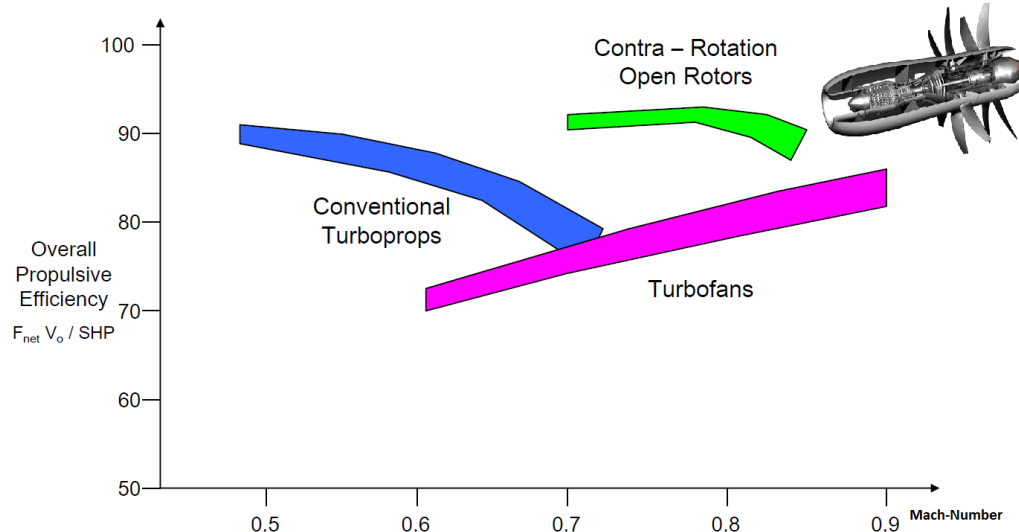
mely a jobb propulziós hatások és tüzelőanyag fogyasztás szempontjából lenne szükséges, akkor a hajtómű gondola ellenállása megnő, mivel a házba foglalt ventilátorlapátok átmérőjének megnövekedésével a rendszer homlokfelülete is megnő. Az említett probléma jól nyomon követhető a 2. ábra segítségével.



2. ábra Az optimális légszárny átmérő vizsgálata dimenziótlan paraméterek segítségével (Zöld és Kék görbék – „Turbofan” hajtóműveket jelölnek) [13]

A nagyobb repülési sebességek elérése és a jó propulziós hatások (alacsony tüzelőanyag-fogyasztás) közötti ellentmondásos kapcsolat feloldását az úgynevezett „Open Rotor, PropFan” légszárny ventilátoros hajtóművek jelentik. Az ilyen rendszerek esetén ugyanis a ventilátor lapátok nincsenek házba foglalva, ezáltal a lapát átmérő növelése nem vonja maga után a tömeg és légellenállás növekedését. A „Turbofan” hajtóművek esetén a jövőben elérhető optimális ventilátor átmérő elmarad az „Open Rotor” rendszerek átmérőjéhez képest, ami ez utóbbi esetén jobb propulziós hatásfokot és alacsonyabb tüzelőanyag fogyasztást eredményez [13].

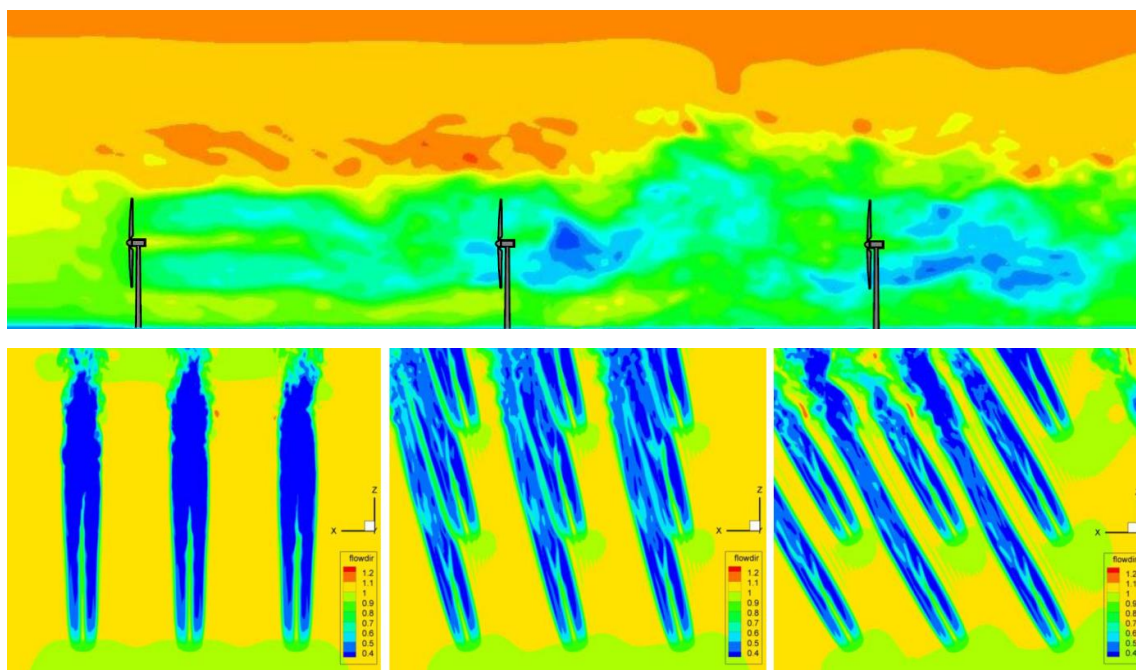
Eddigiekben többször is említett propulziós hatások jellemző értékeit követhetjük figyelemmel a Mach-szám függvényében a 3. ábrán. Megfigyelhető, hogy milyen kiemelkedő tulajdonságokkal rendelkezik az „Open Rotor” rendszer. Mindazonáltal a légszárny ventilátoros hajtóművek örökölték a légszárny problémáit is, mint például a nagyátmérőjű lapátok és a nagy fordulatszám miatt kialakuló vibrációt, a lapáttömbben ébredő nagy húzófeszültséget, továbbá azt, hogy a lapátokkal kölcsönhatásba került áramlás sebessége meghaladhatja a hangsebességet, ami lökéshullámokhoz és leválásos áramláshoz vezethet. Ezen okokból kifolyólag a légszárnyakkal kapcsolatos kutatások napjainkban igen aktívak, hogy feltárják és kiküszöböljék az említett problémák forrásait. Ehhez a témához kapcsolódik a jelen kutatás témaköre is.



3. ábra Különböző hajtómű típusok propulziós hatásfokai a repülési Mach-szám függvényében [13]

Mind az ipar s mind a kutatás-fejlesztés területén jelentős szerepet töltenek be a numerikus áramlástani szimulációk, mivel költséghatékonyak s nem igényelnek jelentős mérőapparátusokat. Mindazon által tény, hogy a szimulációk validációja az eredmények hitelessége szempontjából elengedhetetlen.

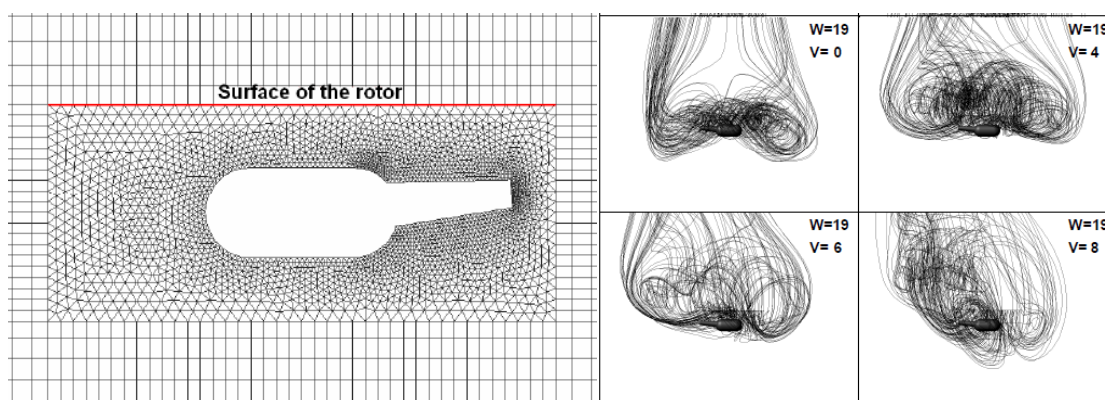
Jelen cikk keretein belül egy kísérleti légcsonal CFD analízisét mutatjuk be. A légcsonalok működésének szimulációja leggyakrabban két módszeren keresztül valósítják meg. Az egyik az „actuator disc” módszer, mely a légcsonalok impulzus elméletének megfelelően a légcsonalvart egy vékony tárcsával helyettesíti.



4. ábra „Actuator disc” módszeren alapuló szélturbina szimulációk (sebesség mezőn szemlélítve az egyes szélturbínák egymásra gyakorolt hatása (a zíniskálán normalizált értékek találhatók, tartományuk minden esetben azonos [0,4, 1,2, m/s]) [2]

Ezen a tárcsára kerül megadásra a légsavar által generált egydimenziós sugár menti sebesség vagy torlóponti nyomás eloszlás, amelyek például az impulzus és lepelem elmélet egyesítésével és Schmitz-módszerének segítségével határozhatók meg. A módszer előnye, hogy számítási kapacitás igénye alacsony, ezáltal komplex rendszerek vizsgálatára is alkalmas. Az „actuator disc” módszer fejlesztése és alkalmazása napjaink aktív kutatási területei közé tartozik. Elsőként egy olyan számítási eredményt emelnénk ki (lásd 4. ábra), amely a szélturbinák sebesség mezejének egymásra gyakorolt hatását vizsgálja és egy mérésekkel is alátámasztott szimulációs sorozatot mutat be [2]. Szintén egy hasonló analízissel foglalkozik a [3] forrás. Kiemelését azért tartottuk fontosnak, mert a vizsgálatokat hálóméret érzékenység vizsgálattal is alátámasztották.

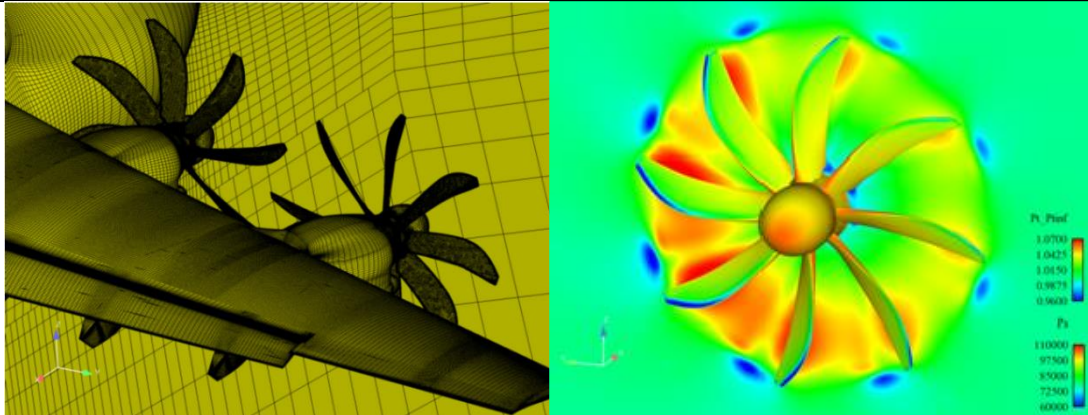
A következő tanulmány egy egyszerűsített helikopter modell CFD analízisével foglalkozik FLUENT környezetben [4]. Az előkészítési folyamat során egy hibrid hálós modellt készítettek (lásd 5. ábra). A szimuláció a korábbiakhoz hasonlóan „actuator disc” módszeren alapszik, ezen belül is a torlóponti nyomásugrást használja fel a rotor működésének szimulációjához. Az 5. ábra bal oldalán a rotor által megzavart közeg áramvonalainak képét láthatjuk különböző repülési üzemmállapotok esetén.



5. ábra Baloldal: a helikopter szimulációjához elkészített hibrid háló; Jobboldal: a rotor által megzavart közeg áramvonalainak képe eltérő üzemmállapotok esetén [4]

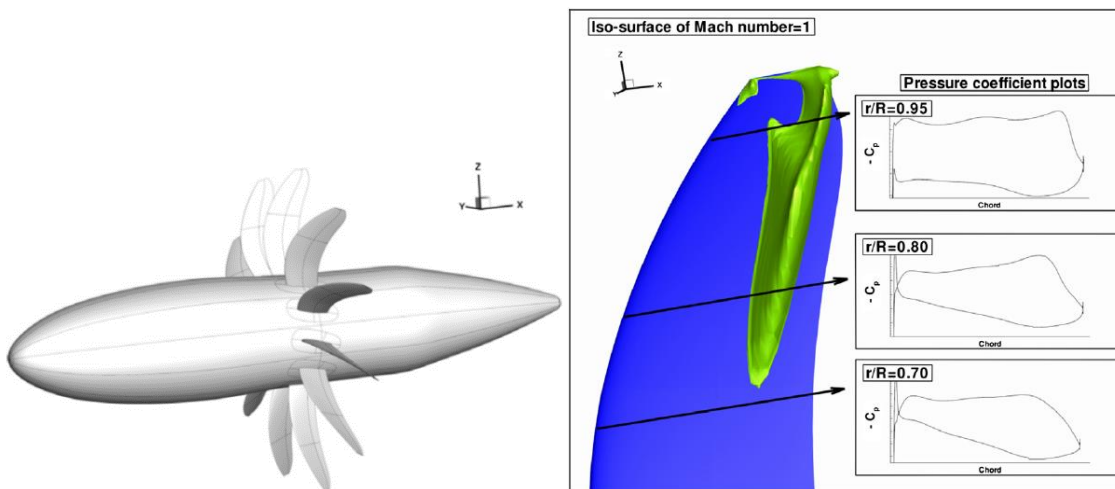
Egy másik szimulációs alternatíva a „rotating domain” (azaz forgó áramlástanai tér) módszer. Ebben az esetben a modell tartalmazza a teljes légsavar geometriát, amely egy valóságosabb szimulációt eredményez, azonban a számítási kapacitás igénye jelentősebb és természetesen a számítási idő is jóval hosszabb az „actuator disc”-es közelítéshez képest.

A „rotating domain” elven alapuló módszerek közül is kiemelnénk két tanulmányt a nemzetközi szakirodalomból. Az első egy ANSYS CFX környezetben kidolgozott szimulációs eljárás, mely az aeroelasztikus jelenségekből származó lapáttérheléseket vizsgálja egy légsavar-ventilátoros hajtóművel szerelt A400M típusú katonai teherszállító repülőgép esetén (lásd 6. ábra) [5].



6. ábra Baloldal: a légsavár-ventilátor vizsgálatához alkalmazott hibrid háló; Jobboldal: a nyomás eloszlások kiértékelése a ventilátor lapátokon és egy adott síkban (skálán a relatív statikus nyomások értékeinek tartománya: $[6 \cdot 10^4, 11 \cdot 10^4 \text{ Pa}]$) [5]

Végezetül légsavár-ventilátoros hajtóművel szerelt szállítógép vizsgálatán alapuló kutatási eredményt mutatunk be (lásd 7. ábra). Ebben az esetben egy teszt geometriát alkalmaztak az eljárás egyszerűsítése érdekében [6]. Az analízis célja többek között a transzónikus lapátok által keltett zaj szimulációja volt. Megjegyzendő, hogy a légsavár-ventilátoros hajtóművek esetén a zaj analízise és annak csökkentési lehetőségeinek feltárása napjaink aktív kutatási területei közé tartozik.



7. ábra Baloldal: a légsavár-ventilátoros konfiguráció CAD modellje; Jobboldal: „Iso-surface” megjelenítést alkalmazva a lapát mentén kirajzolódó lokális hangsebességet elérő zóna [6]

Jelen tanulmányban a „rotating domain” szimulációs módszert alkalmaztuk és vizsgáltuk meg részletesen. Egy szimuláció elkészítése során a realitásra való törekvés mellett a hatékonyság, azaz gyorsan értékelhető eredményt generáló módszer kidolgozása is elsődleges szempont. Esetünkben a vizsgálat többlépcsősnek tekinthető. Elsőként két olyan modellt hasonlítottunk össze egymással, melyek közül az egyik figyelembe veszi a közeg összenyomhatóságát és az energia egyenletet (azaz a hőmérséklet változását), a másik ezzel szemben a szimulációs hatékonyság növelése érdekében eltekint a korábban említettektől. Folytatásként, megvizsgáltunk két olyan modellt, melyeket eltérő geometriai diszkretizációs módszerek segítségével hoztunk létre. A vizsgálataink sorát egy háló méret érzékenységi vizsgálat zárja, mely által rálátásunk nyílik arra, hogy az eredményeket mennyiben befolyásolja az elkészített háló mérete.

Jelen analízis-sorozat egy olyan átfogó kép kialakításához vezet, mely alapján biztos módszerekkel készíthetjük el egy hasonló működési feltételek mellett üzemelő légsavár numerikus áramlástanai szimulációját. Megjegyzendő azonban az, hogy a méréseken keresztüli validáció a szimulációs eredmények hitelességének ellenőrzése érdekében elengedhetetlenül szükséges.

A numerikus szimulációk elkészítése

A vizsgálataink középpontjában egy kísérleti négylapátos légsavár áll, melynek geometriáját egy partner-intézmény biztosította a számunkra (TU Delft⁴). A szélcsatornás vizsgálatokhoz alkalmazott kísérleti berendezés 3D-s modellje a 8. ábrán látható. Egyetlen üzemállapotot vizsgáltunk meg, amelyhez $J=1$ (előrehaladási fok=1) és $V=30$ m/s (repülési sebesség) tartozik. A részletes specifikációkat az 1. táblázat tartalmazza.



8. ábra A szélcsatornás vizsgálatokhoz alkalmazott kísérleti berendezés 3D-s modellje [11]

Teszteset fő paraméterei	
Előrehaladási fok (J)	1 [-]
Zavartalan áramlási sebesség (V)	29,99 [m/s]
Propeller átmérő (D)	0,3048 [m]
Propeller lapátszám (B)	4 [db]
Propeller fordulatszám (n)	5901,9 [RPM]
Hőmérséklet (T)	25 [°C]
Statikus nyomás (p)	101091 [Pa]
Tengerszint feletti magasság (H)	0 [m]

1. táblázat A vizsgált teszteset fontosabb paraméterei

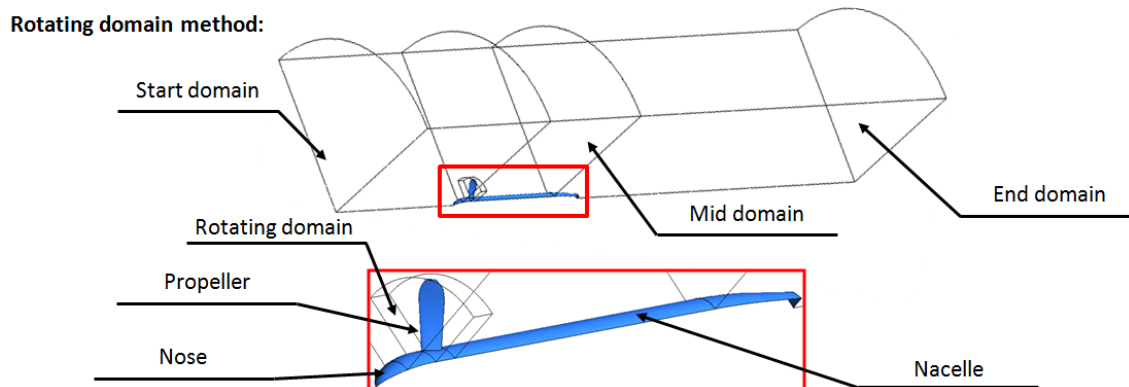
A megfigyeléseinkhez és az összehasonlításokhoz felvettünk egy, a légsavár síkja mögött 56 mm-re található síkot, és e síkban fekvő egy egyenest (lásd 10. ábra). Ezen a síkon és egyenes mentén kerültek kiértékelésre a következő paraméterek: áramlási sebesség, torlóponti nyomás és statikus nyomás, melyek tekintetében kvalitatív és kvantitatív összehasonlításokat is készí-

⁴Delft University of Technology

tettünk. Az eljárások közötti eltérések számszerű kiértékelésére a kumulatív relatív hibát alkalmaztuk (1).

$$\varepsilon = \frac{1}{Z} \int \sqrt{\frac{(p_{i, \text{basic}} - p_{i, \text{examined}})^2}{p_{i, \text{basic}}^2}} dz \quad (1)$$

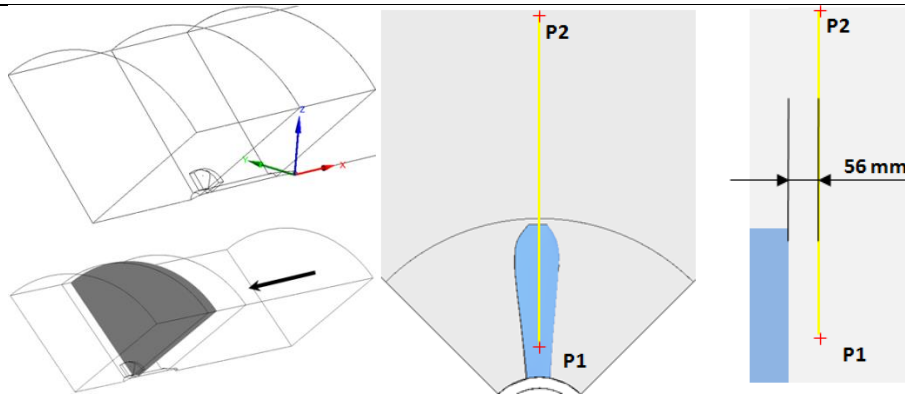
A modell, ahogy az a 8. ábrán is látható, igen egyszerű és letisztult, azonban a perprocesszálás folyamatát geometriai egyszerűsítéssel kezdtük. A megfigyelt síkon és egyenesen a nyomás és a sebesség eloszlásának pontos meghatározásához elégségesnek találtuk egy, a kísérleti berendezés negyedét magába foglaló modellt is (lásd 9. ábra). Továbbá azt is mérlegeltük, hogy milyen hatást gyakorolhat a szélcsatorna a tesztrendszerre. Az előzetes vizsgálatok alapján arra következtetésre jutottunk, hogy eltekinthetünk egy valós csatorna modellezésétől, így a modell hálózás szempontjából egyszerűsödött, mivel ez által nem volt szükség megfelelő mi-



9. ábra Az áramlástani tér modelljének négy alap egysége („Start domain” – Első szekció, „Mid domain” – Középső szekció, „End domain” – Utolsó szekció, „Rotating domain” – Forgó tér) továbbá a szerkezet fő elemei („Nose” – Orr, Propeller és „Nacelle” – Gondola)

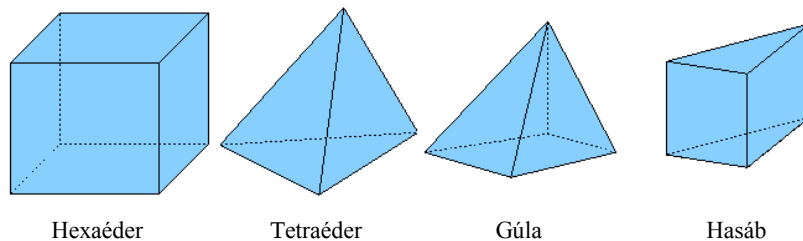
nőségű határréteg háló kialakítására a szélcsatorna fala mentén. Továbbá a negyed-modell jelentette approximáció olyan lehetőséget is biztosított, amely által nagyobb sűrűségű és jobb minőségű hálót tudtunk kialakítani a vizsgált zónában. A 9. ábrán megfigyelhető, hogy az áramlási tér egy álló és forgó térből áll, továbbá az álló teret további részekre bontottuk. Ennek oka az, hogy egy olyan hibrid hálót terveztünk elkészíteni a szimulációhoz, mely a vizsgálat tárgyát képező légsavar és az azt elhagyó légáram nyomában strukturált hálóelemekből áll, a belépő szegmens és a légsavar mögötti távolság pedig strukturálatlan hálóelemekből épül fel.

A háló generálási folyamat minden esetben az ANSYS Workbench 13 szoftver környezetben történt. Ahogy az már a bevezetőben is elhangzott több különböző hálót készítettünk el.



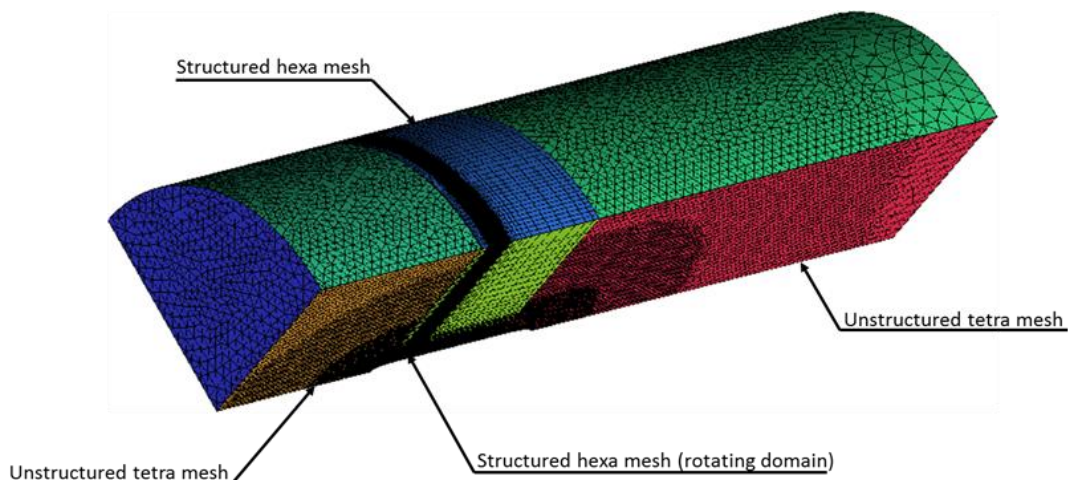
10. ábra Bal felső: a modell koordináta rendszere, Bal alsó: a vizsgált sík és a megtekintés iránya, Jobboldal: a kiértékeléshez definiált egyenes (koordinátái a két végpontja alapján a következő: $[P1, P2] = [(-0,707, -0,001, 0,1524), (-0,707, -0,001, 0,3048)]$ [m])

Ezek négy hibrid (strukturált és strukturálatlan háló kombinációja) és egy teljesen strukturálatlan hálót jelentenek. A 11. ábra különböző 3D-s hálóelemeket mutat be.



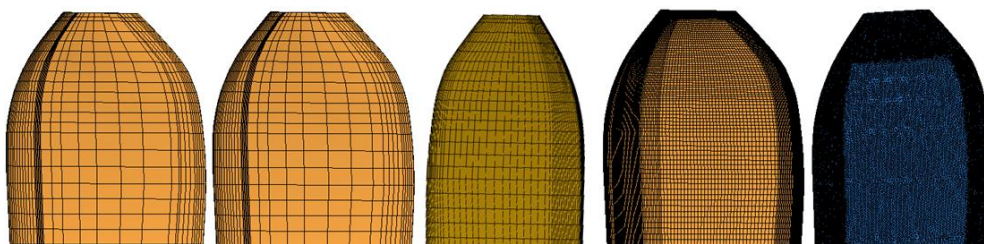
11. ábra Az alapvető háromdimenziós hálóelemek

Egy teljesen strukturált modell esetén kizárólag hexaéder típusú elemek alkotják a hálót. Az esetünkben azonban a négy áramlási részből felépülő modelltől áll ilyen elemekből, azaz azok strukturáltak. Strukturálatlan geometriai diszkretizáció esetén az ábrán is látható három másik elemből – tetraéder, gúla és hasáb – építi fel a hálót a szoftver. Érdekes megemlíteni, hogy más forrásokban hibrid hálónak nevezik a korábban említett három elem típusból álló hálókat is, azonban a mi esetünkben ez a különböző eljárásokkal történő diszkretizációk kombinációját jelenti.



12. ábra A negyed modell hibrid hálója („Structured hexamesh” – Strukturált hexa háló, „Unstructured tetramesh” – Strukturálatlan tetra háló)

A 12. ábrán látható az elkészült áramlástanai tér hibrid hálója. A strukturálatlan háló esetén szintén megtartottuk a modell feldarabolt jellegét, mivel így lehetett konzekvens összehasonlítást végrehajtani a különböző módszerek között. A hálózási eljárások eredményeit a lapát felületi hálóján keresztül mutatjuk be (lásd 13. ábra). Megfigyelhető, hogy a lapát mentén miként változtattuk a háló sűrűségét, ami a későbbiekben a háló méret érzékenységi vizsgálatához szolgáltatta az alapot. Az ábrán látható hálók közül a harmadikat, azaz a 2,2 millió elemszámú modellt neveztük el alapmodellnek. A kumulatív relatív hiba számításához szükséges egy "viszonyítási pont" (ideális esetben ez egy mérési eredmény), melyhez mérve értékeljük ki a különböző módszerekből származó adatokat. Jelen esetben erre a célra az alapmodell fog szolgálni. A strukturált és a strukturálatlan hálózási módszerek alkalmazásával kiszámított



13. ábra A légsavarlapát felületén definiált felületihálók; (Balról-jobbra az elemszámok: $7,9 \cdot 10^5$, $1,5 \cdot 10^6$ /a felületiháló nem változott ezekben az esetekben, az állórész elemzése nöött meg/, $2,2 \cdot 10^6$ /Alapmodell/, $8 \cdot 10^6$, $22 \cdot 10^6$ /strukturálatlan/)

eredmények összevetésének elsősorban a szimulációs eredmények pontosságának szempontjából van jelentősége. Minden szimuláció összeállításakor mérlegelni kell, hogy milyen minőségű háló szükséges az adott feladat elkészítéséhez, mivel csak ha az idő és munka ráfordítást vizsgáljuk jelentős különbség mutatkozik a különböző eljárások esetén. A strukturált háló készítése komplex ipari modellek felhasználása esetén ritkán alkalmazható, mivel rendkívül időigényes és komoly tapasztalatot igényel. Ezzel szemben a strukturált háló használata elterjedt a térbeli diszkretizáció pontosságának növelése érdekében az áramlásra merőleges és vele párhuzamos cellahatár-elrendezés esetén azokban a kutatás-fejlesztési projektekben, ahol a geometria megengedi alkalmazását [7][8][10]. Az említett tulajdonságok ismeretében megállapítható, hogy a különböző hálótípusok összehasonlítása fontos kérdés (ilyen jellegű összehasonlítással több értekezés is foglalkozik, például a [9]), mivel ez által egy adott szimulációs típusról – esetünkben ez a légsavar modellezés – ki tudjuk deríteni, hogy mennyire igényli a strukturált kialakítást. A teljes eljárás jósága azonban így nem, kizárólag mérések útján állapítható meg.

A háló-generálási művelet során minden esetben különös figyelmet fordítottunk a megfelelő határréteg-háló kialakítására, melynek célja a fal mentén áramló közeg fizikailag pontos megoldása.

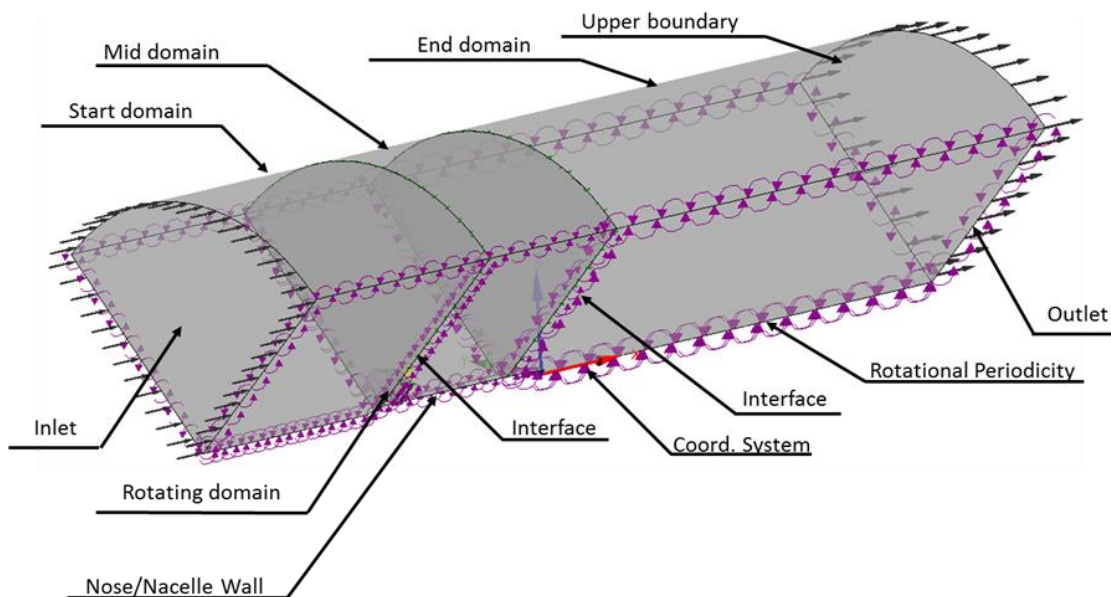
A hálózási művelet egyik fontos és vizsgálandó része a dimenziótlan faltávolság (y^+). Ennek jelentősége abban rejlik, hogy milyen feltételek mellett milyen eljárást használ a szoftver a fal-közeli áramlások leírására. A határrétegben lezajló folyamatok modellezésére kétféle közelítés terjedt el; a „Wall Function Approach” és a „Near-Wallmodel Approach”. A program automatikusan alkalmazza az elkészült háló és az áramlás tulajdonságai alapján azt, amelyik leginkább megfelelő. Ha az y^+ értéke egy körüli, akkor a határréteg megfelelő felbontása mi-

att a „Near-Wallmodel Approach” eljárást (a modell-egyenleteket minden fal közel cellára megoldja a program), ha $30 < y^+ < 300$, akkor ANSYS CFX esetén a logaritmusos faltörvényt használja a szoftver, amelyet elsősorban leválás-mentes áramlásra ajánlanak [14]. Az y^+ értékének ellenőrzésére természetesen csak a számítás lefuttatása után kerülhet sor. Az eredményeknek a hálómérettől és a határréteg-felbontástól függetlennek kell lennie.

Egy szimuláció elkészítésekor egyrészt törekedni kell arra, hogy a valóságos folyamatokkal leginkább megegyező beállításokat alkalmazzunk, másrészt pedig a hatékony modellalkotásról és a szimuláció gyorsaságáról sem szabad megfeledkeznünk. A modellezni kívánt folyamat szempontjából át kell tekinteni mely fizikai paraméterek figyelembevétele szükséges elengedhetetlenül, és célszerű kizárni azokat, melyek hatása nem jelentős. Természetesen ez a módszer egy közelítő eredményhez vezet, azonban ha rövidebb időn belül értékelhetően pontos eredményt szolgáltat, akkor elfogadható. Jelen esetben a sűrűség és a hőmérséklet, vagyis a kompresszibilitás hatását vizsgáltuk meg. Ez által ugyan is a szimuláció iteratív eljárása során megoldandó impulzus-, tömeg- és energia-megmaradás, valamint a turbulencia modellek egyenleteiben található ismeretlenek – azaz változó paraméterek – száma és így a számítási idő is csökken. A későbbi eredmények kiértékelését magába foglaló fejezetben térünk vissza az összehasonlítás eredményeire.

Egy kutatás-fejlesztési folyamat, mely aktívan alkalmazza a szimulációs módszerek adta lehetőségeket, ideális esetben háló paraméter érzékenységi vizsgálattal, továbbá az eredmények méréseken keresztüli validációjával (vagy szakirodalmi adatokkal való összehasonlítással) kezdődik. Jelen esetben háló méret érzékenység vizsgálatot végeztünk annak érdekében, hogy feltárjuk és verifikáljuk, hogy milyen mértékben gyakorol hatást a háló minősége az analízis eredményeire. Az érzékenységi vizsgálat négy különböző hibrid hálós modellre készítettük el.

Még mielőtt az eredmények bemutatására térnénk rá, a numerikus analízis peremfeltételeit mutatjuk be (lásd 14. ábra). A szimulációk minden esetben állandósult állapotokat vizsgálnak („Steady State Simulations”), a légcsavár áramlásra gyakorolt hatásának időbeli változása, azaz a tranziens folyamatok analízise, jelen esetben nem képezte részét feladatainknak.



14. ábra Az álló áramlási tér elemei és határoló-felületein előírt peremfeltételek és csatlakozó felületek

A hálóméret-érzékenységi vizsgálat mellett, a szimulációink során két különböző anyagtulajdonság hatását is megvizsgáltuk. Az első esetben a teret ideális gázként értelmezett levegőnek állítottuk be, második esetben pedig összenyomhatatlan levegőnek feltételezett tulajdonságokat definiáltuk. Ennek megfelelően először a hőközlés beállítási lehetőségei közül a „Total Energy”-t választottuk ki az ideális gáztörvény alkalmazása mellett, ellenben a második esetben, ahol elhanyagolva a kompresszibilitás hatását, „Isotherm” folyamatot definiáltunk állandó 25 °C-os hőmérséklet mellett. A szimuláció peremfeltételei és főbb beállításai a 14. ábrán láthatók. A továbbiakban taglalt beállítások minden esetben azonosak voltak. A referencia-

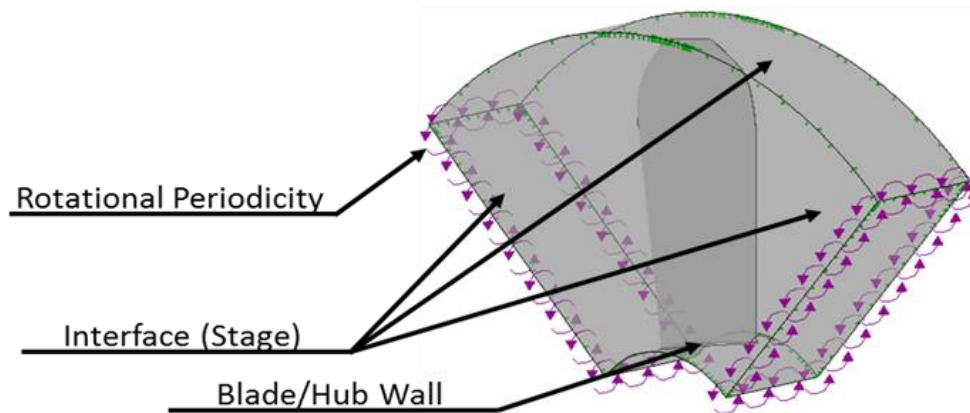
Start/ Mid/ End Domain	Domain Type: Fluid Domain Material: Air at 25 °C (Ideal gas) Reference pressure: 101091 Pa Domain Motion: Stationary Heat Transfer: Isotherm (Total Energy); Fluid temperature: 25°C Turbulence Model: Shear Stress Transport Transitional Turbulence: Fully Turbulent
Rotating Domain	Domain Type: Fluid Domain Material: Air at 25 °C (Ideal gas) Reference pressure: 101091 Pa Domain Motion: Rotating: -5901,9 RPM Heat Transfer: Isotherm (Total Energy); Fluid temperature: 25 °C Turbulence Model: Shear Stress Transport Transitional Turbulence: Fully Turbulent
Inlet	Flow regime: Subsonic flow Mass and Momentum Option: Normal Speed: 29,99 m/s Turbulence: Medium Intensity =5%
Outlet	Flow regime: Subsonic flow Mass and Momentum Option: Relative Pressure: 0 Pa
Nacelle/Nose/Blade/Hub walls	No slip wall with smooth wall roughness option Heat Transfer: Adiabatic
Upper boundary of the domains	Free slip wall

2. táblázat A szimuláció peremfeltételei és fő beállításai (zárójelben találhatók az eltérő anyagmodellhez tartozó tesztetes eltérő beállításai)

nyomás 101091 Pa, az ettől eltérő nyomás peremfeltételeket relatív nyomásként definiáltuk ott, ahol ennek megadása szükséges volt. A turbulencia modellt Menter SST⁵ módszere alapján állítottuk be. Az állórészek felső peremeit („Upperboundary”), azaz a hengerpalástszegmenst, súrlódásmentes falként definiáltuk. A közeg a vizsgált térbe az „Inlet” felületen lép be 29,99 m/s normál irányú sebességgel (lásd 14. ábra). Interfész kapcsolatot definiáltunk a különböző módon hálózott álló „domain”-ek (áramlási terek) között, továbbá a térfogatok oldalain periodicitást írtunk elő. A közeg a teret az „Outlet” felületen hagyja el 0 Pa relatív nyomással. A gondola és a szerkezet orr részét („Nacelle” és „Nose”) adiabatikus súrlódásos falként definiáltuk. Az előírt peremfeltételek tartományait a 14. ábra mutatja be és értékeit a 2. táblázat foglalja össze. A 15. ábra a forgó áramlástan területén definiált peremeket szemlélteti. A lapátot és a lapáttövet („Blade” és „Hub”) adiabatikus falként adtuk meg, a tér két oldalsó falán „Rotational Periodicity” periodikusságot írtunk elő. A forgó „domain” elülső, a hátsó és

⁵Shear Stress Transport

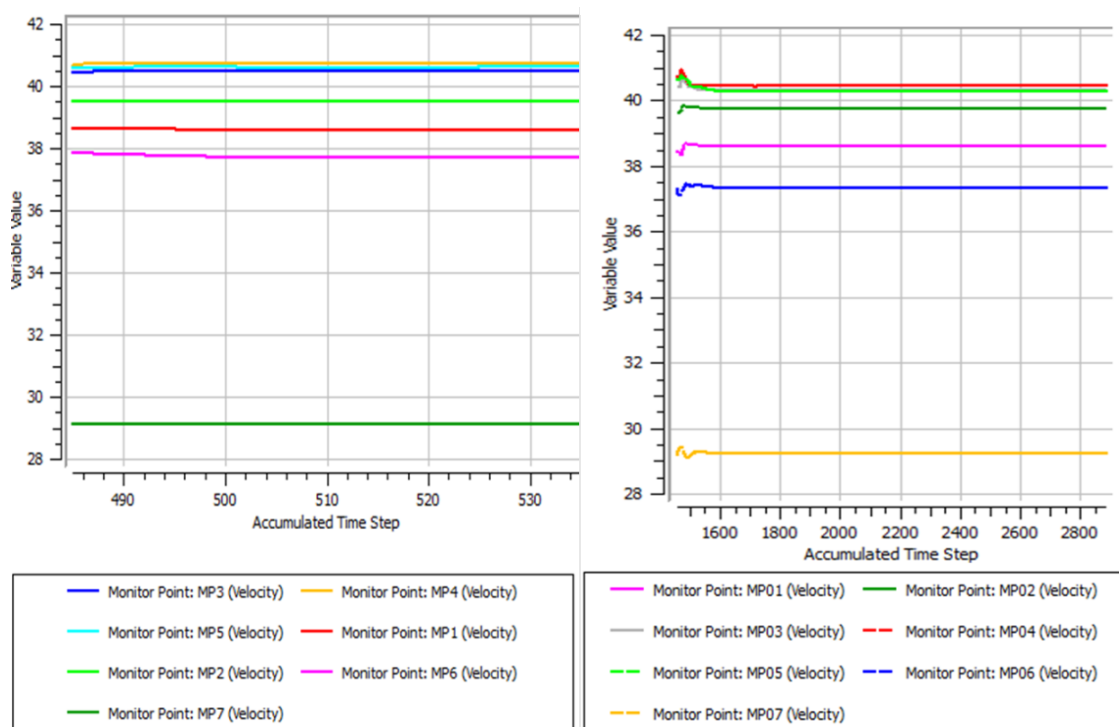
a felső felületein keresztül kapcsolódik álló áramlástanai térhez. Ezekre a felületekre „Stage” típusú interfészeket állítottunk be, hiszen ebben az esetben nincs jelentősége a lapátnyom hatásának. Az áramlástanai tér fordulatszáma: 5901,9 RPM.



15. ábra A forgó áramlástanai tér peremfeltételei és kontakt kapcsolatai

A szimulációs eredmények kiértékelése

A számítások peremfeltételeinek megadását követően a tesztesetek lefuttatása következett az „ANSYS Solver” moduljának segítségével. A „Solver” beállításainál megadtuk a maximális iterációk számát (2000 iteráció), azonban az esetek többségében kevesebb lépés alatt értünk el konvergens eredményt. Mindemellett, „Monitor Point”-okat (megfigyelési pontokat) hoztunk létre, amelyekben a vizsgált paraméterek (sebesség, statikus és torlóponti nyomás) értékeinek változását tudtuk követni az iterációs lépések folyamán (azaz az adott paraméter konvergencia görbéjét). Ennek köszönhetően pontosan meg tudtuk állapítani azt, hogy mikor konvergált be egy adott szimuláció. Minden számítás konvergens eredményre vezetett. A 16. ábra a hibrid alapmodell és a teljesen strukturálatlan hálós modell sebesség-konvergenciáit ábrázoltuk a megfigyelési pontokban. Az egyes tesztesetek definíciója a következő alfejezetben található.

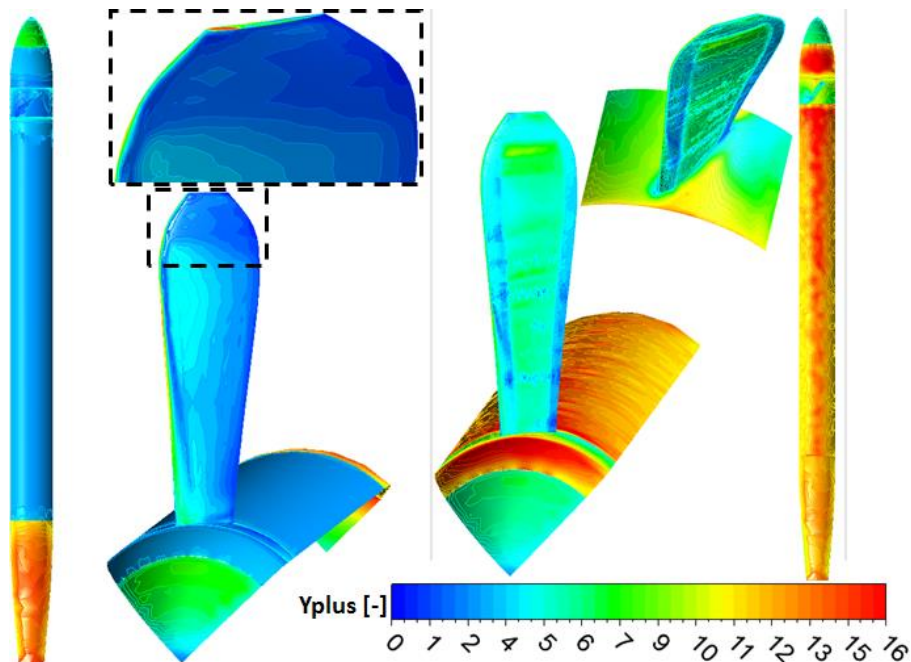


16. ábra Baloldal: a hibrid alapmodell sebesség konvergenciái a megfigyelési pontokban; Jobboldal: a teljesen strukturálatlan hálós modell sebesség konvergenciái a megfigyelési pontokban (az egyes modellek definíciói a következő alfejezetben találhatók)

Az eredmények értékelése és a vizsgált tesztesetek összehasonlítása

A vizsgálni kívánt paraméterek áttekintése előtt ellenőrizzük le a dimenziótlan faltávolságok (y^+) alakulását a falak mentén (17. ábra). A paraméter fontosságát már korábban is kiemeltük, értékének általában 1 körül (5 alatt) vagy [30, 300] között célszerű lennie [14]. A hálógenerálási folyamata során ennek az alacsonyabb értékét tűztük ki célul: $y^+ \approx 1$. A hibrid hálós modellek esetén a határréteg felbontása – a vizsgálati zónában – megfelelt a fenti elvárásainak. Mindazonáltal a hibrid hálónál is láthatunk ennél magasabb értékeket, de azok már távol esnek a vizsgált zónától így ezek további javításától eltekintettünk. A teljesen strukturálatlan háló esetén azonban az is megfigyelhető, hogy a határréteg felbontottsága nem elégséges és nem teljesítette a fenti elvárásainkat. Az eredmények megtekintésekor azonban, arra a következtetésre jutottunk, hogy a vártnál nagyobb y^+ értékek ellenére a modell kielégítő egyezőséget mutatott a többi eljárással.

A 10. ábrán látható sárga vonallal az egyenes, amely mentén a jelen fejezetben értékeljük ki a vizsgált paramétereket. Az összes tesztesetet egy adott paraméter estén azonos ábrában ábrázoljuk. A 18. ábra a jelölési rendszert mutatja be. Ez a módszer (színek és vonaltípusok) érvényes az összes karakterisztika esetén. A hálóparaméter érzékenységi vizsgálat eredményei a sebesség és nyomás eloszlás mezőket összevető karakterisztikákba nem kerültek be, de a kumulatív relatív hiba analízis kiszámításánál már feltüntettük őket. A kumulatív relatív hiba kiszámításakor a viszonyítási alap minden esetben az alapmodell volt (alapmodell: 2,2 milliós elemszámú hibrid háló, izotermikus (energia egyenlet nélküli) és összenyomhatatlannak feltételezett közeg).

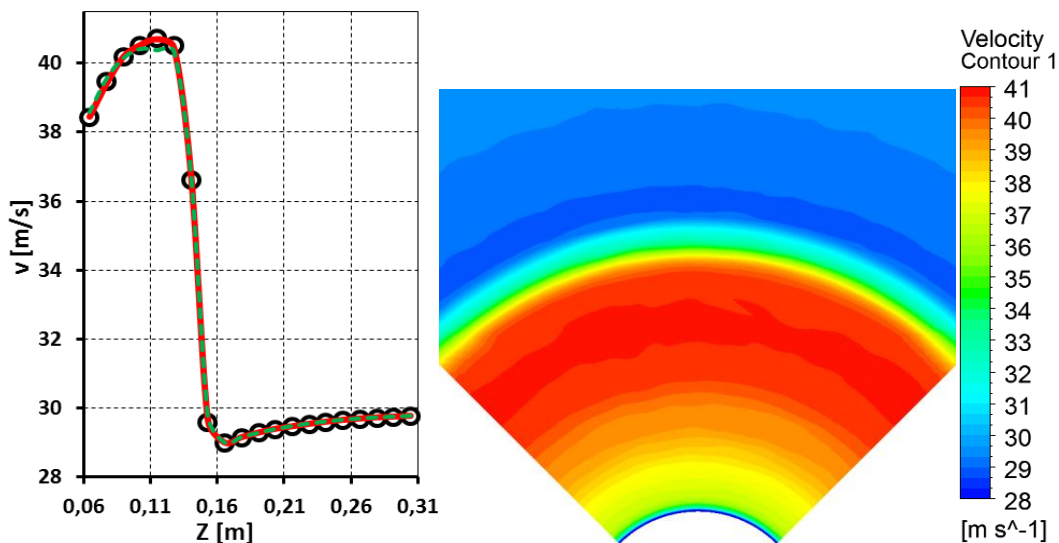


17. ábra A dimenziótlan faltávolság (y^+) alakulása a tesztrendszer falai mentén (Baloldal: a hibrid hálós alapmodell; Jobboldal: a teljesen strukturálatlan háló)

Az abszolút sebességeket a 19. ábrán mutatjuk be a Z koordináta tengely függvényében. Az ábra értelmezése mindenesetben a következő: a koordináta rendszer baloldalától indulva a légsavar nyomában a megzavart tér sebesség eloszlás mezejét figyelhetjük meg 0,1524 [m]-ig, azaz a légsavar-lapátvégéig. A koordináta rendszer végén pedig már a zavartalan közeg sebesség értékei követhetők a grafikonon. A 19. ábra jobboldalán jól látható, ahogy a légsa-

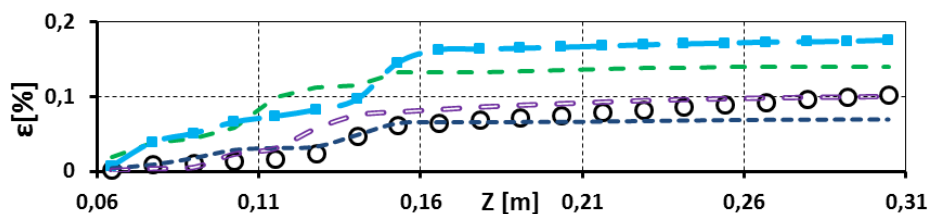
- Elemszám: $2,2 \cdot 10^6$; TotalEnergy; $\rho \neq \text{const}$; Hibrid háló
- Elemszám: $1 \cdot 10^6$; Isotherm; $\rho = \text{const}$; Hibrid háló
- Alapmodell_Elemszám: $2,2 \cdot 10^6$; Isotherm; $\rho = \text{const}$; Hibrid háló
- Elemszám: $7,9 \cdot 10^5$; Isotherm; $\rho = \text{const}$; Hibrid háló
- Elemszám: $2,2 \cdot 10^6$; Isotherm; $\rho = \text{const}$; Strukturálatlan háló
- Elemszám: $8 \cdot 10^6$; Isotherm; $\rho = \text{const}$; Hibrid háló

18. ábra Az egyesített jelmagyarázati rendszer



19. ábra Baloldal: az abszolút sebesség eloszlások alakulása a vizsgált görbe (lásd 10. ábra) mentén a különböző modellek esetén; Jobboldal: az alapmodell sebesség eloszlása a vizsgált síkban

varhoz érkező áramló közeget miként módosítja a légcsovar. A véges lapátok elméletének megfelelően a lapátvég felé közeledve a sugár mentén csökken az indukált sebességek nagysága. Az eredmények jól tükrözik az elvárásainkat, az alapmodell jó közelítésnek bizonyult, mivel a valóságot legjobban közelítő anyag modell⁶ esetén 0,103% a kumulatív relatív hiba értéke (20. ábra). Az ilyen alacsony értékű hiba százalékok a szimuláció numerikus hibáinak nagyságrendjén belüliek.

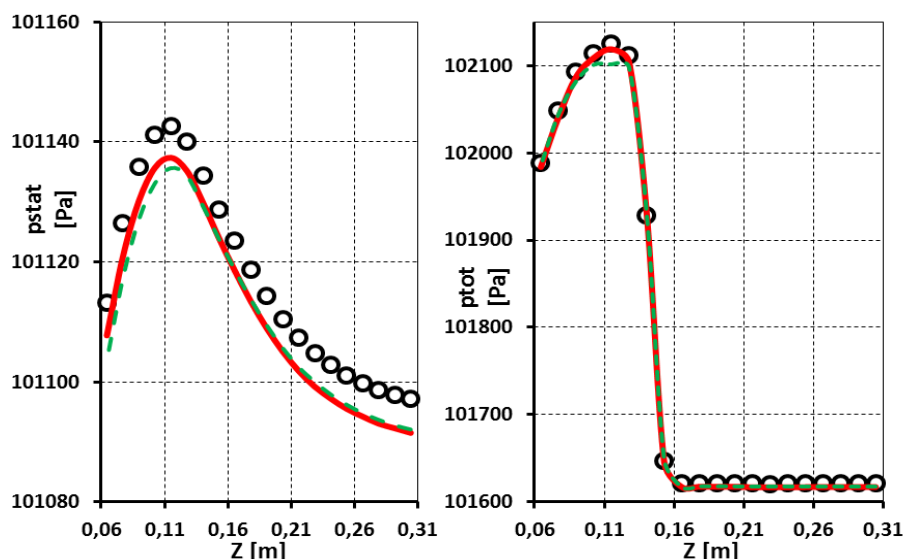


20. ábra A sebességek kumulatív relatív hibái

Jelen eredmény jelentősége abban rejlik, hogy a szimulációs eljárás számítási idejét csökkentettük azáltal, hogy csökkent a változó paraméterek száma, melyeket a „Solver” modulnak figyelembe kell venni a probléma megoldása során. További eredményként könnyelhető el az is, hogy az ipari gyakorlatban széles körben alkalmazott strukturálatlan hálózasi eljárás is szinte egyező eredményt produkált a legpontosabbnak feltételezett közelítéssel. Ennek a teszt-esetnek 0,14% volt a kumulatív relatív hibája. Ez a hasonlóság biztos alapot nyújt ahhoz, hogy a bemutatott légcsovar szimulációhoz hasonló háló méret és peremfeltétel-rendszer, de strukturálatlan háló alkalmazásával elkészített szimuláció is jó eredményre vezessen. Megjegyzendő azonban az, hogy egy strukturálatlan hálóval rendelkező modell számítási pontossága – az alkalmazott numerikus módszer esetén – általában kisebb, mint egy hexa hálós modellé abban az esetben, ha a hálóelemek merőleges és párhuzamos irányokban helyezkednek el az áramlás irányára. Jelen esetben ilyen különbség nem lépett fel, aminek számos oka is

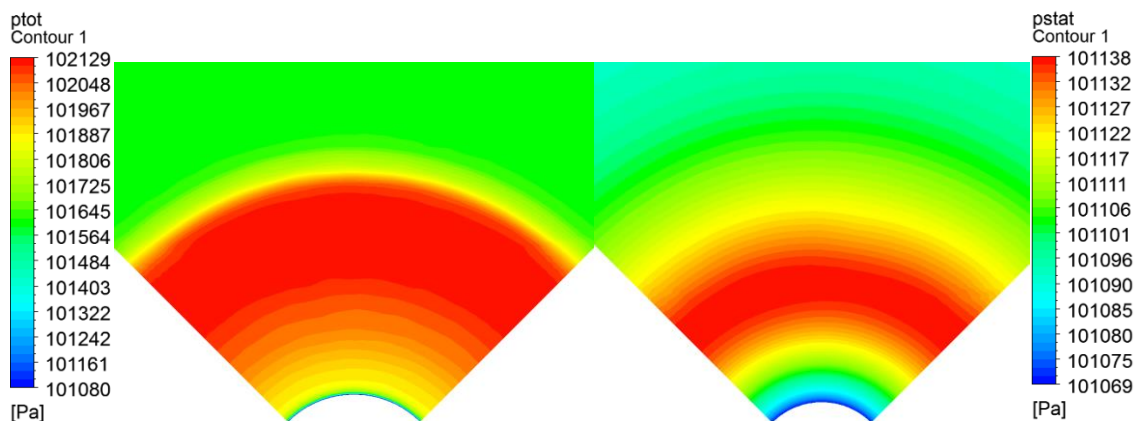
⁶ 2,2 milliós elemszámú hibrid háló, hőmérséklet változóparaméter, összenyomható közeg

lehet pl. az alacsony áramlási sebességek, kis gradiensek, illetve az időben beállt folyamat vizsgálata. A statikus nyomások esetén (lásd 21. ábra, baloldal) szintén megfigyelhető, hogy az eltérő modellezési módszerek hasonló eredményre vezettek. A 21. ábra jobboldalán a torlóponthi nyomás jelleggörbéi is jól korrelálnak egymással. Ez természetesen azzal indokolható, hogy ebben a tagban a statikus nyomás és az abszolút sebesség négyzete is szerepel.



21. ábra Baloldal: a torlóponthi nyomás eloszlások alakulása a vizsgált görbementén; Jobboldal: a statikus nyomás eloszlások a vizsgált görbe mentén

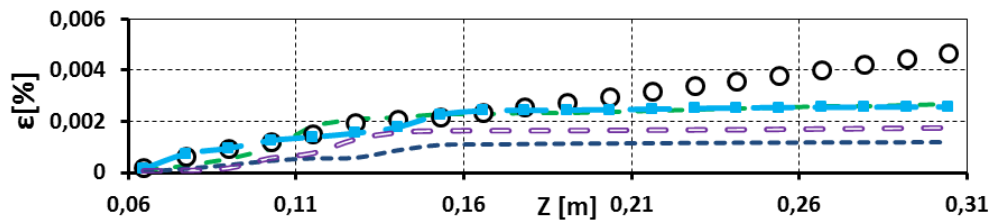
Mind a torló- mind a statikus nyomás esetén a kumulatív relatív hiba értéke kisebb, mint 0,006% (lásd 23. és 24. ábrák). A 22. ábra a torlóponthi és statikus nyomás eloszlásokat szemlélteti a kiválasztott síkban (a sík helyzetét és a megtekintés irányát lásd a 10. ábrán).



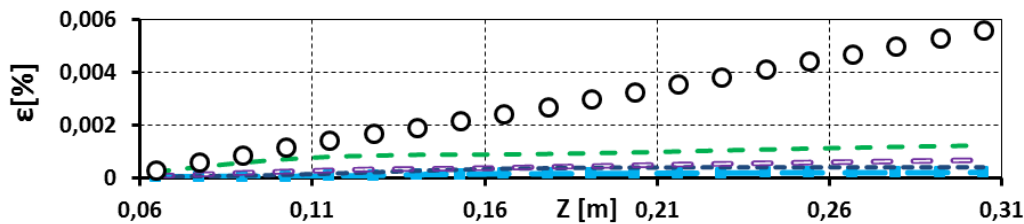
22. ábra Baloldal: a torlóponthi nyomás eloszlás a vizsgált síkon; Jobboldal: a statikus nyomás eloszlás mező alakulása a vizsgált síkon

Ahogy már korábban említettük, háló-méret érzékenységi vizsgálatokat is végeztünk. A 20. ábra szemlélteti az érzékenységi vizsgálatok vonal menti kumulatív relatív hiba számítás által kiértékelte eredményeit. Az ábrákon az adott diszkrét pontokban meghatározott hibaszázalékok egymást követő összegzése látható, azaz az diagramok jobboldalán (a végén) látható az összegzett hiba értéke. Négy eltérő háló sűrűség által generált eredmények alapján kijelenthető (a négyből egy a viszonyítási alap), hogy a vizsgált hibrid hálós tesztek esetén a hálósűrűség igen csekély befolyást gyakorolt az analízisre. Az oka, nagy valószínűséggel az lehet,

hogy a strukturálthálóval elkészített és megfelelő mértékben felbontott határréteg minden esetben kielégítő volt, így nem gyakorolt észlelhető hatást a számítási pontosságra.



23. ábra A torlóponti nyomás eloszlások kumulatív relatív hibái



24. ábra A statikus nyomás eloszlások kumulatív relatív hibái

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen munkában egy háló- és anyagtulajdonság-érzékenységi vizsgálat eredményeit mutattuk be forgó-áramlási tér elvén alapuló légcsvár-szimulációs módszer esetén. A légcsvarak szimulációkon keresztül történő vizsgálata napjainkban igen aktív kutatási terület, mivel az ilyen elven működő hajtóművek propulziós hatásfoka nagy, tüzelőanyag fogyasztásuk kedvező, ezért fejlesztésük aktív kutatási terület. Célunk e témához kapcsolódóan az volt, hogy feltárjuk annak lehetőségeit, hogy miként lehet növelni a CFD szimulációk hatékonyságát a számítási idő csökkentésével és a pontosság növelésével a „rotating domain” elvén alapuló számítási eljárások esetén. Ennek érdekében egy kísérleti légcsvár alkalmazásával végeztük el vizsgálatainkat, melyek közül az első az anyagtulajdonságok számítási eredményekre gyakorolt hatásának összevetése volt. Az első esetben figyelembe vettük a hőmérséklet és a sűrűség változását, ellenben a második esetben eltekintettünk ezektől. A következő scenárióként eltérő geometriai diszkretizációk (strukturálatlan - strukturált) közötti összehasonlító vizsgálatot végeztünk el. Utoljára egy hálóméret érzékenység vizsgálatot tűztünk ki feladatul. E két utóbbi eset kapcsán olyan információk birtokában jutunk, amelyek megmutatják, hogy a háló ez irányú tulajdonságai milyen mértékben gyakorolnak hatást az analízis eredményére. A számítási eredmények kiértékelését egy előre felvett síkban és egy ezen fekvő egyenes mentén végeztük el. Az analízisek eredményei minden esetben az elvárásainknak megfelelően alakultak. Az anyagmodellek összehasonlítását követően arra következtetésre jutottunk, hogy egy hasonló peremfeltétel-rendszerű szimuláció esetén érdemes a változó paraméterek számát csökkenteni, mivel így csökkenthető az iteratív eljárás számítási ideje is. A háló-típus és -méret érzékenység vizsgálatok eredményei megmutatták, hogy a határréteg kellő felbontottságának köszönhetően elhanyagolhatóan kis különbség alakult ki eltérő elemszámok esetén. A különféle közelítések kvantitatív összehasonlításának érdekében meghatároztunk egy átlagos kumulatív hibát, amelyben egy előre meghatározott, ún. alapmodell eredményeihez hasonlítottuk a különböző konfigurációk eredményeit. A hibaszázalék értéke kisebb, mint 0,2%, ami a nume-

rikus szimulációk hibahatárán belüli nagyságrendű. További összehasonlító elemzéseket lenne célszerű végezni a numerikus módszerek, különösen a turbulencia modellek és paramétereik hatásának vizsgálata érdekében. A számítási eredmények pontosságát, lehetőség szerint, mérési eredmények felhasználásával lenne legfontosabb alátámasztani.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BENEDA KÁROLY – DR. SIMONGÁTI GYŐZŐ - DR. VERESS ÁRPÁD: Járművek hő- és áramlástechnikai berendezései I., Typotex Kiadó, 2012, ISBN 978-963-279-639-0, url: http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/0018_Jarmuvek_ho-es_aramlastechnikai_berendezesei_1/adatok.html, (2014.03.04.)
- [2] S. IVANELL - R. MIKKELSEN - J. N. SØRENSEN-D. HENNINGSON: Three dimensional actuator disc modelling of wind farm wake interaction url:http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/0806_tonsberg/WindSim_User_Meeting_0806_Ivanell.pdf, (2014.03.04.)
- [3] GIORGIO CRASTO – FRANCESCO CASTELLANI - ARNE REIDAR GRAVDAHL- EMANUELE PICCIONI: Offshore wind power prediction through CFD simulation and the actuator disc model, url: http://www.windsim.com/documentation/EWEA_pres_2011/Actuator%20disc%20model%20.pdf, (2014.03.04.)
- [4] ADAM DZIUBINSKI – WIENCZYSLAW STALEWSKI: Vortex ring state simulation using actuator disc, url: http://www.scs-europe.net/conf/ecms2007/ecms2007-cd/ecms2007/ecms2007%20pdf/ese_0121.pdf, (2014.03.04.)
- [5] L. P. RUIZ-CALAVERA - D. PERDONES-DIAZ: CFD based aeroelastic calculation of propeller loads, url: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/493.PDF, (2014.03.04.)
- [6] A. GIAUQUE - B. ORTUN - B. RODRIGUEZ - B. CARUELLE: Numerical error analysis with application to transonic propeller aero acoustics, url:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793012002903>, (2014.03.04.)
- [7] DIETER SCHWAMBORN - THOMAS GERHOLD - RALF HEINRICH: The DLR TAU-code: Recent applications in research and industry, url: <http://proceedings.fyper.com/eccomasfd2006/documents/619.pdf>, (2014.03.04.)
- [8] N. KROLL - C.C. ROSSOW - D. SCHWAMBORN - K. BECKER - G. HELLER: Megaflow – A numerical flow simulation tool for transport aircraft design, url:http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2002/PAPERS/1105.PDF, (2014.03.04)
- [9] YUTONG LIU - KEREM PEKKAN - S. CASEY JONES - AJIT P. YOGANATHAN: The Effects of Different Mesh Generation Methods on Computational Fluid Dynamic Analysis and Power Loss Assessment in Total Cavopulmonary Connection, url: <http://www.cmu.edu/biofluids/papers/yutong.pdf>, (2014.03.04)
- [10] MICHELE GAFFURI - JOËL BREZILLON: Unstructured mesh capabilities for supersonic wing design at low speed conditions, url: http://www.researchgate.net/profile/Joel_Brezillon/publication/225022806_Unstructured_mesh_capabilities_for_supersonic_wingdesign_at_low_speed_conditions/file/72e7e51ab6fc221f19.pdf, (2014.03.04)
- [11] E.C.R. VAN BERKEL - M. KOTSONIS - L.L.M. VELDHUIS: Influence of Non-Uniform Inflow Conditions on Propeller Performance in Tractor Configuration, Results of the first test campaign, Technical Report, 2012
- [12] ANSYS WORKBENCH 13 HELP
- [13] DR. MARK TAYLOR: Open Rotor Engine Design and Validation url:[http://aerosociety.com/Assets/Docs/Greener%20by%20Design/\(6\)%20Mark%20Taylor.pdf](http://aerosociety.com/Assets/Docs/Greener%20by%20Design/(6)%20Mark%20Taylor.pdf), (2013.09.01.)
- [14] Introduction to ANSYS CFX, Lecture 07 - Turbulence, CFX-Intro_14.0_L07_Turbulence.pdf, (2013.09.01.)
- [15] JÓZSEF ROHÁCS - DÁNIEL ROHÁCS: The Potential Application Method of Magnetic Levitation Technology – as a Ground-Based Power – to Assist the Aircraft Take-Off and Landing Processes, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 86:(3) pp. 1-17. 2014
- [16] BALÁZS GÁTI: Investigation of Flying Wing With Significant Deformation, 60 éves a Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar. Budapest, Magyarország. 2011.10.20. Budapest: BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, pp. 1-9. Paper 1. ISBN: 978-963-313-040-7
- [17] KÁROLY BENEDA - JÓZSEF ROHÁCS: Dynamic Model of Variable Inducer Shroud Bleed for Centrifugal Compressor Surge Suppression, International Review of Aerospace Engineering 6: (3) pp. 163-173. Paper online, 2013