

Beneda Károly, Kavas László, Varga Béla

A CFM56 típusú kétáramú gázturbinás sugárhajtómű égésterének numerikus áramlástani modellezése

Napjainkban a közlekedés további ágazataihoz hasonlóan a repülés is egyre újabb alternatívákat keres a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagok leváltására. A már meglévő, bevált hajtóművekben azonban nem alkalmazható tetszőleges égési folyamat, az alternatívák kiválasztásánál a pillanatnyi teljesítmény mellett a hosszú távú következményeket is figyelembe kell venni. Jelen cikkben a szerzők a Magyar Honvédség kötelékében szállító repülőgépként alkalmazott Airbus A319 típus CFM56-5 gyártmányú, nagy kétáramúsági fokú gázturbinás sugárhajtóművének égéstermodelljét és numerikus vizsgálatát mutatják be, amelyet hagyományos kerozin tüzelőanyaggal validáltak. Az égéster geometriáját az irodalomban fellelhető kétdimenziós rajzok alapján határozták meg, majd az elvégzett szimuláció valóságos üzemi állapotoknak megfelelő peremfeltételekkel történt meg. További mért adatok segítségével megállapítható, hogy a modell alkalmas az égésterben lezajló termodinamikai folyamatok jellemzésére, így a későbbiekben alternatív tüzelőanyagok előzetes vizsgálatára is hasznosítható.

Kulcsszavak: gázturbinás sugárhajtómű, numerikus áramlástani szimuláció, égésszimuláció, validálás, kerozin

1. Bevezetés

A repülésben nagy teljesítménysűrűségük okán az elmúlt évtizedekben domináns meghajtási módot a különféle gázturbinás hajtóművek adják, tengelyteljesítményt leadó, avagy sugárhajtóművek [6, pp. 11–15]. Ez utóbbiak tekintetében megfigyelhető tendencia az egyre növekvő kompresszor-nyomásviszony és kétáramúsági fok, hogy a körfolyamat termikus és propulziós hatásfokait növelni lehessen. Nagyon fontos természetesen a hajtóművek hosszú élettartama, hogy minél kisebb költséggel üzemben tarthatók legyenek, amit napjainkban már igen fejlett digitális elektronikus szabályozó [1] és diagnosztikai rendszerek [20] biztosítanak. Ilyen megoldások mellett más eljárásokra is szükség van, hogy a gazdaságosságon túl további, például környezetvédelmi előírásoknak is megfeleljen az üzemeltetett légi jármű [10]. A gyártók évtizedes tapasztalataikat felhasználva egyre újabb égéster-konstrukciókat hoznak létre, amelyek – ötvözve a modern anyagtechnológia fémmátrixos kerámia alapanyagaival – nagy mértékben képesek az egyre szigorodó feltételeket teljesíteni [11]. Szintén ígéretesek az újfajta tüzelőanyagok, amelyek a jelenlegi konstrukciókban alkalmazva a repülés

fosszilis hajtóanyag-felhasználását képesek mérsékelni, hozzájárulva ezzel a fenntartható légi közlekedéshez. Egy alternatív tüzelőanyag esetében azonban igen széles körű vizsgálatokat kell elvégezni annak érdekében, hogy a tervező meggyőződhessen arról, az adott körülmények között a hajtómű biztonságosan üzemeltethető-e, leadja-e a kívánt tolóerőt, nem keletkeznek-e olyan káros mellékhatások (például tömítések tönkremenetele a nem kompatibilis folyadékoktól), amelyek veszélyeztetik az üzembiztonságon túl a gazdaságos működtetést is [2]. Mivel a tényleges égési folyamat kifejezetten összetett, a napjainkban már elterjedtnek számító numerikus áramlástani szimulációk (CFD¹) is kiemelt szerepet kapnak az effajta vizsgálatokban [3].

Ennek a cikknek a célja, hogy egy olyan háromdimenziós égéstérmodellt hozzon létre, amelynek segítségével az esetlegesen felmerülő alternatív tüzelőanyagok viselkedése, valamint a gázturbina jellegzetes üzemi paramétereire gyakorolt hatása előre jelezhető egy olyan típusú gázturbinás sugárhajtómű esetében, amely a Magyar Honvédség kötelékében szolgál, és így az eredmények közvetlenül hasznosíthatók lehetnek. Ezt a modellt mutatja be a második fejezet, amelyet a rajta végrehajtott referenciaszimuláció leírása követ. A negyedik fejezet a numerikus számítások értékelését tartalmazza, amelyben egyúttal a szimulált adatoknak a valóságos paraméterekkel történő összevetése is megtörténik. Végül a szerzők összefoglalják az elért eredményeket és rámutatnak a lehetséges további fejlesztésekre.

2. A CFM56 típusú hajtómű égésterének háromdimenziós modellezése

Ez a fejezet a háromdimenziós égéster-geometria létrehozásának lépéseit taglalja a rendelkezésre álló metszeti rajzok alapján, amelyeket hasonló témakörben más szerzők korábban publikáltak.

A CFM56 típuscsalád az egyik legelterjedtebb gázturbinás hajtómű a polgári repülésben, körülbelül 33 000 megépített példánnyal, amelynek első változatát, a CFM56-2-est az amerikai General Electric és a francia SAFRAN Group által alkotott nemzetközi CFM International konzorcium tervezte még az 1970-es években [4]. A típus további változatai, a -3, -5 és -7 verziók az elmúlt évtizedek legmeghatározóbb konstrukciójává emelték a 100-150 kN tolóerő-tartományban, elsősorban a keskenytörzsű, rövid és közepes hatótávolságú Boeing B737 és Airbus A320 repülőgépeken, de találhatunk további variánsokat akár KC-135 Stratotanker vagy Airbus A340 négyhajtóműves, nagy hatótávolságú konfigurációban is [25]. Népszerűségére jellemző, hogy még 1996-ban is napirenden volt a CFM56-9 változat kifejlesztése [5], amely helyett azonban a gyártó inkább egy teljesen új fejlesztésbe fogott, ez lett végül a CFM LEAP²-1 család.

2.1. Az elérhető geometriai információk

Tekintettel jelentős elterjedtségére, a CFM56 típus égésteréről több jó minőségű geometria is rendelkezésre áll, amelyek között találhatunk kétdimenziós metszeti ábrát [16], [17], valamint

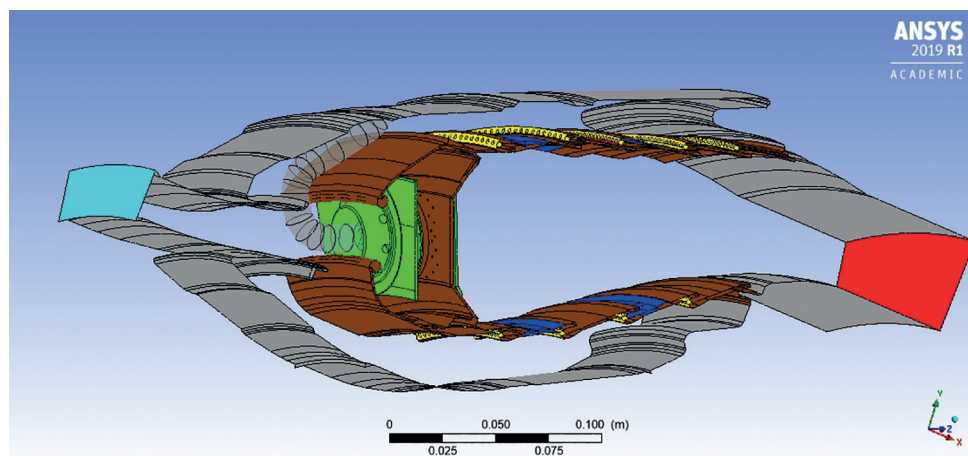
¹ CFD – *Computational Fluid Dynamics*, numerikus áramlástan.

² LEAP – *Leading Edge Aviation Propulsion*, élvonalbeli repülőgép-hajtómű.

a tüzelőanyag bevezetésére szolgáló fúvóka környezetének térbeli kialakítását is [7], [8], [15]. A kiindulási alap tehát a kettő különböző jellegű információ ötvözése volt, a teljes áramlási tér minden részletének ismerete híján az olyan kisebb hatású elemeket, mint például a tűzcső falát a fátyolhűtés levegőjével ellátó apró furatok, vagy elhanyagoltuk, vagy egy reálisnak tetsző konfigurációval helyettesítettük. Ebben segítségünkre voltak a [19] és [21] diplomamunkák, amelyekben ugyan nem a CFM56-5, hanem a -3 alváltozat égésterével foglalkoztak, de mivel a gázgenerátoron nem hajtott végre jelentős változtatást a gyártó, így közelítésként ezek is elfogadhatók. Ahogyan az általánosságban bevett gyakorlat numerikus áramlási modellek megalkotásánál, a kompresszorkilépés és a turbina első fokozat belépésének fizikai integrálása helyett ezeken a helyeken meghosszabbított csőszakaszt helyeztünk el annak érdekében, hogy az érkező, illetve távozó áramlás rendeződhesen, és ne okozzon problémákat a szimulációban.

Fontos megjegyezni, hogy az égéstér szekunder áramában jelentős, több százaléknyi (tipikusan 5% környéki) levegőmennyiség halad, hogy a turbina első fokozatának állapotátjai számára hűtést biztosítson. Vannak ugyan olyan modellek [12], [27], ahol ismert ez a mennyiség, és ezért azok a felületek, ahol a valóságban e hűtőközeg áramlik, ott további kilépést lehet definiálni, esetünkben azonban sajnos nem ismert a pontos mennyiség, ezért e felületeket falnak tekintjük, és a kompresszor kilépésén megjelenő levegőmennyiséget annyival csökkentjük, amennyit e hűtésre feltételezünk.

Az égéstér geometriája az 1. ábrán látható, amelyen megfigyelhető, hogy a teljes 20 fúvóka helyett csupán egynek a környezetét modellezzük.



1. ábra

A vizsgált égéstér-geometria [a szerzők ANSYS-szimulációja]

2.2. A hálózás

A numerikus áramlási modellezés fontos lépése, hogy a rendelkezésre álló folytonos térbeli tartományt megfelelően kis méretű egyedi térrészekre bontsuk, amelyek száma könnyűszerrel

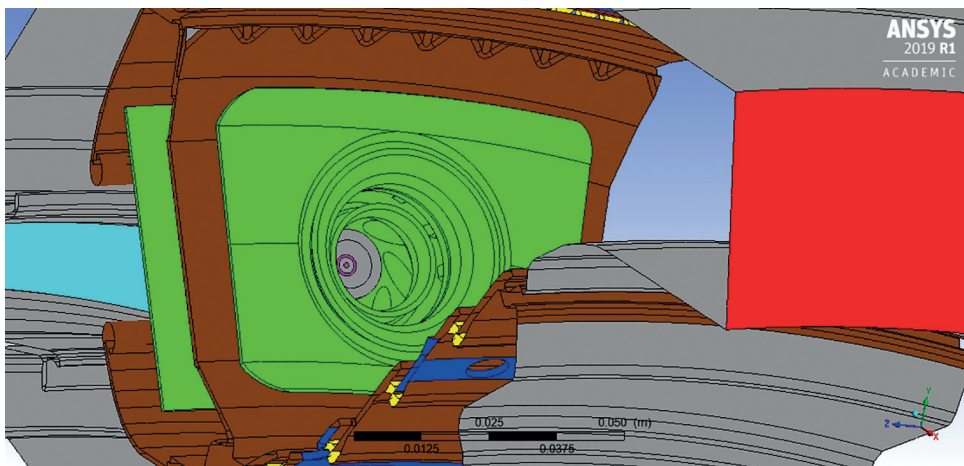
elérheti akár a milliós nagyságrendet is, így természetesen ez is kizárólag gépi algoritmussal valósítható meg. A szerzők az ANSYS programcsomag beépített hálózóját alkalmazták.

A legalapvetőbb beállítás az elemek geometriája, itt a nem strukturált tetraédres lehetőséget választottuk. Mivel magának az égéstérnek a jellemző hosszmérete közelítőleg 200 mm, ezért a legtöbb felületen 1,5 mm-es elemnagyságot állítottunk be a kellően finom, de nem túlzottan részletes hálózás érdekében, hogy még elfogadható legyen a számítási igény. Természetesen azokon a helyeken, ahol kifejezetten kis méretű geometriai részletek is fontosak lehetnek, például a porlasztón, ott ennél kisebb, 0,2 mm-től 0,7 mm-ig terjedő méretezést alkalmaztunk. Az egyes csoportok értékeit az 1. táblázat mutatja, elhelyezkedésüket pedig az 1. ábrán lehet megtekinteni.

1. táblázat

A felületi hálózás fontosabb beállításai [a szerzők saját adatai az ANSYS CFX Meshing programból]

Helyszín	Porlasztó	Fátyolhűtés furatai	Előperditő, deflektor	Hűtő- és hígítólevegő furatai
Elemméret (mm)	0,2	0,5	0,7	0,7
Színkód a 2. ábrán	Lila	Sárga	Zöld	Sötétkék

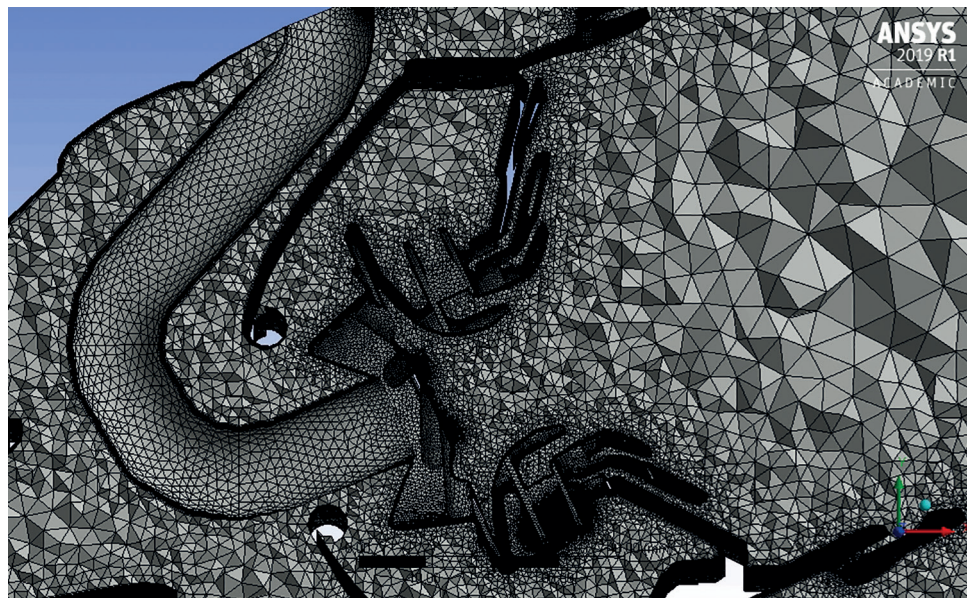


2. ábra

A felületi háló különböző zónái [a szerzők ANSYS-szimulációja]

A hálózás szempontjából kiemelten fontos a határréteg kezelése, amelyet az úgynevezett Inflation lehetőséggel tudunk megvalósítani. Minden szilárd falon 12 réteget állítottunk be, a maximális vastagság a nagyobb méretű falakon 1, a kisebbeken 0,5 mm. Ezzel elegendő felbontást lehet biztosítani az előzetes futtatások alapján, voltak azonban olyan különleges geometriai részletek, amelyeknek valamilyen diszkrétizációs probléma miatt igen nagyra adódott a dimenziómentes faltávolságuk, az y^+ változó (tipikusan az előperditő lapát környékén). Ennek a jellemzőnek 30 és 300 közötti értékei az elfogadhatók [24], ezért az ilyen helyeken befolyásolási zónát (*sphere of influence*) definiáltunk, amelyben a megadott pont 3 mm-es környezetében 0,1 mm kényszerrel határoztunk meg helyi finomítás gyanánt. Egy ilyen befolyásolási zóna figyelhető meg a 3. ábrán, ahol a fúvókát körülölelő levegő előperditő felső

lapátján viszonylag nagy méretű hálóelemek fekszenek, az alsó részen viszont egybemosódó fekete folt sejteti, hogy ott a megjelenítés felbontásánál finomabb a felosztás.



3. ábra
A fűvóka környezetének hálózása [a szerzők ANSYS-szimulációja]

3. A modellen végzett numerikus áramlási szimuláció

A vizsgálat elsődleges célja az égési folyamat modellezése, azonban mivel egyelőre csupán hagyományos kerozinnal való üzemi adatok állnak rendelkezésre, a modellen elvégzett szimuláció is ennek a tüzelőanyagnak az égésére szorítkozik. A későbbiekben, amennyiben már elérhető lesz valamilyen alternatív tüzelőanyaggal végzett kísérlet, akkor természetesen azoknak az alaposabb elemzése is lehetővé válik.

3.1. A peremfeltételek és egyéb beállítások

A numerikus áramlási szimuláció a Reynolds-átlagolt Navier–Stokes differenciálegyenlet-rendszer diszkrétizálásán alapul, így tehát a perem- és kezdeti feltételek megadása elengedhetetlen. Ezen túlmenően, többféle további kényszer meghatározása is szükséges a szimuláció helyes lefutása érdekében.

Az áramlási térben két fő anyag mozgását, valamint egymással való reakcióját vizsgáljuk, ezek közül az egyik a gázkeverék, a másik pedig a tüzelőanyagcseppek. Az előbbi esetében a keverési arány függvényében akár tiszta levegő is modellezhető, így nincs szükség az égés

előtti és utáni állapotok különféle anyaggal történő helyettesítésére. A gázkeveréket a teret folytonosan kitöltő közegként definiáltuk, a tüzelőanyagot pedig önálló részecskék formájában.

A hőátadást, hősugárzást és az égést a közegtől függőnek állítottuk be, a turbulencia-modellként $k-\epsilon$ lehetőséget választottuk. A hőátadást a tüzelőanyagcseppeknél a részecske hőmérsékletétől függő, a gázkeverékben az összenergia alapján számítjuk, a sűrűlási munkát is beleszámítva. A gázban létrejöhet égés, ezt PDF³ Flamelet modell szimulálja, amelyet kerozinra vonatkozóan a korábbi kutatásokban is használt könyvtárállomány tartalmaz. A sugárzást P1 séma szerint szimuláljuk, amely kisebb számításigénnyel rendelkezik más módszerekhez képest [14]. A két eltérő közeg kapcsolatát teljesen kötöttnek feltételeztük, a felületi feszültség értékét $0,026 \text{ N/m}$ -re állítva. Az impulzuscseret Schiller–Naumann-, a hőátadást Ranz–Marshall-modell írja le, a cseppek felbomlását pedig a Schmehl-eljárás szerintire állítottuk be, amelyben a dinamikus ellenálláserő törvényszerűségét is engedélyeztük.

A CFM56-5A1 variációra végeztük a számításokat, amelyre vonatkozóan a [13] és [23] szolgáltatott bemenő adatokat, ezeket a 2. táblázat mutatja. Számos adatot (például tolóerő) eredetileg nem SI-mértékegység szerint adtak meg, itt már csak a konvertált értékeket adjuk közre, illetve a tüzelőanyag tömegáram, a felszálló tolóerő és fajlagos fogyasztások szorzatként számított érték nem lelhető fel közvetlenül az említett forrásokban.

2. táblázat
A legfontosabb peremfeltételek számszerű értékei [13]

Jellemző	Felszálló tolóerő	Fajlagos fogyasztás	Tüzelőanyag tömegáram	Levegő tömegáram	Kétáramúsági fok	Kompresszor nyomásviszony
Szimbólum	F_t	b_f	$\dot{m}_{\text{tüa}}$	\dot{m}_0	α	π_k^*
Érték	111,205	$0,93 \cdot 10^{-5}$	1,034	386,5	6,0	26,5
Mértékegység	kN	kg/(Ns)	kg/s	kg/s	–	–

Az áramlási tér öt fő határfelülettel rendelkezik, ezek közül három peremfeltétel, kettő pedig periodikus határfelület. Az előbbi három a levegő belépése a kompresszortól, a kilépés a turbina felé, valamint a tüzelőanyag bejuttatása, amelyekhez a kiinduló számszerű adatokat a 2. táblázat foglalja össze.

A levegőbelépést az 1. és 2. ábrán világoskék felület szimbolizálja. Itt stabil torlóponyi nyomást adtunk meg, amelyet az (1) egyenlet alapján számítottunk, a szívócsatorna össznyomás-visszanyerési tényezőjére pedig $\sigma_{sz}=0,97$ -ot feltételezve, a Nemzetközi Egyezményes Légkör tengerszinti, statikus körülményei között:

$$p_2^* = p_0^* \sigma_{sz} \pi_k^* = 101325 \text{ Pa} \cdot 0,97 \cdot 26,5 = 2604559 \text{ Pa} \quad (1)$$

Mivel a CFD beállításában referenciányomás gyanánt 1 bart adtunk meg, a bemenet definíciójában az (1)-ben közölt értékhez képest ennyivel kevesebb szerepel.

³ Probability Density Function, sűrűségfüggvény.

A kompresszort elhagyó közeg torlóponthi hőmérsékletéhez meg kell becsülni az izentropikus hatásfokot, amelyet $\eta_s^k = 0,88$ -nak véve a kompresszor kilépő hőfoka a (2) szerint számolható:

$$T_2^* = T_0^* \left(1 + \frac{\pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_s^k} \right) = 288 \text{ K} \cdot \left(1 + \frac{26,5^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1}{0,88} \right) = 795,4 \text{ K} \quad (2)$$

A turbina előtti keresztmetszet az 1. és 2. ábrákon piros felületként szerepel. Az égéstermék kilépésére vonatkozóan a gázkeverék teljes (levegő és tüzelőanyag) tömegáramát vesszük, természetesen a 20 fúvókára jutó összmenyiség egy huszadát, ezt a (3) egyenlet alapján lehet meghatározni. Az égéstérbe belépő levegő tömegáramban figyelembe kell venni azt, hogy a belső áramba nem a teljes közeget mennyiség jut be, továbbá körülbelül $\delta = 10\%$ -nyi levegőelvétellel számolunk.

$$\dot{m}_{ki} = \left[\dot{m}_0 \frac{1-\delta}{\alpha+1} + \dot{m}_{tüa} \right] \frac{1}{20} = \frac{[386,46 \frac{0,9}{7,1} + 1,034] \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{20} = 2,501 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3)$$

A tüzelőanyag betáplálásánál, amelyet a 2. ábrán lila szín mutat, mindkét felületen (belső és külső kúpon is) történik porlasztás a felszálló üzemmódon, ezért együttesen jelöltük azokat ki mint peremfeltételt. A mennyiség értelemszerűen a 2. táblázatban megadott érték egy huszada.

A peremfeltételek mellett még egy periodikus interfészt is meg kell adni, hiszen nem a teljes égéstér, hanem annak csupán egy fúvókára jutó szeletét vizsgáltuk. Az a két felület, amelyet az egymással 18° -ot bezáró metszősíkok hoznak létre, ezen a kapcsolaton keresztül köthetők össze.

A szimuláció lefutását befolyásoló beállítások közül a reziduumok négyzetes középértékére vonatkozóan 10^{-6} nagyságrendet írtunk elő, a maximális iteráció számát 1000-re választottuk. Az időskálára vonatkozóan fizikai variációt választottunk, 10^{-2} s időléptékkel, a korábbi égési szimulációk során szerzett tapasztalatok alapján. Definiáltunk különböző kifejezéseket, mint például átlagos felületi hőmérséklet a kilépő keresztmetszetben, amelyek alapján már a megoldás során is meg lehet állapítani, hogy az adott jellemző milyen értéket vesz fel, és ez megfelel-e az elvárásoknak, vagy érdemes lehet megszakítani a megoldó futását, és módosított bemenő paraméterekkel újraindítani a szimulációt.

4. A szimuláció ellenőrzése

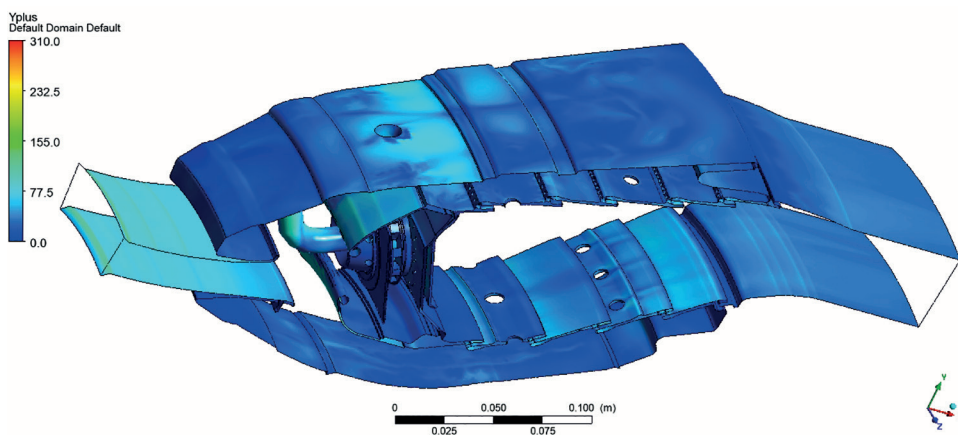
A numerikus áramlástani szoftver által kiadott eredményeket többféleképpen is ellenőrizni szükséges. Ennek fő lépései a verifikálás és a validálás. Előbbi alatt azt értjük, hogy megvizsgáljuk, vajon helyes egyenleteket alkalmaztunk-e, vagyis jó volt-e a modellalkotás, továbbá kellő mértékben felbontottuk-e az áramlási teret, azaz a diszkretizáció során szükségszerűen előálló hibák nem lépnek-e túl egy bizonyos határt [26]. A modell verifikációjának egy további lépése az iterációs konvergencia ellenőrzése, vagyis az egyes jellemzők tartanak-e egy bizonyos végértékhez, illetve a reziduumok nullába konvergálnak-e. A validáció már nemcsak a matematikai

hibákat vizsgálja, hanem lehetőség szerint valós mérési adatokhoz hasonlítjuk a szimuláció eredményeit, ezáltal a probléma fizikai megoldásának tökéletességére ad választ.

4.1. Az iterációs konvergencia és dimenziómentes faltávolság ellenőrzése

A szimuláció lefutása során az egyes paraméterek az égésre jellemző apró turbulenciák, keveredési ingadozások miatt messze nem olyan gyorsan állnak be adott értékre, mint az égést nélkülöző áramlási vizsgálatok során. Ez utóbbiak esetében elegendő lehet 100-200 iteráció is, a jelenlegi körülmények között indokolt volt 1000-re állítani a maximális iterációszámot, mert a tömeg- és impulzusreziduumok körülbelül 300 iteráció után érték el azt a nagyjából $6 \cdot 10^{-4}$ határértéket, amely alá már nem tudtak csökkenni.

Fontos még a dimenziómentes faltávolság ellenőrzése, amelynek értékére a szakirodalom $30 < y^+ < 300$ a tartományt szokta javasolni [24], ennek legszélsőségesebb értéke 310 volt a szimulációk során, tehát azt mondhatjuk, hogy a hálózás a falak közeli határrejteget kellő pontossággal fel tudja bontani, és pontos eredményeket tud szolgáltatni. Az értékek eloszlását a 4. ábra mutatja.



4. ábra

A dimenziótlán faltávolság eloszlása a szilárd falak mentén [a szerzők ANSYS-szimulációja]

4.2. Hálófüggetlenség-vizsgálat

A hálófüggetlenséget legalább három, fokozatosan sűrített hálózással lehetséges megvizsgálni. Mivel a 2. fejezetben leírt névleges háló körülbelül 5,6 millió csomópontot és 15,3 millió elemet jelentett, ezért ennél az ellenőrzésnél a névlegesnél egy kisebb és egy nagyobb hálózattal folytattunk vizsgálatot. A kiemelt paraméter a kilépő felületre átlagolt gázhőmérséklet, amelynek értékeit a legfontosabb hálókra jellemző paraméterekkel a 3. táblázat mutatja.

Az ANSYS CFX Post programja lehetőséget kínál függvények értékének kiszámítására, így a kilépésen a felületre átlagolt hőfok meghatározható.

3. táblázat
A hajtóművön mért fontosabb értékek [a szerzők saját adatai]

Háló sorszáma	1	2	3
Csomópontok száma (millió)	6,043	5,598	5,154
Elemsszám (millió)	16,610	15,305	13,612
Hálósűrítési viszonyyszám, r (-)	1,0852	1,1243	
Felületre átlagolt kilépő hőmérséklet (K)	1533,45	1535,2	1537,55
Abszolút hiba (f_{ij})	1,75	2,35	

Mivel a háló nem strukturált, ezért a hálókongvergencia-index számításánál az alábbi eljárást kell alkalmazni [26]. A finomabb hálóra vonatkozó adatokból kell elsődlegesen kiindulni, és a konvergencia mértékét (p) számítani a (4) egyenlet alapján.

$$p = \frac{|\ln|f_{s2}/f_{21}|+q(p)|}{\ln r_{21}} \quad (4)$$

A (4) egyenletben a $q(p)$ az állandó hálósűrítéshez képesti eltérésből adódó hiba, amelynek számítását az (5) képlet mutatja. Tekintettel arra, hogy ez a jellemző a konvergencia mértékétől függ, a (4)–(5) egyenleteket $q(p)=0$ kezdeti feltételezéssel indítva iterációval kell megoldani. Az (5) egyenletben az s változó az f_{s2} és f_{21} változók hányadosának előjelét jelenti.

$$q(p) = \ln \frac{r_{21}^p - s}{r_{s2}^p - s} \quad (5)$$

Az iteráció végeredményeként a (6) egyenletben látható eredmények adódtak.

$$p = 0,5461; \quad q(p) = -0,08587 \quad (6)$$

Ezáltal a hálókongvergencia-index a két esetre a (7) egyenlet alapján egy [18] által javasolt $F_s=1,25$ biztonsági tényezővel, valamint a két finomabb hálóval kapott eredmények relatív hibáiból számítható.

$$GCI_{21} = F_s \left| \frac{f_2 - f_1}{f_1} \right| \frac{1}{r_{21}^p - 1} = 0,006139 \quad (7)$$

Hasonlóképpen határozható meg a két durvább hálóra vonatkozó konvergenciaindex, amely azért érdekes, mert a hálósűrítés léptékének és a konvergencia mértékének segítségével megállapítható, hogy a számításaink az aszimptotikus tartományba esnek-e. Ez a feltétel akkor teljesül, ha a finomabb hálóra számított konvergenciaindex transzformált értéke közel egyenlő a durvább hálóra érvényes értékével, ahogy ez a (8) egyenletben látható. Mivel a kettejük hányadosa majdnem pontosan egységnyi, ezért kijelenthető, hogy megoldásunk elérte az aszimptotikus tartományt, tehát konvergensenek minősül.

$$GCI_{32} = F_s \left| \frac{f_3 - f_2}{f_2} \right| \frac{1}{r_{21}^p - 1} = 0,007557; \quad \frac{r^p GCI_{21}}{GCI_{32}} = \frac{0,007556}{0,007557} = 1,001 \quad (8)$$

A továbbiakban ismertetett adatok a szimuláció végeredménye által szolgáltatott értékek Richardson-extrapolációjával nyert mennyiségek [22], amelynek általános képletét, valamint a turbina előtti hőmérsékletre vonatkozóan a behelyettesítést a (9) egyenlet ismerteti.

$$f' = \frac{r_{21}^p f_1 - f_2}{r_{21}^p - 1}; \quad (T_3^*)' = \frac{0,006139^{0,54} \cdot 1533,45 \text{ K} - 1535,2 \text{ K}}{0,006139^{0,54} - 1} = 1525,92 \text{ K} \quad (9)$$

A további extrapolált értékeket a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat

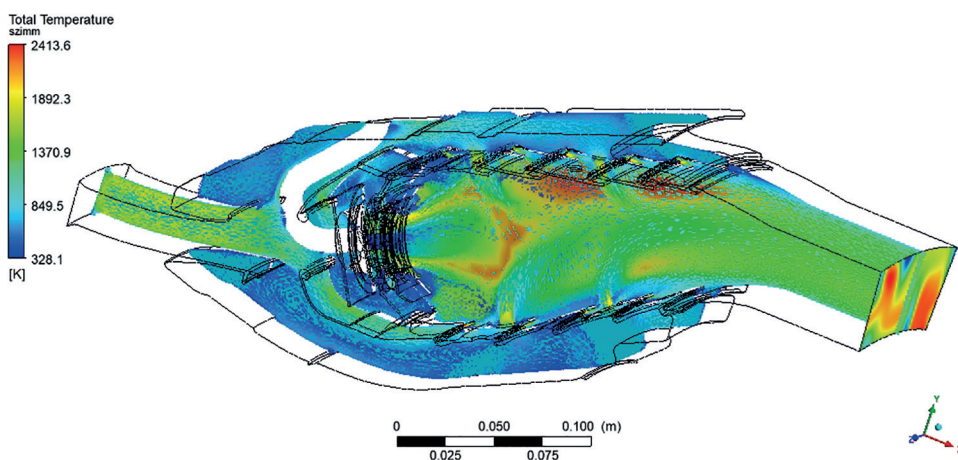
Extrapolált szimulációs paraméterek [Excel-táblázat az ANSYS-szimulációk kimenetei alapján]

Jellemző	Szimbólum	Érték	Mértékegység
Kompresszor utáni statikus nyomás	p_2'	25,206	bar
Turbina belépő torlóponti nyomás	$p_3^{*'} $	23,431	bar

4.3. Az eredmények összehasonlítása a rendelkezésre álló adatokkal

A legfontosabb érték természetesen a turbina előtti gázhőmérséklet, amelyet [23] alapján vizsgálhatunk, az ott megadott érték $T_3^* = 1537 \text{ K}$. A 4.2. fejezet alapján az extrapolálással megkapható gázhőmérséklet $(T_3^*)' = 1525,92 \text{ K}$ -re adódott, vagyis a hiba mindössze:

$$\delta T_3^* = \frac{T_3^* - (T_3^*)'}{T_3^*} \cdot 100\% = 0,7209\% \quad (10)$$



5. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a szimmetriasíkokban és a kilépő keresztmetszetben, valamint a sebességvektorok a szimmetriasíkokban [a szerzők ANSYS-szimulációja]

Az 5. ábrán látható a szimmetriasíokban érvényes hőmérséklet-eloszlás, valamint ugyanezen a felületen a sebességvektorok is megfigyelhetők. Látszik a hófokmező a turbina belépésénél is.

Egy további érdekes validálási lehetőséget kínál a hajtóművön mért adatok alapján a nagynyomású kompresszor kilépésénél mért statikus, valamint a turbina előtti torlóponyi nyomás, amelyeket az 5. táblázat mutat. Feltüntettük a kisnyomású turbina második fokozatában mérhető torlóponyi nyomást is, mert ez is felhasználható az adatok helyességének ellenőrzésében, még ha magában a szimulációban nem is szerepel közvetlenül. A táblázatban megadjuk a gyári jelölést is, ami alapján a mért érték a hajtóművön beazonosítható, azonban a továbbiakban a saját elnevezéseinkkel hivatkozunk az egyes paraméterekre.

5. táblázat
A hajtóművön mért fontosabb értékek [a szerzők saját adatai]

Jellemző	Gyári jelölés	Szim-bólum	Érték	Mértékegység
Kompresszor utáni statikus nyomás	p_{s3}	p_2	24,813	bar
Kisnyomású turbina 2. fokozat torlóponyi nyomás	p_{t495}	$p_{KNyK,2}^*$	3,9984	bar
Kisnyomású turbina kilépő torlóponyi nyomás	p_{t54}	p_4^*	1,4146	bar

A kompresszor kilépő statikus nyomására vonatkozóan a mért és szimulált eredmények hibája a (11) egyenletben látható.

$$\delta p_2 = \frac{p_2 - (p_2)^*}{p_2} \cdot 100\% = 1,588\% \quad (11)$$

Mivel a CFM56 típusnál a „495” elnevezésű keresztmetszet a kisnyomású turbina második fokozat állólapátjának belépését jelenti, az ott mért nyomást vissza kell számolni a nagynyomású turbina kilépő nyomására, hogy további validálásra alkalmas adatot nyerhessünk. Ezért először is vizsgáljuk meg, hogy a kisnyomású turbina fennmaradó három fokozata (másodiktól a negyedikig) mekkora nyomásviszonyt dolgoz fel, és ebből mekkora az egy fokozatra jutó átlagos nyomásviszony. Ez látható a (12) egyenletben.

$$\pi_{KNyT,2-4} = \frac{p_{KNyK,2}^*}{p_4^*} = \frac{3,9984 \text{ bar}}{1,4146 \text{ bar}} = 2,8264 \rightarrow \pi_{KNyT}^{1,átl} = \sqrt[3]{\pi_{KNyT,2-4}} = 1,4139 \quad (12)$$

A teljes kisnyomású turbinára jutó nyomásviszony az egy fokozat nyomásviszonyának és a megadott három fokozat nyomásviszonyának szorzataként becsülhető úgy, hogy a legelső fokozatra az átlagosnál nagyobb, $\pi_{KNyT}^1 = 1,6$ nyomásviszonyt feltételezünk, mivel a turbina általában hátrafelé csökken a fokozati munka. Az eredményt a (13) egyenlet mutatja.

$$\pi_{KNyT} = \pi_{KNyT}^1 \cdot \pi_{KNyT,2-4} = 1,6 \cdot 2,8264 = 4,522 \quad (13)$$

Következő lépésként a nagynyomású turbina kilépő torlóponyi nyomásának meghatározása történhet, ezt a (14) egyenlet szerint.

$$p_{4,2}^* = p_4^* \cdot \pi_{KNyT} = 1,4146 \text{ bar} \cdot 4,522 = 6,397 \text{ bar} \quad (14)$$

A gázturbinás sugárhajtóművek égésterében az össznyomás-visszanyerési tényező leggyakrabban

közé esik, ennél a hajtóműnél a középértéket alapul véve számítható a turbina előtti torlóponyi nyomás, továbbá annak relatív hibája, ahogyan a (15) mutatja.

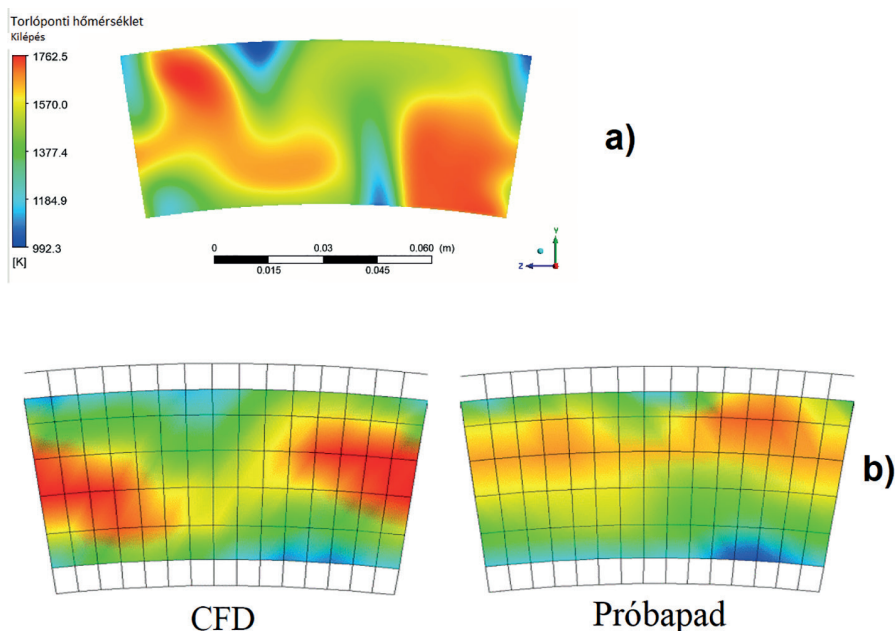
$$p_3^* = p_2^* \cdot \sigma_\varepsilon = 26,045 \text{ bar} \cdot 0,94 = 24,482 \text{ bar}; \delta p_3^* = \frac{p_3^* - (p_3^*)}{p_3^*} \cdot 100\% = 4,294\% \quad (15)$$

A turbina belépő torlóponyi nyomás relatív hibája a legnagyobb eddig, feltehetően a többszörös becslés áll ezen eltérés mögött. Amennyiben ezt a jellemzőt is lehetne mérni, valószínűleg ez a hiba is csökkenne. Ellenőrizhetjük azonban a nagynyomású turbinára jutó nyomásviszony alapján, amely a (16) egyenletben látható.

$$\pi_{NNyT}^* = \frac{p_3^*}{p_{4,2}^*} = \frac{24,482 \text{ bar}}{6,397 \text{ bar}} = 3,827 \quad (16)$$

Ez igen nagy értéknek tűnik első közelítésben, figyelembe véve, hogy a CFM56 egyetlen nagynyomású turbinafokozattal rendelkezik [23], de tekintettel arra, hogy körülbelül 12-es nyomásviszonyú kompresszor hajtását kell megvalósítania, ez az érték reális [9, p. 522].

Bár eltérő típusú hajtóművek égéstereiről van szó, a [12]-ben részletezett vizsgálat ugyanis a PW6000 gázturbinával foglalkozott, a mérete és a technológia szintje nagyon hasonló, ezért összevethető az általunk vizsgált CFM56-5-tel. A 6. ábra a) részén az aktuális kutatás, a b) részén pedig a [12]-ben található CFD- és próbapadi adatok figyelhetők meg, és jellegre igen hasonlatosak egymáshoz, tehát ez alapján is a CFM56 égéstermodell használhatóságáról győződhetünk meg.



6. ábra

A hőmérséklet-eloszlás a kilépő keresztmetszetben: a) a vizsgált CFM56-5 esetén; b) PW6000 CFD- és próbapad adatok (a) a szerzők ANSYS-szimulációja, b) [12])

Összegzésképpen megállapítható, hogy mivel minden paraméter 5%-on belüli eltéréssel rendelkezik a mért adatokhoz képest, a szimuláció validálása sikeresnek tekinthető.

5. Összefoglalás

A szerzők a cikkben egy nagy kétáramúsági fokú gázturbinás sugárhajtómű égésterének háromdimenziós modelljét készítették el olyan módosításokkal a tényleges kialakításhoz képest, amely az érdemi égési folyamatra nincsen kihatással, így a létrehozott geometria alkalmas a hajtóműben lejátszódó égés modellezésére.

A kialakított háromdimenziós áramlási teret három különböző hálóval vizsgáltuk, annak érdekében, hogy az eredmények hálófüggetlenségét meg lehessen állapítani. A szakirodalmi ajánlások alapján elvégzett ellenőrzés megállapította, hogy a háló elegendően finom, a szimulációk a konvergencia szakaszon helyezkednek el, így a várt értékek további finomítás nélkül Richardson-extrapolációval számíthatók.

Az extrapolált értékeket mért mennyiségekkel összehasonlítva megállapítható volt, hogy a szimuláció kellő mértékben közelíti a valóságot, tehát az eredményei elfogadhatók. Ez igen fontos abból a szempontból, hogy legfontosabb feladatát csak a jelen vizsgálatokat követően fogja ellátni, amikor a további kutatások során alternatív tüzelőanyagok égési folyamatait kívánjuk elemezni a most megalkotott modellen.

Felhasznált irodalom

- [1] R. Andoga, L. Főző, R. Kovács, K. Beneda, T. Moravec, M. Schreiner, „Robust Control of Small Turbojet Engines,” *Machines*, 7. évf. 1. sz. p. 3. 2019. Online: <https://doi.org/10.3390/machines7010003>
- [2] R. Andoga, L. Főző, M. Schrötter, S. Szabó, „The Use of Ethanol as an Alternative Fuel for Small Turbojet Engines,” *Sustainability*, 13. évf. 5. sz. p. 2541. 2021. Online: <https://doi.org/10.3390/su13052541>
- [3] A. Bo, E. Giacomazzi, G. Messina, A. Di Nardo, „Analysis of a Fuel Flexible Micro Gas Turbine Combustor Through Numerical Simulations,” *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 140. évf. 12. sz. 2018. Online: <https://doi.org/10.1115/1.4040737>
- [4] CFM International, *CFM56*. 2018. június. Online: www.cfmaeroengines.com/wp-content/uploads/2019/12/Brochure_CFM56_2018.pdf
- [5] CFM International, *CFMI Looks to Future with New CFM56-9*. 1996. április 17. Online: www.cfmaeroengines.com/press-articles/cfmi-looks-to-future-with-new-cfm56-9/
- [6] T. Giampaolo, *Gas Turbine Handbook: Principles and Practices*. 3rd edition. Fairmont Press, 2006.
- [7] M. Giridharan, S-M. Mongia, H. Jeng, „Swirl Cup Modeling – Part VIII: Spray Combustion in CFM-56 Single-Cup Flame Tube,” *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, Nevada, 2003. január 6–9. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2003-319>
- [8] G. Hsiao, H. Mongia, „Swirl Cup Modeling Part 2: Inlet Conditions,” *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. Reno, Nevada, 2003. január 6–9. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2003-1350>

- [9] A. A. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий, „Газотурбинные двигатели,” ОАО Авиадвигатель, г. Пермь. 2006.
- [10] J. S. Kinsey, W. Squier, M. Timko, Y. J. Dong, R. Logan, „Characterization of the Fine Particle Emissions from the Use of Two Fischer–Tropsch Fuels in a CFM56-2C1 Commercial Aircraft Engine,” *Energy & Fuels*, 33. évf. 9. sz. pp. 8821–8834. 2019. Online: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00780>
- [11] Y. Liu, X. X. Sun, V. Sethi, D. Nalianda, Y. G. Li, L. Wang, „Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines,” *Progress in Aerospace Sciences*, 94. évf. pp. 12–45. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.08.001>
- [12] R. E. Malecki, C. M. Rhie, R. G. McKinney, H. Ouyang, S. A. Syed, M. B. Colket, R. K. Madabhushi, *Application of an Advanced CFD-Based Analysis System to the PW6000 Combustor to Optimize Exit Temperature Distribution: Part I – Description and Validation of the Analysis Tool*. ASME Turbo Expo 2001. Online: <https://doi.org/10.1115/2001-GT-0062>
- [13] N. Meier, *Civil Turbojet/Turbofan Specifications*. Online: www.jet-engine.net/civtfspec.html
- [14] M. Melot, J.-Y. Trépanier, R. Camarero, E. Petro, „Comparison of Two Models for Radiative Heat Transfer in High Temperature Thermal Plasmas,” *Modelling and Simulation in Engineering*, pp. 1–7. 2011. Online: <https://doi.org/10.1155/2011/285108>
- [15] H. C. Mongia, M. Al-Roub, A. Danis, D. Elliott-Lewis, A. Johnson, S. Vise, S. M. Jeng, V. McDonnell, G. Samuelsen, „Swirl cup modeling. I,” In *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Salt Lake City, UT, 2001. július 8 – július 11. 2001. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2001-3576>
- [16] H. C. Mongia, W. Dodds, *Low Emissions Propulsion Engine Combustor Technology Evolution: Past, Present and Future*. ICAS Congress, 2004. Online: www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2004/PAPERS/609.PDF
- [17] H. C. Mongia, „GE Aviation Low Emissions Combustion Technology Evolution,” *SAE Technical Paper Series*, 2007. szeptember 17. Online: <https://doi.org/10.4271/2007-01-3924>
- [18] NASA NPARC Alliance Verification and Validation, *Examining Spatial (Grid) Convergence*. Online: www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html
- [19] K. A. das Neves, *Combustion Analysis on a CFM56-3 Engine*. MSc diplomaterv, Covilhã, 2018. Online: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/8325/1/6029_12503.pdf
- [20] L. Nyulaszi, R. Andoga, P. Butka, et al. „Fault Detection and Isolation of an Aircraft Turbojet Engine Using a Multi-Sensor Network and Multiple Model Approach,” *Acta Polytechnica Hungarica*, 15. évf. 2. sz. pp. 189–209. 2008. Online: <https://doi.org/10.12700/APH.15.1.2018.2.10>
- [21] de Oliveira, J. M. P., „CFD Analysis of the Combustion of Bio-Derived Fuels in the CFM56-3 Combustor.” MSc diplomaterv, Covilhã, 2016. Online: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/6527/1/4691_9311.pdf
- [22] P. J. Roache, „Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies,” *Journal of Fluids Engineering*, 116. évf. 3. sz. pp. 405–413. 1994. Online: <https://doi.org/10.1115/1.2910291>
- [23] E. Roux, *Turbofan and Turbojet Engines: Database Handbook*. Editions Elodie Roux, 2007.
- [24] M. S. Salim, S. C. Cheah, „Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows,” *International Multiconference of Engineers and Computer Scientists 2009*, 2. köt. pp. 2165–2170. Online: www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009_pp2165-2170.pdf

- [25] J. D. Scheelhaase, „Local Emission Charges – A New Economic Instrument at German Airports,” *Journal of Air Transport Management*, 16. évf. 2. sz. pp. 94–99. 2010. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2009.10.008>
- [26] L. E. Schwer, *Is Your Mesh Refined Enough? Estimating Discretization Error using GCI*. 7. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2008. Online: www.dynamore.de/de/download/papers/forum08/dokumente/l-l-03.pdf
- [27] T. S. Snyder, J. F. Stewart, M. D. Stoner, R. G. McKinney, „Application of an Advanced CFD-Based Analysis System to the PW6000 Combustor to Optimize Exit Temperature Distribution: Part II – Comparison of Predictions to Full Annular Rig Test Data,” *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*. 2001. június 4–7. Online: <https://doi.org/10.1115/2001-GT-0064>

Computational Fluid Dynamic Model of CFM56 Turbofan Engine Combustion Chamber

Nowadays, similarly to the other fields of transportation, aviation searches for alternatives in order to replace conventional fossil fuels. However, the proven engine hardware is not able to support arbitrary combustion processes, during the selection of the alternatives, besides the momentary impact on performance, the long-term consequences must also be taken into account. In the present paper, the authors develop the three-dimensional model of the combustion chamber from a CFM56-5 high bypass ratio turbofan engine, which is in service in the Hungarian Defence Forces as the power plant of Airbus A319 transport aircraft. The computational fluid dynamics investigation was carried out with conventional jet fuel in order to allow comparison with the real data available from operation of the engine. After validation, the model is found to be correct, thus, it will be suitable for the assessment of alternative fuels in the subsequent part of the research.

Keywords: gas turbine engine, computational fluid dynamics, simulation, combustion, validation, kerosene

Dr. Beneda Károly, PhD
adjunktus
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Repüléstudományi és Hajózási Tanszék

beneda.karoly@kjk.bme.hu
orcid.org/0000-0003-1900-7934

Károly Beneda, PhD
Assistant Professor
Budapest University of Technology and
Economics
Faculty of Transport Engineering and
Vehicle Engineering

Department of Aeronautics and Naval
Architecture

beneda.karoly@kjk.bme.hu
orcid.org/0000-0002-9876-6760

<p>Dr. Kavás László, PhD egyetemi docens Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar</p> <p>Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék kavas.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527</p>	<p>László Kavás, PhD Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft and Engine kavas.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-7375-3527</p>
<p>Dr. Varga Béla, PhD egyetemi docens Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar</p> <p>Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék varga.bela@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825</p>	<p>Béla Varga, PhD Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft and Engine varga.bela@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3454-0825</p>