

Sári János¹ – Beneda Károly² – Kavas László³

Repülőgép-hajtóművek égéstereinek áramlástanai vizsgálata számítógépes szimulációban

Napjainkban a repülőgép-hajtóművek szerkezetének, elemeinek tervezésében, gyártásában a mérnökök számára elengedhetetlen egy-egy olyan számítógépes szoftver, amely a valósághoz hűen képes a közegek áramlásának fizikai-matematikai modellezésére vagy éppen a megmunkáló eszközök munkájának optimalizálására. Esetünkben a szimulációval könnyedén helyettesíthetők a költséges tesztermékek, valamint ezzel párhuzamosan csökkenthető a kísérletek során keletkező környezetszennyező anyagok légtérbe jutása, valamint a kivitelezésre vagy az esetleges fejlesztésre szánt idő is minimalizálható. Erre a feladatra leggyakrabban az ANSYS számítógépes szoftvert alkalmazzák. Ez egy olyan numerikus áramlástanai szoftver, amely térben és időben folytonos műveleteket diszkrétizál, így a hajtóművek égéstereinek vizsgálatára kiválóan alkalmazható. Cikkünkben az említett szoftvernek a szerzők által kitűzött feladatra való alkalmasságának elemzését, majd az alkalmazás eredményét kívánjuk bemutatni. Az elemzés során az ANSYS CFX szoftver segítségével hajtottuk végre a különféle hajtóművek áramlástanai szimulációját. Célunk, hogy a publikáció végére az olvasó számára átfogó képet mutassunk az áramlástechnikai gépekben lejátszódó folyamatokról, ezen belül az égéstér szimulációjáról.

Kulcsszavak: Ansys, CFD, hajtóműégőtér, numerikus szimuláció

A Fluid Dynamics Study of Aircraft Engine Combustion Chamber in Computer Simulation

Nowadays, in the design and production of the structure and elements of aircraft engines, it is essential for engineers to use computer software that is able to physically and mathematically model the flow of media or to optimise the work of machining tools. In our case, the simulation can easily replace costly test products, furthermore it can also reduce the release of pollutants into the air during experiments, and the time spent on construction or possible development can be minimised. The ANSYS computer software is most often used for this task. It is a numerical

¹ BSc-hallgató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék, e-mail: sari.janos1999@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8861-3300>

² Egyetemi docens, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék, e-mail: kavas.laszlo@uni-nke.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7375-3527>

³ Egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés és Járóműmérnöki Kar Vasúti járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék, e-mail: kbeneda@vrht.bme.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7934>

fluid dynamics software that discretises continuous operations in space and time, making it excellent for examining combustion chambers in engines. In our article, we want to present an analysis of the suitability of the above mentioned software for the task set by the authors, and then to present the results of the application. During the analysis, we performed fluid flow simulations of various engines using ANSYS CFX software. Our aim is to provide the reader with a comprehensive picture of the processes taking place in flow engineering machines, including the combustion chamber simulation.

Keywords: Ansys, CFD, engine combustion chamber, numerical simulation

1. Bevezetés

Az áramlások modellezése alapján véve a gázok az áramlási térben lejátszódó folyamatainak tanulmányozásáról szól, a kijelölt térfogatban lezajló áramlás háromdimenziós leírásával. Ennek köszönhetően a berendezések olyan szegmensei is feltérképezhetővé válnak, amelyek esetleges hibáira csak az üzemi mérésekből lehetne bonyolult számítások révén következtetni. A szimulációs vizsgálattal könnyen kimutatható, hogy a problémás helyeken csak a bizonyos részegységeket szükséges megfelelően korrigálni vagy optimalizálni. Ahogy a nevéből is származik, CFD-modellezés során, lehetőségünk van nemcsak gázok, hanem folyadékok szimulációjára is, valamint a legújabb programváltozatok esetében kémiai reakciók elemzésére, ami számottevően hozzájárulhat az égéstérben lejátszódó procedúrák megértéséhez és természetesen elemzéséhez. Manapság a nagy teljesítményű számítógépek elterjedésének köszönhetően a CFD-programok könnyen elérhetők és használhatók különféle intézmények, valamint kisebb cégek számára egyaránt.

A környezeti hatások, a különféle termikus és mechanikai terhelések, impulzusok, üzemeltetési viszonyok változtatása (például valamilyen alternatív tüzelőanyaggal történő üzemeltetésre átállítás) vagy akár az általános amortizáció következtében a hajtómű élettartama folyamatosan változhat, (csökkenhet vagy akár növekedhet is!), így kiemelkedően fontos a szilárdsági elemzések helyes, pontos végrehajtása. A hajtómű üzemtartójának a valós maradék üzemidő pontos ismerete repülésbiztonsági és – legalább ugyanilyen súlyllyal tekintett – gazdaságossági kérdés is. Természetesen ezek a hatások véges elemes (*Finite Element Analysis, FEA*⁴) modulokkal szimulálhatók.⁵

2. Az Ansysről röviden

Ha van olyan olvasónk, aki már utazott repülőgépen, vezetett autót, használt számítógépet vagy okostelefont, akkor valószínűleg egy olyan termékkel találkozott, amelynek létrehozásában,

⁴ Finite Element Analysis (FEA): Adott fizikai jelenség szimulációja a véges elemes numerikus technikával. Lényege a fizikai prototípusok és kísérletek számának csökkentése, valamint az alkatrészek tervezésének optimalizálása a költségcsökkentés érdekében.

⁵ *About Ansys.* é. n.; Beneda Károly: *Gázturbinás sugárhajtómű égésterének modellezése ANSYS CFX szoftverrel.* Kutatói Referátum, Nemzeti Közszolgálati Egyetem GINOP-2.3.2-15-2016-00007.; Bicsák, György – Hornyák, Anita – Veress, Árpád: Numerical Simulation of Combustion Processes in a Gas Turbine. *AIP Conference Proceedings*, 1493. (2012), 1. 140–148.

megtervezésében, kivitelezésében az Ansys szoftver fontos, meghatározó szerepet játszott. A Swanson Analysis Systems Inc. nevű cég 1970-ben alakult, és mára már 4400 szakembert foglalkoztat. A szoftver alapvető felhasználási területei igen változatosak. Segítségével a felhasználónak lehetősége nyílik különféle mechanikai, áramlástani, valamint elektromágneses jelenségek szimulációjára. Ezen kompetenciák birtokában az Ansys a mérnökök számára megjósolhatóvá teszi a terméktervek viselkedését valós környezetben, amellyel a költséges, valamint környezetterhelő kísérletek és fejlesztési folyamatok redukálhatók. Az Ansys multifizikai szoftvercsomag képességei a hajtóművek égéstereinek modellezésében és analízisében is igen számottevőnek bizonyulnak, ugyanis segítségével számos numerikus áramlástani (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) szimuláció és szilárdságtani vizsgálat könnyedén megvalósítható, a megfelelő modulokkal. A numerikus áramlástani szimulációnak fontos része a validáció, azaz a kapott értékeket elengedhetetlen összevetni a valós adatokkal, hogy megbizonyosodhassunk a számítások pontosságáról.⁶

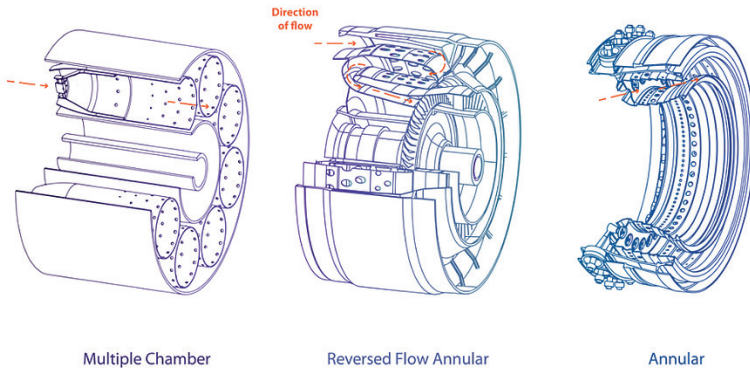
3. Égőtértípusok

Manapság a legtöbb modern katonai és civil utasszállító repülőgépet a gázturbinás hajtóművek valamely változatával hajtják. Annak ellenére, hogy ezeknek a hajtóműveknek különféle típusai léteznek, az égéster valamennyiben ugyanazokat az elemeket tartalmazza (égőtérház, égőtér, tüzelőanyag-porlasztó/befecskendező fúvókák, egyéb rögzítő, pozícionáló mechanikus alkatrészek). Természetesen az égőtér típusának és elrendezésének helyes megválasztását nagymértékben a hajtómű tulajdonságai határozzák meg. Az égőtérben alapvetően a magas nyomású levegő a tüzelőanyaggal keveredve elég, és energia szabadul fel. Az égés minőségére, ezáltal a károsanyag-kibocsátásra is hatással van a porlasztás minősége, a párolgási idő, a párolgási sebesség, az áramlási sebesség és a nyomás.

Ebből következtetve elmondható, hogy a hajtóműben lejátszódó égésnek helyet adó égőtér szerkezete akkor mondható megfelelőnek, ha minél magasabb szinten teljesíteni képes az alábbi elvárásokat:

- a tüzelőanyag és a levegő elegyét hatékonyan kell elégetnie lerakódások (kokszosodás) minimalizálása érdekében, ugyanakkor kis nyomásvesztéssel működjön;
- megfelelően vezesse a forró gázokat a turbínaszakaszba;
- az égésnek teljes mértékben az égőtérben kell megvalósulnia;
- hűtse le az égésterméket arra a hőmérsékletre, amelyet a turbina lapátjai működési körülmények között kibírnak;
- megbízható és egyenletes gyújtás biztosítását tegye lehetővé;
- alacsony füst és egyéb szennyező gáznemű anyagok kibocsátása;
- megbízható karbantarthatóság, tartósság jellemezze.

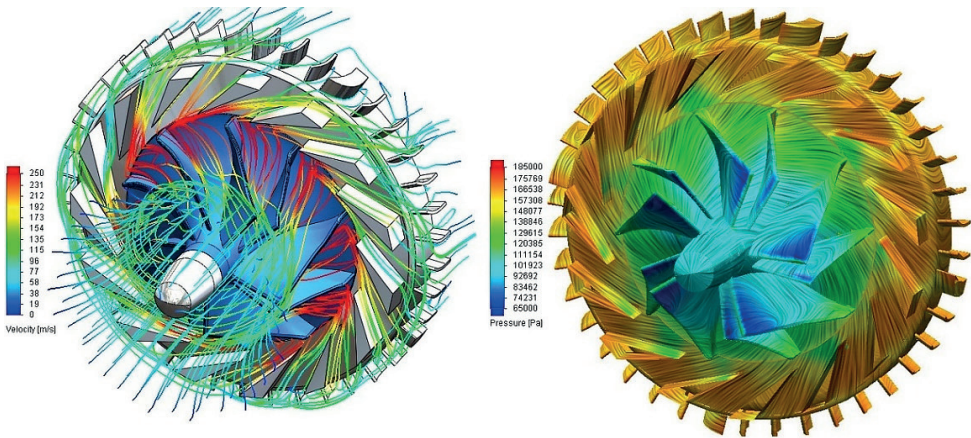
⁶ Csató Péter: *Gázturbinás hajtóművek égőtereinek numerikus vizsgálata, figyelembe véve az alternatív tüzelőanyagok alkalmazásának lehetőségét*. TDK-dolgozat, Szolnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék, 2018.; Beneda Károly: *Az Ansys multifizikai szoftver alkalmazási lehetőségei gázturbinás hajtóművek numerikus analízisében*. Kutatói Referátum, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, GINOP-2.3.2-15-2016-00007.



1. ábra

Égőtérfajták: csöves (balra), csöves-gyűrűs (középen), gyűrűs (jobbra). Forrás: *Combustion Chamber Types*. Jet-X, é. n.

Alapvetően háromféle égőtértípust különböztethetünk meg (1. ábra): csöves; csöves-gyűrűs; gyűrűs.⁷



2. ábra

Áramvonalak alakulása a kompresszor-járókerékben és diffúzorban. Forrás: Micro-turbine jet engine simulation and structural analysis using FloEFD™ and Cero® Simulate. Elérhető: https://frone.jp/public/products/FloEFD/WhitePaper/002_Small%20but%20Mighty%20Powerful.pdf

A legegyszerűbb égőtérforma a voltaképpen a kompresszort a turbinával összekötő egyes csövezetek, amit a gyakorlatban a túlzott nyomásvesztés miatt nem alkalmaznak. Ez a veszteség arányos a levegő sebességének négyzetével. A levegő sebességének redukálását diffúzorral és fordított áramlási zónával valósítják meg. A diffúzorok kialakításuk

⁷ Varga Béla – Kavás László: Gázturbinás hajtóművek égőterei és nyomásvesztésük becslése. *Repüléstudományi Közlemények*, 29. (2017), 2. 85–94.; *Gas Turbine Engines-Combustion Section*. Flight Mechanic, é. n.; Sánta Imre: *Repülőgép hajtóművek I. (Gázturbinás hajtóművek)*. Budapest, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgép és Hajók Tanszék, 2009.

szempontjából alapvetően téglalap, illetve kör keresztmetszetűek, valamint gyűrűsek vagy lapátosak lehetnek. A diffúzorban a növekvő belső átmérője miatt a sebességcsökkentéssel párhuzamosan növekszik a levegő statikus nyomása (2. ábra).⁸

Így nemcsak az égőtérbe kerülő levegő lassul le, megakadályozva a láng lefúvását és lehetővé téve a tüzelőanyaggal való megfelelő keveredést, hanem forró égéstermék jut vissza, ami növeli az égés hatásfokát. A diffúzor kialakításánál törekedni kell arra, hogy a falíróódási veszteség, valamint a leválásból származó veszteségérték együttesen minél alacsonyabb legyen. Ezt a további kettő égőtér típusnál is figyelembe kell venni.

Az 1940-es évek végén és az 1950-es évek elején a zömmel centrifugál kompresszorokhoz úgynevezett csöves égőterek kapcsolódtak. Az elrendezés fő hátránya, hogy nem egyenletes a kerület mentén a turbinalapátok hőterhelése. Az 1950-es évek közepétől megjelentek a csöves-gyűrűs égőtérrel rendelkező hajtóművek, amelyek kombinálták a gyűrűs égőterek kompaktságát a csöves égőterek mechanikai szilárdságával. A turbinalapátok hőterhelése ebben az esetben egyenletesebb, de lángtovábbító összekötő csövek beépítése továbbra is szükséges. Az 1960-as évektől kezdődően egyre gyakoribbá váltak a gyűrűs égőteres hajtómű-konstrukciók. Ebben a típusban a többivel ellentétben a tűzcső az égőtérház belsejében helyezkedik el, így a keverékkialakítás és az égés egy helyen megy végbe. Ennek egyik előnye a jobb keveredés és a nagyobb hatásfok. További előnyei közé sorolható, hogy a turbinák hőterhelése, azaz a gázhőmérséklet-eloszlás a turbina belépő keresztmetszetén egyenletes. Nagy hátrányuk, hogy esetleges cseréjük csak kizárólag a hajtómű teljes megbontásával lehetséges.⁹

4. Áramlási folyamatok az égőtérben

Az égőtérben lezajló folyamatok, jelenségek összefoglalása, valamint ismertetése messze meghaladná e munka terjedelmét és szándékát, mindazonáltal kötelességemnek érzem alapjaiban tárgyalni e témakört, hogy a kevésbé felkészült olvasó számára is egyszerűbbé válhasson a további ismeretanyag áttanulmányozása. Az égőtérben (3. ábra) végbemenő alapvető folyamatok szimulációjához, modellezéséhez fontos a benne lejátszódó áramlási folyamatokat is megvizsgálunk.¹⁰

Annak érdekében, hogy az égés a lehető legtökéletesebb legyen, az égőtérben turbulens áramlás létesítésére van szükség. Ilyenkor felmerülő probléma, hogy a turbulenciával párhuzamosan a nyomásvesztés is nőni fog. Tehát szükség van egy olyan pontosan megtervezett áramlásrendszerre, amelyben ez a hatás kis mértékben van jelen, valamint a hőközlés ennek ellenére is hatékony.

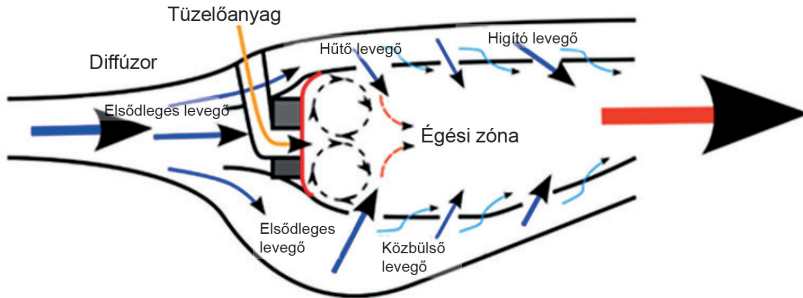
Ezt az áramlásrendszert primer, szekunder és tercier égési zónákra osztják (4. ábra). A primer égési zóna jelentőségét nem lehet eléggé nyomatékosítani, ugyanis ez határozza meg az utána következő folyamatokat, beleértve az égőtér hatásfokát, mivel itt keresztjezi egymást először a porlasztott tüzelőanyag a lelassult levegőmennyiséggel, valamint itt történik meg a gyújtása is. A gyújtás folyamatos biztosítása érdekében ellenáramú zónát hoznak

⁸ Pásztor Endre – Varga Béla: Energy- and Aerodynamic Examination of Slightly Backward Leaning Impeller Blading of Small Centrifugal Compressors. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 43. (2015), 4. 199–205.

⁹ *Gas Turbine Engines-Combustion Section* (é. n.) i. m.

¹⁰ *Correct air speed for fuel combustion*. Aviation, é. n.

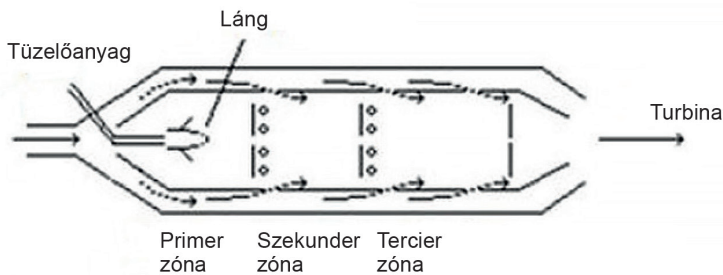
létre örvénykeltő segítségével, amely a forró égéstermékek egy hányadát használja fel, így elkerülve a lángkialvás kockázatát. Az égőtérben keletkező örvény az axiális irányú lapátok segítségével keletkezik. Az örvény közepe felé a nyomás folyamatosan csökken, aminek következtében a porlasztott tüzelőanyag- és levegőkeverék az égőtér belseje felé áramlik, tehát visszaáramlik. Ennek a folyamatnak az eredményeként létrejön egy úgynevezett recirkulációs zóna, amely függ a visszaáramlás nagyságától. Ez a hatás javítja az égés hatásfokát, de természetesen növeli az égőtér nyomásvesztését. Ennek megfelelően a két veszteség optimalizálására kompromisszumos megoldást kell találni.



3. ábra

Égőtér áramlásrendszere. Forrás: *Correct air speed for fuel combustion* (é. n.) i. m.

A szekunder égési zónában a tökéletlen égésből származó káros anyagokat kisebb mennyiségű hűtőlevegő segítségével hűtik le, amely elősegíti a korom kiégését, valamint a CO és az el nem égett szénhidrogének elégését. Ilyenkor fontos pontosan megválasztani a hűtőlevegő mennyiségét a túlhűtés elkerülés végett, elkerülve a hatásfok csökkenését.



4. ábra

Égési zónák. Forrás: *Combustion Chambers*. é. n.

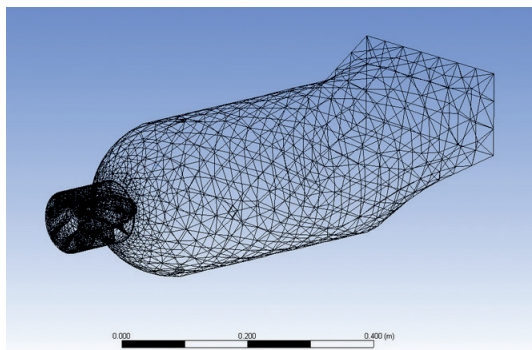
A tercier égési zónában (visszahűtési zóna) a fennmaradó levegő az égéstermékkel keveredve olyan hőmérsékletre hűl le, amelyet a turbina lapátjai már képesek „elviselni”, így növelve élettartamukat.¹¹

¹¹ *Combustion Chambers*. é. n.; Csató (2018) i. m.

4.1. Az égőtér modellezése Ansys CFX segítségével

Az Ansys típusú numerikus áramlástani szoftverek véges térfogatú módszeren alapulnak, tehát az áramlási teret, a vizsgált térfogatot diszkretizálják kisebb elemi térfogatokká.

Numerikus vizsgálatoknál, első lépésként minden esetben szükséges magát a geometriát megalkotnunk, jelen esetben az áramlási tér háromdimenziós modelljét, ami a későbbi munkánk alapját fogja képezni. A modellt megalkothatjuk az Ansys SpaceClaim vagy DesignModeller szoftverével, de akár különféle CAD-es programok segítségével is, mivelhogy a szoftver képes felismerni e programok kimeneti fájlformátumait. A program alkotóinak javaslatára, ilyenkor különösen figyelni kell a SpaceClaimben tervezett modell falaira, ugyanis a valóságban, ahol szilárd fal van, ott a modell üres, tehát inverze a valós geometriának (nem maga az égőtér van modellezve, hanem az általa körbehatárolt áramlási térfogat). Ebben a lépésben érdemes elgondolkodni a különféle egyszerűsítési lehetőségeken, amelyek nem okoznak szignifikáns változást az eredményekben.



5. ábra

Csőves-gyűrűs égőtér hálózása Ansys CFX használatával. Forrás: *Flow Modelling in a Gas Turbine Combustion Chamber*. é. n.

A következő lépés a legkritikusabb a modellezés során, amelyben a numerikus háló elkészítése, vagyis az áramlási tér diszkretizációja folyik. A teret felbontjuk háromdimenziós elemekből álló hálózott részre, tekintettel arra, hogy a szimuláció a térnek mely pontjaiban végez számítást. A hálóelemek geometriai komplexitásától és az elemeknek a méretétől függően különbözőek lehetnek (hexaéder, tetraéder, gúla, hasáb).

Az 5. ábra az égőtér hálózását szemlélteti egy példán keresztül. A képen látható a teljes égőtér a hibrid, hexa- és tetraédes elemeket is tartalmazó hálózattal, valamint megfigyelhető a kilépésnél a határretegben tapasztalható sűrítés. Ennek kivitelezése (a hexa- és tetraédes elemek összekapcsolása) nagy szaktudást igényel, így legtöbb esetben csakis tetraédes elemeket használnak. Az előző művelet során már említettük az esetleges egyszerűsítés lehetőségét, amelynek jelentősége a hálózás fázisban tapasztalható igazán. Az olyan vizsgálatokkal ellentétben, ahol már kis számú hálóelem is képes megfelelő pontosságot nyújtani (például mechanikai vizsgálatok), a numerikus folyamatok elemzésénél fontos olyan csomópontok létrehozása, ahol a sebességgradiens kiemelkedő. Itt a hálózás sűrűsége jóval nagyobb lesz a háló többi részéhez képest, így szükséges lehet a vizsgálat gyorsasága érdekében a kisebb elemek,

mint például az égésterben lévő fúvókák redukálása. Az Ansys a készítőknél köszönhetően rendelkezik egy automatikus javítási képességgel, így minimálisan is, de képes eltávolítani a jelentéktelen jellemzőket.

Elemek hálózásánál érdemes külön figyelmet fordítani a falak menti áramlásra (határreteg!), ugyanis a közeg sebessége a falon zérus, míg attól távolodva növekszik. A hálót ezért érdemes besűrűsíteni a számítási pontosság érdekében. Természetesen a számítás gyorsasága lényegesen függ a létrehozott háló összetételétől és kialakításától. Így nélkülözhetetlen egy hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése is, amely során elérhető az optimális rácssűrűség. Ilyenkor kiemelten fontos odafigyelni arra, hogy a rács elegendően sűrű legyen ahhoz, hogy megfelelően tudjuk vizsgálni a kiválasztott térfogatot, tehát minden fontos áramlási jelenség jelenjen meg. Emellett figyelni kell arra, hogy ne legyen szükségtelenül sűrű sem. Ennél a folyamatnál a rács sűrűségének az előző rácshoz képest hozzávetőleg a kétszeresére való növelése a bevett eljárás. Fontos tisztázni, hogy a határoló felület milyen valós tulajdonságokkal rendelkezik, valamint ellenőrizni, hogy a határretegben lezajló folyamatok modellezésére a szoftver milyen közelítést alkalmaz. A felülethálózásnál a felhasználónak lehetősége van automatikusan létrehozni a hálót az Ansys képességének köszönhetően. Ilyenkor figyelni kell a hálózási beállítások helyességére, hogy a folyamat megfelelően valósuljon meg a felületen. Összegezve tehát a hálózás meghatározza, befolyásolja a megoldás pontosságát, konvergenciáját és sebességét.

Ezt követően lehetséges a különféle peremfeltételek, valamint a szimulációra vonatkozó kritériumok megadása, mint például a közegáramlás iránya, anyagtulajdonságok és a be- és kilépési paraméterek, amit a CFX-PRE segítségével valósíthat meg a felhasználó. Mivel a hajtómű több üzemmódon és különféle magasságokon képes működni, így fontos meghatározni az ehhez szükséges paramétereket is, gondolva itt a hajtóművön kívüli atmoszférikus nyomásra, vagy akár a tüzelőanyag-típushoz tartozó tulajdonságokra.

Az áramlás örvényes jellegének modellezése nagy tudást igénylő feladat. A jelenségek numerikus leképezésének sikere jelentősen függ a kiválasztott turbulenciamodell kiválasztásától.

Így a peremfeltételek megadásánál releváns az alkalmazandó turbulenciamodellt is kiválasztani, amelyek közül a leggyakoribbak:

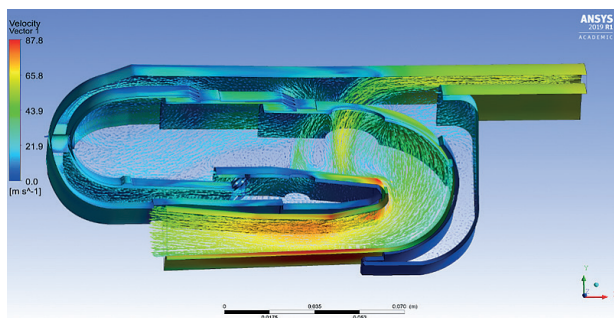
- Spalart–Allmaras (viszonylag egyszerű számításoknál alkalmazzák, mivel a komplex geometriák modellezésére nem alkalmas).
- Mixing length Model (az egyik leggyakrabban használt modell, amely alkalmas keveredési, valamint határretek megoldásához, azonban nem alkalmazható határretegleválás- és recirkulációfolyamatok vizsgálatához).
- $k-\epsilon$ Model (a legegyszerűbb modellek egyike, amelynek legnagyobb hátránya, hogy gyenge teljesítményt nyújt a különféle repülőmérnöki vizsgálatoknál. Azonban kitűnő alternatíva ipari felhasználások esetén).
- $k-\omega$ Model (kizárólagos fal menti alkalmazhatósága miatt csakis külső aerodinamikai folyamatokra alkalmazható).
- Shear Stress Transport Model (SST) (az előző két turbulenciamodell tulajdonságait kombinálva működik. A falhoz közel a $k-\omega$, attól távolodva a $k-\epsilon$ modellt használja, így kiváló választás aerodinamikai problémák megoldására).
- Reynolds Stress Model (már kezdeti vagy peremfeltételek megadásával is megbízhatóan alkalmazható, képes a legtöbb átlagáramlási tulajdonságot kellően nagy precizitással leírni).

A turbulenciamodell kiválasztásán kívül szükséges egy megfelelő égésmodell kijelölése is. Természetesen az Ansys CFX-ben számos ilyen modell áll rendelkezésre a felhasználónak, amelyek a térfogati égés, valamint a lángzónában történő reakciók leírására alkalmasak.

Ilyen például:

- Eddy Dissipation Model (EDM);
- Finite Rate Chemistry Model (FRC);
- Combined (EDM/FRC);
- PDF Flamelet Model (PFM);
- Burning Velocity Model (BVM);
- Extended Coherent Flame Model (ECFM);
- Fluent Non-Premixed (FnPM).

A soron következő lépés az Ansys Solver modul segítségével a számítás lefolytatása, amelyben a szoftver az általunk megadott kezdeti feltételek alapján kalkulálja ki az áramlási térben keletkező viszonyokat. A modul az egyenleteket rekurrensen oldja meg, így beállíthatjuk az iterációk számát. Ilyenkor célszerű megfigyelési pontokat létrehozni, amelyekkel a különféle megmaradási törvényszerűségek teljesítését vizsgálhatjuk, ellenőrizhetjük. Az eredmények kiértékelése, konklúzió megállapítása a szimulációs folyamat utolsó lépése.



6. ábra

Saphir-5 hajtómű égéstere Ansys-szimulációban. Forrás: Dr. Beneda Károly saját mérése

Mint az a bemutatott 6. ábrán is látható, a szimuláció eredményeképpen láthatóvá váltak az egyes égőtér részben kialakuló gázáramlási sebességek. Ugyanilyen módon szemléltethetők a hőmérsékleti és nyomáseloszlási jellegzetességek is. Számos megjelenítési lehetőség áll rendelkezésre egy esetleges értékelhető kép létrehozására, valamint a megadott feladat optimális eredményére.¹²

¹² Beneda Károly: Gázturbinás sugárhajtómű égésterének modellezése ANSYS CFX szoftverrel. i. m.; Beneda Károly: Az Ansys multifizikai szoftver alkalmazási lehetőségei gázturbinás hajtóművek numerikus analizisében. i. m. (9. lj.) Jordi Bonet Ruiz – Joan Llorens Llacuna: *Study of Combustion Using a Computational Fluid Dynamics Software (ANSYS)*. Universitat de Barcelona, 2015; Csató (2018) i. m.; Cîrciu Ionică et al.: Aircraft Engine Combustion Chamber Performances-Numerical Evaluation. *Applied Mechanics and Materials*, 811. (2015), 167–171. Ibrahim I. Enagi – K. A. Al-attab – Z. A. Zainal: Combustion chamber design and performance for micro gas turbine application. *Fuel Processing Technology*, 116. (2017), 258–268.; Jordan Gilmore: *Computational Fluid Dynamics Analysis of Jet Engine Test Facilities*. Christchurch, New Zealand, Mechanical Engineering at the University of Canterbury, 2011. *Flow Modelling in a Gas Turbine Combustion Chamber* (é. n.) i. m.

5. Összegzés

Az Ansys-féle szimulációk segítségével a felhasználó viszonylag gyorsan és egyszerűen képes látványos eredményeket kivitelezni, elérni, de minden esetben fontos valamilyen validálási folyamatot elvégezni annak érdekében, hogy a szimulációról kijelenthető legyen, hogy totálisan megfelel az általa ténylegesen modellezett jelenségeknek. Mivel a szoftvercsomag számos területet ölel fel, így belátható, hogy nemcsak égőtér-modellezésre alkalmas, hanem a hajtómű károsanyag-kibocsátásának mérésére is. Továbbá segítségével könnyedén vizsgálhatjuk az alternatív tüzelőanyagok viselkedését az égőtérben.

Felhasznált irodalom

- About Ansys.* é. n. Online: www.ansys.com/about-ansys
- Beneda Károly: *Az Ansys multifizikai szoftver alkalmazási lehetőségei gázturbinás hajtóművek numerikus analízisében.* Kutatói Referátum, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2016, GINOP-2.3.2-15-2016-00007.
- Beneda Károly: *Gázturbinás sugárhajtómű égésterének modellezése ANSYS CFX szoftverrel,* Kutatói Referátum, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, GINOP-2.3.2-15-2016-00007.
- Bicsák, György – Hornyák, Anita – Veress, Árpád: *Numerical Simulation of Combustion Processes in a Gas Turbine.* *AIP Conference Proceedings*, 1493. (2012), 1. 140–148. Online: <https://doi.org/10.1063/1.4765482>
- Bonet Ruiz, Jordi – Joan Llorens Llacuna: *Study of Combustion Using a Computational Fluid Dynamics Software (ANSYS).* Universitat de Barcelona, 2015.
- Cîrciu Ionică – Rotaru Constantin – Luculescu Doru – Constantinescu Cristian: *Aircraft Engine Combustion Chamber Performances-Numerical Evaluation,* *Applied Mechanics and Materials*, 811. (2015), 167–171. Online: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.811.167>
- Combustion Chamber Types.* Jet-X, é. n. Online: www.jet-x.org/a4.html
- Combustion Chambers.* é. n. Online: <https://diren.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/en/co/chambres-combustion.html>
- Combustion Section of Aircraft Gas Turbine Engine.* Online: www.aircraftsystemstech.com/p/combustion-section-combustion-section.html
- Combustor – Burner.* Online: www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/burner.html
- Correct air speed for fuel combustion.* Aviation, é. n. Online: <https://aviation.stackexchange.com/questions/33089/how-is-the-correct-air-speed-for-fuel-combustion-obtained-at-the-inlet-of-the-co>
- Csató Péter: *Gázturbinás hajtóművek égőtereinek numerikus vizsgálata, figyelembe véve az alternatív tüzelőanyagok alkalmazásának lehetőségét.* TDK-dolgozat, Szolnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék, 2018. Online: www.repulestudomany.hu/tdk/2018_Csato_Peter_SZD.pdf
- Enagi, Ibrahim I.–K.A. Al-attab – Z.A. Zainal: *Combustion chamber design and performance for micro gas turbine application.* *Fuel Processing Technology*, 166. (2017), 258–268. Online: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.05.037>
- Flow Modelling in a Gas Turbine Combustion Chamber.* é. n. Online: <http://cfd2012.com/ansys-cfx-gas-turbine-combustor.html>

- Gas Turbine Engines-Combustion Section (Part 1–2)*. Flight Mechanic, é.n. Online: www.flight-mechanic.com/gas-turbine-engines-combustion-section-part-one/
- Gilmore, Jordan: *Computational Fluid Dynamics Analysis of Jet Engine Test Facilities*. Christchurch, New Zealand, Mechanical Engineering at the University of Canterbury, 2011.
- Mechanical Analysis, Small but Mighty Powerful, Micro-turbine jet engine simulation and structural analysis using FloEFD™ and Cero® Simulate*. Online: https://frone.jp/public/products/FloEFD/WhitePaper/002_Small%20but%20Mighty%20Powerful.pdf
- Pásztor Endre – Varga Béla: Energy- and Aerodynamic Examination of Slightly Backward Leaning Impeller Blading of Small Centrifugal Compressors. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 43. (2015), 4. 199–205. Online: <https://doi.org/10.3311/PPtr.8093>
- Sánta Imre: *Repülőgép hajtóművek I. (Gázturbinás hajtóművek)*. Budapest, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Repülőgép és Hajók Tanszék, 2009.
- Varga Béla – Kavás László: Gázturbinás hajtóművek égőtere és nyomásveszteségük becslése. *Repüléstudományi Közlemények*, 29. (2017), 2. 85–94.

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

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



