



Nemzeti Közszerológati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

Készítette: Csató Péter honvéd tisztjelölt

2018



**Nemzeti Közszerológati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék**



**Gázturbinás hajtóművek égőterének numerikus szimulációja,
tekintettel az alternatív tüzelőanyagok hatásaira**

A témavezető neve, beosztása:

Dr. Tóth József alezredes, kiemelt gyakorlati oktató

Társ témavezető neve, beosztása:

Dr. Varga Béla alezredes, egyetemi docens

Készítette:

Csató Péter

Szolnok

2018

Tartalom

1. BEVEZETÉS	4
2. GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK ÉGŐTEREINEK BEMUTATÁSA	7
2.1. Történeti áttekintés	7
2.1.1. Németország:.....	7
2.1.2. Nagy-Britannia:.....	9
2.1.3. U.S.A.:	11
2.1.4. Szovjetunió:.....	14
2.1.5. Gázturbinás hajtóművek alkalmazása forgószárnyas repülőgépekben	15
3. ÉGŐTÉR TÍPUSOK	18
3.1. Égőterek kialakításának alapvető tervezési jellemzői	18
3.1.1. Tűzcső:	19
3.1.2. Diffúzor	20
4. ÁRAMLÁSOK AZ ÉGŐTÉRBEN	23
4.1. Elsődleges égési zóna:	23
4.2. Másodlagos égési zóna:	25
4.3. Tercier zóna:	25
5. ÉGŐTÉRBEN LEZAJLÓ FOLYAMATOK	27
5.1. Az égés fizikai és kémiai folyamatai	27
5.1.1. Teljes reakció intenzitás elmélete szegény keverék esetén	30
5.1.2. Teljes reakció intenzitás elmélete dús keverék esetén.....	31
5.2. A lángok típusai:	33
5.2.1. Lamináris láng:	33
5.2.2. Turbulens láng:	35
6. AZ ALTERNATÍV TÜZELŐANYAGOK TÍPUSAI ÉS ÉGÉSÜK BEMUTATÁSA	39
6.1. Repülőgép tüzelőanyagok főbb tulajdonságai:	40
6.1.1. Energiatartalom:.....	40
6.1.2. Stabilitás	41
6.1.3. Viskozitás:	42
6.1.4. Tisztaság	42
6.2. Biomass to Liquids :	43
6.3. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids:	45

6.4. Gas to Liquid:.....	46
7. TV2-117A HAJTÓMŰ ÉGŐTERÉNEK FELÉPÍTÉSE	47
7.1. Diffúzor	47
7.2. Égőtérház:	47
7.3. Tűzcső:	48
7.4. Tüzelőanyagfúvóka:	48
8. AZ ÉGŐTÉR MODELLJÉNEK ELŐKÉSZÍTÉSE A SZIMULÁCIÓKHOZ ANSYS CFX SZOFTVER FELHASZNÁLÁSÁVAL	49
8.1. Geometriai modell elkészítése:	49
8.2. Numerikus háló definiálása	51
9. ÖSSZEGZÉS	55
Irodalomjegyzék.....	56

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedek során a repülőeszközök – a kor kívánalmainak megfelelően – rendkívüli ütemben fejlődtek. Azonban továbbra is magukkal hordozzák azokat a negatív hatásokat, melyekre a mérnökök évek óta igyekeznek megoldást találni. Ide sorolhatjuk a napjainkban egyre nagyobb jelentőségű környezetvédelmi, környezetbiztonsági követelményeknek való megfelelést. Az elmúlt évtizedekben eddig még nem tapasztalt mennyiségű széndioxid jutott a légkörbe. Az emberi tevékenységnek köszönhető szén-dioxid-kibocsátás az Európai Bizottság és a Holland Környezetvédelmi Ügynökség által 2015-ben kiadott EDGAR adatbázis alapján 36 061,71 millió tonna. Egyéb, még erősebb üvegházhatású gázok, például a metán, nem szerepelnek ezen adatok között. Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport (IPCC) legfrissebb adatai szerint a légi közlekedés (belföldi és nemzetközi) felel az emberi tevékenység által generált szén-dioxid-kibocsátás 2% -áért (814 millió tonna). A repülés várható növekedési ütemét figyelembe véve azonban a kibocsájtott széndioxid mennyisége a következő 30 évben, további intézkedések nélkül, meg fog duplázódni. [37]

A CO₂ emisszió csökkentésének három lehetséges útja adódik:

- A légi járművek szerkezeti kialakításának változtatása, (az ellenállás csökkentésével csökken a tüzelőanyag felhasználás is) illetve alacsony emissziójú hajtóművek alkalmazása.
- A légiforgalom szabályozása, korlátozások bevezetése a légiközlekedésben
- Alternatív tüzelőanyagok alkalmazása

Ezt a növekedést lelassítandó, világszerte különböző kutatások folynak megfelelő hajtóanyag megtalálására és/vagy kifejlesztésére. A kulcsfolyamatok – azaz az égési reakciók számottevő hányada – mely során a káros anyagok jelentős része keletkezik, a hajtómű égőterében zajlik le. Azonban a repülőgép hajtómű égőtere roppant összetett, számos alkatrészből álló szerkezet, melyben rövid idő alatt, magas hőmérsékleten számtalan reakció játszódik le. E folyamatok vizsgálatát hagyományos módszerekkel, kísérletekkel nem lehetséges kellő pontossággal elvégezni. Például a hőmérséklet mérése és figyelése egy működő égőtérben igen nehéz feladat, mivel a magas hőmérséklettartományok és a hirtelen hőváltozások miatt nem engedhetők meg hagyományos hőmérők alkalmazása. Ezen túlmenően a mérőberendezések jelenléte jelentős hatást gyakorolhat az áramlási viszonyokra a nyomásesésre, a hőátadásra, a keverésre és az égetésre, ami a mért eredmények jelentős hibáit eredményezheti. Ezért a kutatási módszerek tekintetében napjainkban a kísérleti vizsgálatok mellett egyre nagyobb szerephez jut a numerikus matematikai eljárásokra épülő szimuláció alkalmazása. Ez a módszer a gyors és hatékony tervezésen túl lehetőséget nyújt a korábbi fejlesztések eredményeként létrehozott és alkalmazott eszközök komplex vizsgálatára is.

A Katonai Repülő Intézetnél jelenleg folyó kutatási projekt egyik kiemelt kutatási területe az alternatív tüzelőanyagok alkalmazási lehetőségeinek az állami célú repülőeszközökben való alkalmazásának vizsgálata. A kutatás egyik részfeladata a gázturbinás hajtóművek égőtereiben lejátszódó folyamatok szimuláció segítségével történő elemzése. Mivel a képzésem nem tartalmaz ilyen célra felhasználható szimulációs illetve CAD szoftverek alkalmazásával kapcsolatos ismerethalmazra épülő modulokat, ezeket az ismereteket autodidakta módon a képzésemen kívül szereztem meg és ültettem át a gyakorlatba. A rendelkezésemre álló idő alatt alap felhasználói szinten elsajátítottam az ANSYS CFX és SolidEdge szoftverek – számomra rendelkezésre álló – diák verzióinak alkalmazását. Ebből adódóan, munkám célja egy a védelmi szektorban is rendszerben lévő helikopter hajtómű égőtéréről rendelkezésre álló információk, illetve az alkatrészek méréséből származó adatok ismertetése, valamint SolidEdge és ANSYS CFX szoftverekbe való átültetése, majd ezek felhasználásával a tervezett modell szimulációs vizsgálata. Dolgozatomban a szimuláció folyamatának első két lépését végeztem el, magában

foglalja az égőtér geometriájának CAD alapú előállítását, a hozzá kapcsolódó numerikus háló létrehozását. Emellett dolgozatomban kitértem az említett hajtóműhöz felhasználni kívánt alternatív tüzelőanyag típusok meghatározására, tulajdonságaik ismertetésére és a definiált környezetben való viselkedésének elemzésére.

2. GÁZTURBINÁS HAJTÓMŰVEK ÉGŐTEREINEK BEMUTATÁSA

A gázturbinák olyan hőerőgépek, amelyek a tüzelőanyagban tárolt kémiai energiát alakítják át – alkalmazástól függően – mechanikai vagy propulziós energiává.

2.1. Történeti áttekintés

A gázturbinákban megvalósuló körfolyamatra az először John Barber szerzett szabadalmat 1791-ben, ezután kezdődtek azok – az akkor még sikertelen kísérletek – melyek a Barber szabadalma szerinti körfolyamat megvalósítását tűzték ki célul. Az első működőképes szerkezetet 1909-ben készítették a francia Armengand testvérek és Charles Lemale. Azonban a szükséges áramlástani ismeretek hiányában nem voltak képesek jó hatásfokú kompresszort alkotni, illetve nem tudtak olyan anyagot sem tudtak előállítani, amely a turbinára érkező magas hőmérsékletnek ellen tudott volna állni.

Az 1930-as évek közepén kezdődtek újra az elméleti izobár munkafolyamat alapján működő gázturbinákkal folytatott kísérletek. Azonban ekkor még nem mutattak érdeklődést az új, bizonytalan technológia iránt. A második világháború kitörésével és a gyártástechnológia fejlődésével több országban is meglátták a benne rejlő lehetőségeket és a gázturbinák fejlődése tovább folytatódhatott, aminek eredményeként a háború végén már repülőgépek hajtóműveként is alkalmazták őket. Az információáramlás, háború okozta limitáltsága miatt a felmerülő problémákra országtól függően több különböző megoldások születtek.

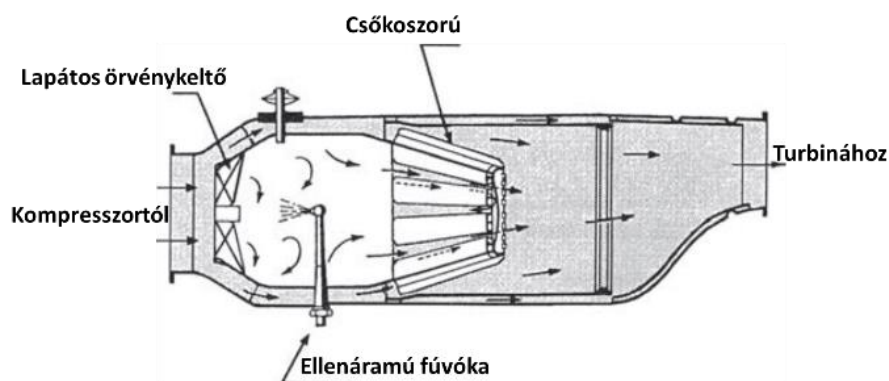
2.1.1. Németország:

Az első, gázturbinás hajtóművel végrehajtott sikeres repülést 1939. augusztus 27-én egy Heinkel HE 178 típusú repülőgéppel végezték, aminek meghajtó eleme a Hans von Ohain német fizikus tervezte HeS 3 hajtómű volt. Ennek ellenére az első tömeggyártott típus a Jumo 004 volt, melyet második világháború végén a Messerschmitt Me 262 vadászipülőgépekben is alkalmaztak.



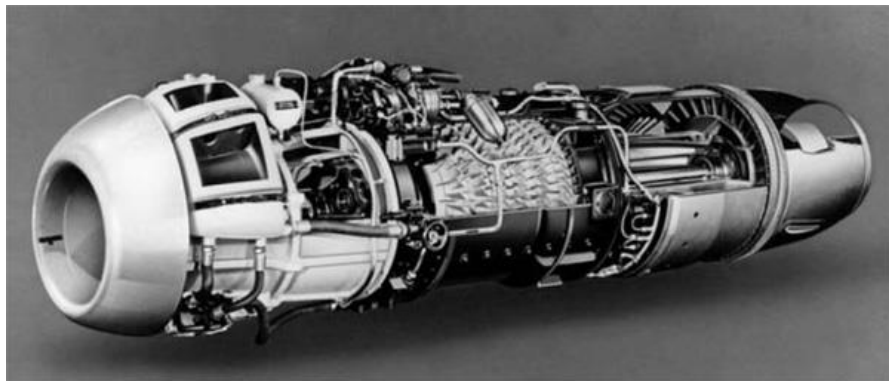
1. ábra: Jumo 004 típusú hajtómű [40]

Ez a hajtómű axiál kompresszorral és hat darab egyenes áramú csöves égőtérrel rendelkezett, melyekbe egy-egy ellenáramú fúvókát és lapátos örvénykeltőt építettek. A lángzónába benyúló, áramlással szembefordított fúvókák jó porlasztást és keveredést biztosítanak, így az égőtérbe érkező primer levegővel keveredett tüzelőanyag, sztöchiometrikushoz közeli égést érhetett el. Az égőtér belsejében a primer és a szekunder áramot a lángzóna után egyesítik. A mellső részen a tűzcső falához levegő vezetékeket hegesztettek fel, az áramlás irányába eső részen pedig egy gyűrű alakú, domború záró lemezhez hegesztették őket. A forró égéstermék a csövek közötti réseken átáramolva keveredik a hidegebb szekunder levegővel, míg ennek maradéka az előbb említett csöveken áramolva keveredik a forró gázba, miközben hűti magukat a csöveket is. A hideg levegő és a forró gázok tökéletesebb keveredését a domború zárólemez által létrehozott visszaáramlási zóna biztosítja. Ez a hajtómű 8,8 kN tolóerőt biztosított. (1. ábra). Legnagyobb problémája a radiálisan benyúló fúvóka óriási hőterhelése volt, emiatt hűtésre volt szükség. Nagyban rontotta a porlasztás hatásfokát a szintén fúvókákon megjelenő kokszerakódás is.

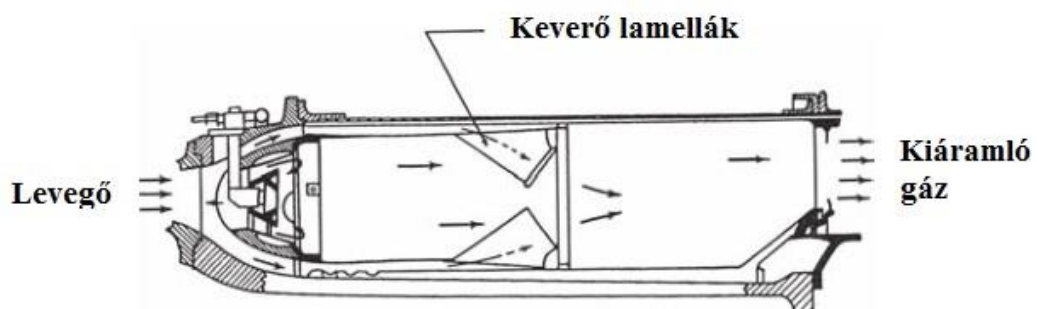


2. ábra: Jumo 004-es hajtómű égőterének sematikus rajza [20]

A másik német gázturbinás hajtómű, melyet sorozatban gyártottak a második világháborúban, a BMW 003 volt, melyet többek között Heinkel He-162 típusú repülőgépből használtak. Ez a típus gyűrűs égőtérrel rendelkezett. A 16 db fűvóka minden darabját egy-egy terelőlemez vett körül, mely biztosítja, hogy a primer levegő körül- és átáramolja azokat, így stabilizálva az égést és biztosítva a megfelelő keveredést. A hideg szekunder levegőt az égőteret kívülről vezették, mind a belső, mind a külső keresztmetszetben, majd 40-40 darab keverő lamellán keresztül áramolva keveredett el a forró primer gázaival. Végeredményként viszonylag kis nyomásvesztést kaptak, de ennek ára a túl nagy hosszúság volt. [20] [23] [25]



3. ábra: BMW 003 típusú hajtómű [11]

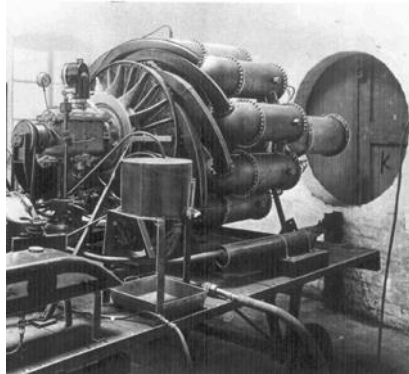


4. ábra: BMW 003-as hajtómű égőterének sematikus rajza [20]

2.1.2. Nagy-Britannia:

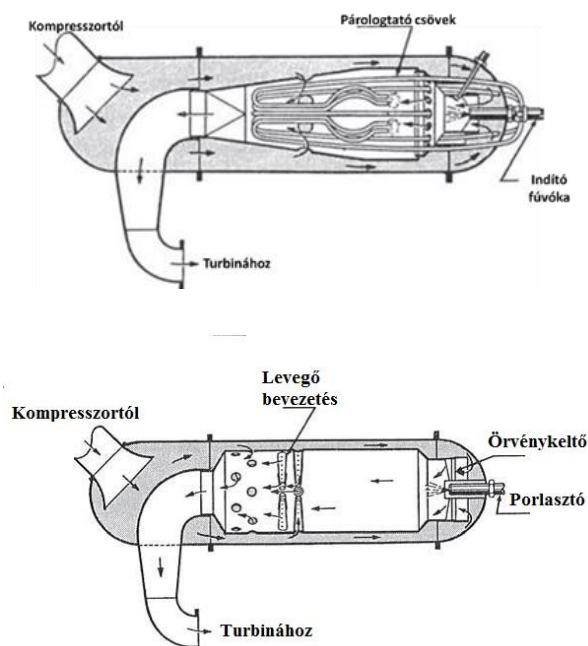
Az első sikeres kísérletek az angol származású Frank Whittle nevéhez fűződnek, aki, a saját maga által tervezett gázturbinás hajtómű első tesztjeit 1937-ben hajtotta végre. A WU (azaz Whittle Unit) nevű gázturbinás hajtóműve már tartalmazta a főbb gépegyégeket, amelyek a modern gázturbinás hajtóművekben is megtalálhatóak. Égőterében tíz darab különálló tűzcső helyezkedett el, melybe párologtatósövény útján történt az üzemanyag porlasztás. Whittle erre

a célra több mint harminc féle párologtatócső-konfigurációt próbált ki. Sajnos még így is súlyos problémák adódtak ezzel a rendszerrel, főként a már a Jumo 004-nél említett nagy hőterhelés miatti repedések, és a gyors kokszosodás tekintetében.



5. ábra: A "Whittle Unit" hajtómű [12]

Ennek ellenére számos kísérlet és fejlesztés után Whittle egy olyan hajtóművet tervezett, melynek égőterében, mind a tíz tűzcsőben egy-egy örvénykeltős porlasztót helyeztek el. Ez az örvénykeltő biztosította azt a visszaáramlási zónát, mely visszakeringeti a forró égéstermék, ezáltal biztosítva az égés stabilitását és a megfelelő keveredést. További kisebb változtatások eredménye lett végül a W1-es hajtómű, melyet egy Gloster E28/39 típusú repülőgépbe építettek bele, amely hosszú kísérletsorozat után az sikeres repülést hajtott végre 1941 május 15-én. [5][6]



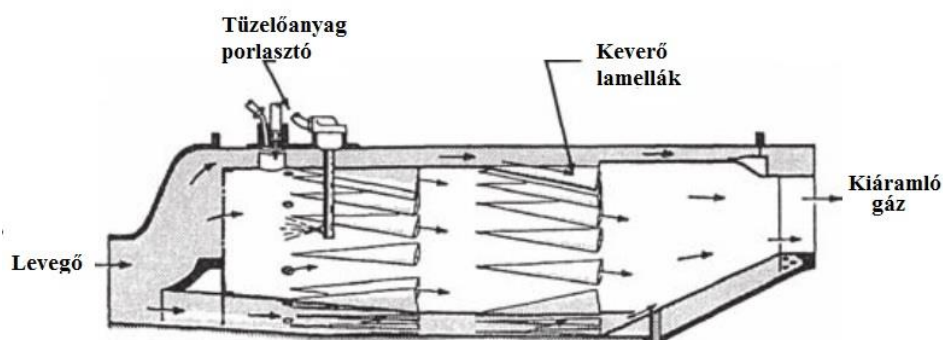
6. ábra: A "Whittle Unit" párologtatós és porlasztós égőterének sematikus rajza [20]

Egy másik korai brit hajtómű volt a Frank Halford által tervezett De Havilland Goblin, melyet a Lockheed P-40 erőforrása volt. Nagy változást hozott az eddigiekhez képest, hiszen ez volt az első brit hajtómű, amely "egyenes" égőtérrel használt. Azonban a csöves elrendezést megtartották és tizenhat darab tűzcsövet építettek be.



7. ábra: De Havilland Goblin típusú hajtómű [13]

Említésre méltó még a Metrovick típusú hajtómű, melyet már gyűrűs égőtérrel láttak el. A másik érdekessége, hogy a Jumo 004-hez hasonlóan a primer levegőáramban megy végbe a tüzelőanyag bekeverése és az égés. A szekunder áram egyik része segíti az égést, a másik része pedig visszahűti a forró gázt a turbina számára elfogadható hőmérsékletre. Ezt a kétlépcsős levegő bekeverést ún. „szendvics profilú” lamellákkal oldották meg, melyek azonban az anyagtechnológia fejletlensége miatt nagy súllyal rendelkeztek, de hajlamosak voltak az átégésre is. [20] [23] [25]



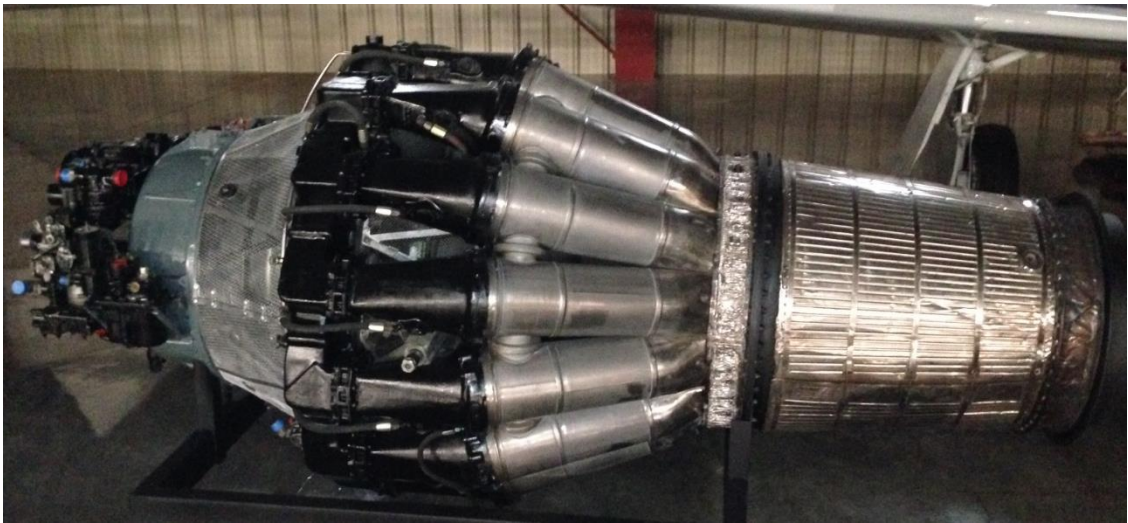
8. ábra: Metrowick hajtómű gyűrűs égőtérének sematikus rajza [20]

2.1.3. U.S.A.:

A brit W1 hajtómű fejlesztése során döntés született egy nagyobb, erősebb Whittle-féle gázturbina készítéséről, melynek tervei 1941-ben W2B néven el is készültek és átadattak az

amerikai General Electric Company-nak. Hat hónap leforgása alatt elkészítettek két darabot. 1947-ben a Pratt and Whitney megvásárolta a Rolls Royce által gyártott Nene típusú hajtómű licencét. Mindkét vállalat igen gyors tempóban kezdett a gázturbinás hajtóművek fejlesztéséhez, majd kis idő múlva saját típust alkottak.

A General Electric a J33-as hajtóműhöz tervezett egyenes- és fordított áramú csöves égőteret is, melyek közül az egyenesáramú a később kifejlesztett J35 és J47 hajtóművekben is felhasználásra került.



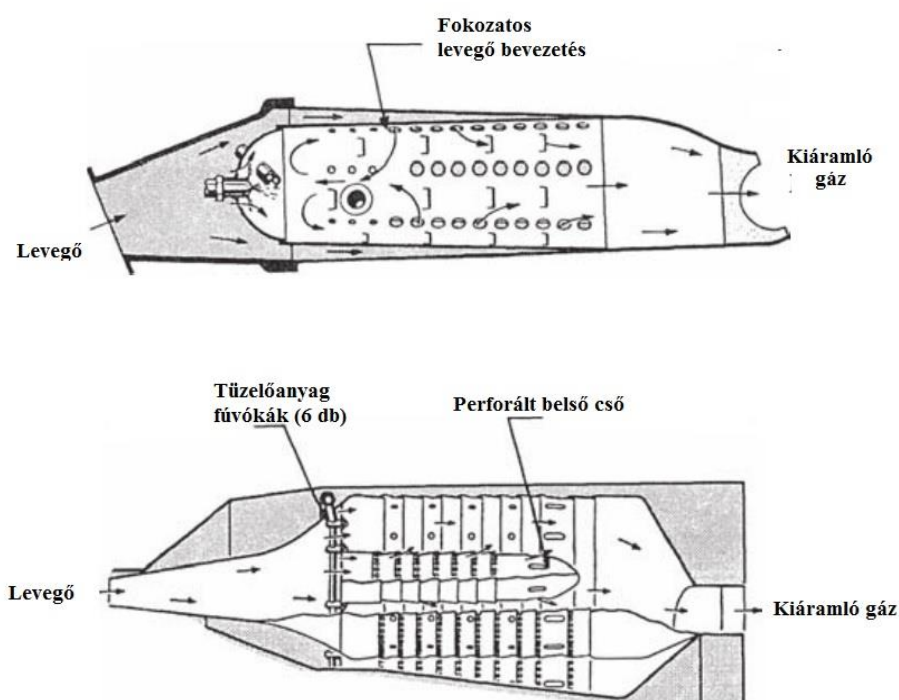
9. ábra: J33 típusú hajtómű [14]

Érdemes megemlíteni a Pratt and Whitney J57 hajtóműhöz tervezett égőterét, amelyben a nyolc tűzcső egy gyűrű alakú házban helyezkedett el. Az érdekessége az volt, hogy minden tűzcső tengelyében egy perforált csövet helyeztek el, mely a tűzcső feléig nyúlt hátra. Emiatt minden tűzcső egy kis égőtérként üzemelt. Ezekhez tartozott még hat darab tüzelőanyagfűvőka lapátos örvénykeltővel felszerelve.



10. ábra: J57 típusú hajtómű részlet [15]

Egy harmadik utat választott a Westinghouse vállalat, ami 1943-ban európai behatás nélkül fejlesztett ki gázturbinás hajtóműveket. Többek között a J30 hajtóművet, melynél gyűrűs- és a J35-öt, aminél kettős-gyűrűs égőteret alkalmaztak. Ezutóbbi koncepció megelőzte a korát, hiszen nem irányult rá nagy érdeklődés, amíg szempont nem lett a károsanyag kibocsátás csökkentése. (A General Electric 1970-ben vette elő újra és építette meg a CFM56-B alacsony károsanyag kibocsátású hajtóművet.) [3] [4] [23]



11. ábra: J33 és J57 hajtóművek égőterének sematikus rajza [20]

2.1.4. Szovjetunió:

A Szovjetunió a nyugati országokhoz képest sokkal nehezebben jutott el az első gázturbinás hajtóművek tervezéséig, illetve azok repülőgépekbe való beépítéséig, bár már az 1930-as években komoly kutatásokat és kísérleteket végzett a Mikojan és a Szuhoj tervezőiroda is. Azonban a háború sürgős követelményei, a tömeggyártás feltételei, valamint a repülőgépgyártás evakuálása az Urálon túlra, nem tette lehetővé ilyen fejlesztések létrejöttét. A döntő áttörést a II. világháború során zsákmányolt Jumo 004 és BMW 003 hajtóművek jelentették, melyek másolatait több szovjet repülőgépbe beépítették. Ezen hajtóművek alapjául szolgáltak azon kutatásoknak, melyből később a MiG és Jak sorozatok energiaforrásai születtek. A II. Világháború után a Klimov VK–1 (VK – Vlagyimir Klimov) típusú gázturbinás sugárhajtóművet kezdték sorozatban gyártani a Rolls Royce Nene továbbfejlesztése alapján, mely 9 darab csöves égőtérrel rendelkezett.



12. ábra: VK–1 típusú hajtómű

A második világháborút követően egységesebbé vált az égőterek tervezési filozófiája és ezáltal a kialakítások hasonlósága is érthető, emellett az égőterekkel szemben támasztott alapvető követelményrendszer is azonossá vált.

Ez magában foglalja többek között:

- a tökéletes égés megteremtését, csökkentve ezáltal a károsanyag kibocsátást, illetve a tüzelőanyag fogyasztást;

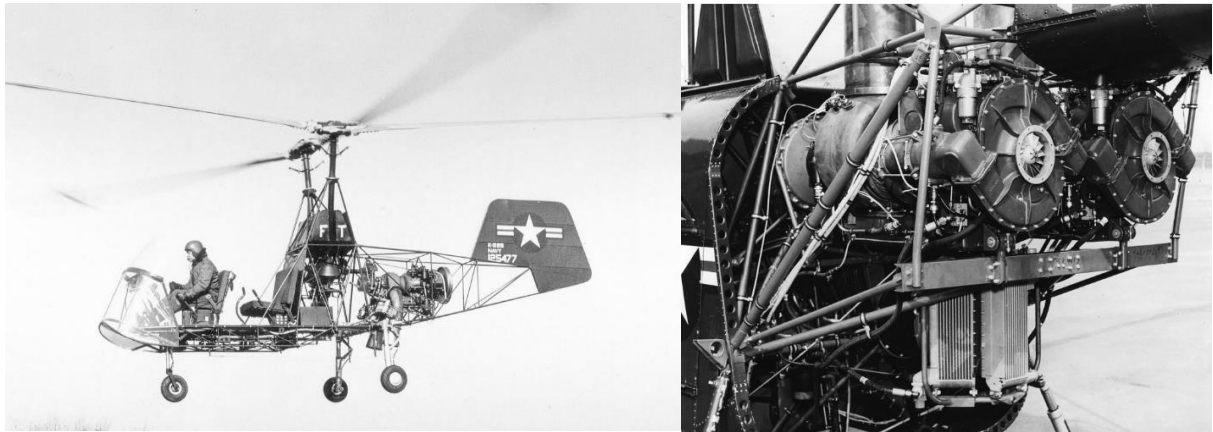
- az égés teljes mértékben az égőtérben valósuljon meg, ne terjedjen tovább a turbinára, hiszen az jelentősen csökkentené annak élettartamát;
- a tüzelőanyag gyújtás és lángkialvás esetén az újra indítás lehetőségének biztosítását;
- az égőtérben a minimális nyomásveszteségre törekvést;
- az égőtér kilépő hőmérsékletének időbeni egységességét;
- lerakódások (kokszosodás) elkerülését. Ez részben a tökéletlen égés indikátora is, valamint növelné az égőtér nyomásveszteségét és helyi extra magas hőmérsékletű pontokat hozhat létre, ami az égőtér átégéséhez vezethet;
- hosszú élettartamot és meghibásodás mentes működést;
- a láng stabilitását a munkaközeg tömegáramának, sebességének és az egyéb üzemeltetési körülmények jelentős változása mellett is;
- lángkialvásra való hajlam (tolóerő teljes elvesztésének veszélye állna fenn);
- méret és tömeg minimalizálását.

Ennek szellemében új égőtér kialakítások jelentek meg, melyek további fejlesztése napjainkban is zajlik, de hirtelen áttörés nem történt. A szerkezeti anyagok tökéletesedésének köszönhetően a belépő levegő üzemi hőmérséklet 450 K° -ról 900 K° -ra, a nyomása 5 bar-ról 50 bar-ra, a kilépő hőmérséklet pedig 1100 K° -ról egyes esetekben több mint 1800 K° -ra növekedhetett. Ennek ellenére az égőterek üzemideje is sokszorosára növekedett. Az égés hatásfoka megközelíti a száz százalékot, melyből következik, hogy a hajtóművek károsanyag kibocsátása drasztikusan csökken. [2]

2.1.5. Gázturbinás hajtóművek alkalmazása forgószárnyas repülőgépekben

A helyből fel- és leszállás képességének fontosságát is igen hamar felismerték, de technológiai akadályok miatt csak jóval később, a hajtóművek teljesítményének növekedésével, 1940-es években nyílt lehetőség e probléma megoldására. Ebben az időszakban számos tervező kísérletezett forgószárnyas repülőgépekkel, többek között Lawrence Dale Bell, Frank Piasecki és Stanley Hiller. Ekkor a tervezők még nem rendelkeztek elegendő információval a helikoptereket jellemző aszimmetrikus áramlási viszonyokról, ezért csak néhány eszköz jutott el a gyakorlati alkalmazásig. A helikopterek fő feladatkörébe a légimentés, tűzérési megfigyelés és futárfeladatok tartoztak. Ilyen szerepben, bár korlátozott számban, de a II. világháborúban is megjelentek. Ezek még igen korlátozott sebességgel ($120\text{--}140\text{ km/h}$) és hasznos teherbírással ($\sim 250\text{ kg}$) rendelkeztek. Sajnos a dugattyús motorokkal továbbra sem voltak képesek a kívánt nagyságú teljesítményt elérni, nem beszélve a méret és súlytöbbletről.

Így a tervezőknek át kellett térni a merevszárnyú repülőgépeknél is egyre inkább elterjedt gázturbinás meghajtásra. Először a már rendelkezésre álló légszavas gázturbinás hajtóműveket próbálták átalakítani helikopterekben történő alkalmazásra. Ilyen volt Charles Kaman, amerikai mérnök K-225 típusú szinkroptere, melybe 1951-ben egy Boeing 502-2-es gázturbinás hajtóművet épített be, amely 130 kW teljesítményű volt. Bár kisebb teljesítménnyel rendelkezett, kisebb súlyával és nagyobb hatékonyságával – különösen nagyobb magasságban – új irányt mutatott a helikoptergyártásban és kiszélesítette annak alkalmazhatóságát.



13. ábra: K-225 típusú szinkropter [16] és Boeing 502-2-es gázturbinás hajtómű [17]

Rá kellett jönniük azonban, hogy a forgószárnyak működtetéséhez más típusú tengelyteljesítményt szolgáltató hajtómű-konstrukcióra van szükség. Az Egyesült Államok kormánya a General Electric-et kérte fel egy új, könnyű és megbízható, helikoptereken alkalmazható tengelyteljesítményt szolgáltató gázturbina kifejlesztésére. A XT-58 elnevezésű program végeredménye egy 596 kW tengelyteljesítményű gázturbina lett, amely mindössze 181 kg-ot nyomott. Ennek továbbfejlesztett változata 1957-ben T-58 néven vált ismertté, melynek teljesítménye 783 kW-ra növekedett, súlya pedig tovább csökkent. Felismerve ennek jelentőségét az ezt követő években már több tervezővállalat is ezt a típust és ennek modifikációit kezdte alkalmazni helikoptereiben.



14. ábra: T-58 típusú hajtómű [18]

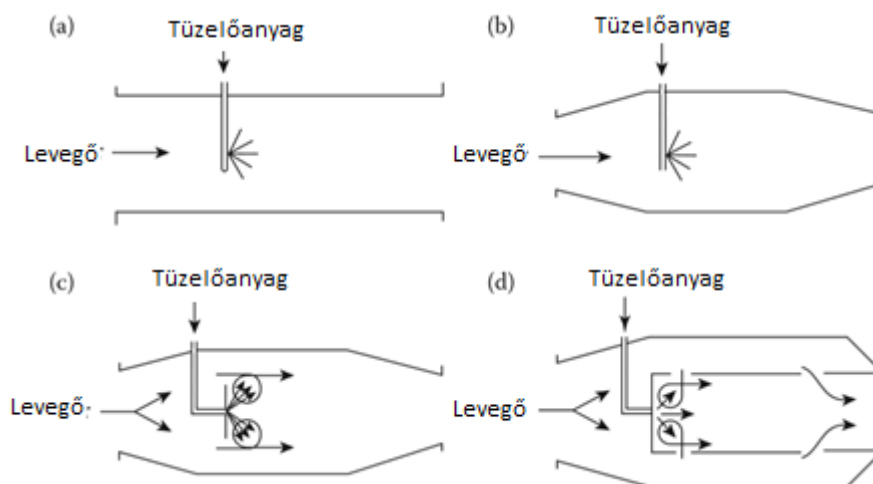
Annak ellenére, hogy a Szovjetunióban a helikopterfejlesztés is viszonylag későn indult meg, a II. világháború után az Egyesült Államok mellett a legintenzívebb helikopter gyártás és fejlesztés itt zajlott. Két szovjet helikopter-tervező iroda munkássága emelkedett ki. Az egyik Nyikolaj Iljics Kamov, akinek a névjegye lett a koaxiális elrendezésű két forgószárnyas kialakítás. A másik, talán még sikeresebb és ismertebb tervező Mihail Leontyevics Mil. Az ő nevéhez fűződik az első szovjet második generációs helikopter, mely 1957-ben jelent meg. Az 50-es évek második felében hasonló problémák merültek fel, mint az Egyesült Államokban. Mivel az eredetileg merevszárnyú repülőgépek számára tervezett hajtóművek, helikopterbe építve nem megfelelő teljesítményt nyújtottak, ezért kifejezetten helikopterekre optimalizált hajtóműre volt szükség. Miután az Izotov tervezőiroda utasítást kapott az ilyen irányú fejlesztések megkezdésére, 1962-ben elkészült az új TV2-117A hajtómű, mely felszálló üzemmódon 1118kW teljesítményt adott, viszonylag jó fajlagos mutatók mellett: a hajtómű fajlagos hasznos munkája 160–164 kJ/kg, termikus hatásfoka pedig ~22,5%, ami a maga korában kielégítőnek. (A mai viszonylatban viszont kifejezetten kevésnek számít) [20] [21] [25]

3. ÉGŐTÉR TÍPUSOK

3.1. Égőterek kialakításának alapvető tervezési jellemzői

Érdemes röviden megvizsgálni azokat a megfontolásokat, amelyek meghatározzák az égőtér alapvető geometriáját. Ez azért fontos, mert segít meghatározni az égőtér – a működés szempontjából – legfontosabb elemeit. Az 15.a. Ábrán a legegyszerűbb égőtérforma látható: a kompresszort a turbinával összekötő egyenes csővezeték. Sajnos ez az egyszerű elrendezés a gyakorlatban nem alkalmazható a túl nagy nyomásvesztés miatt. Az égés miatt bekövetkező alapvető nyomásvesztés arányos a levegő sebességének négyzetével, és 150-200 m/s -os kompresszor kimeneti sebesség esetén a veszteség a kompresszorban elért nyomásnövekedés majdnem egyharmadát teszi ki. Ennek a nyomásvesztésnek az elfogadható szintre való csökkentése érdekében a levegő sebességét csökkenteni kell, ami azért is fontos, hogy a láng ne szakadjon le. Ebből a célból diffúzort alkalmaznak. (15.b ábra). A diffúzor beépítése azonban nem elegendő a levegő megfelelő lassításához, ezután a fordított áramlási zónát kell létrehozni. (15.c ábra) Ennek nem csak az a szerepe, hogy magát az áramlás sebességét lecsökkentse a láng terjedési sebessége alá, megakadályozva ezzel a láng lefűvását, hanem forró égéstermékkel juttat vissza, ezzel segítve a hőátadást és növelve az égés hatásfokát, valamint folyamatos gyújtást biztosít a levegő-tüzelőanyag keverék számára. Az egyetlen probléma ezzel az elrendezéssel az, hogy annak érdekében, hogy a kívánt hőmérsékletnövekedést elérjük, az égőtér légfelesleg tényezőjének általában 30-40 körülinek kell lennie, ami jóval a levegő-tüzelőanyag keverék éghetőségének határán kívül esik. Ennek megoldására alkalmazzák a 15.d ábra szerinti megoldást. Ideális esetben az primer égési zónában a légfelesleg tényezőnek körülbelül tizennyolcnak kell lennie, bár a magasabb érték (kb. 24) néha előnyösebb, ha a nitrogén-oxidok alacsony kibocsátása az elsődleges szempont. Az égésben részt nem vevő (szekunder) levegőt az égési zóna után viszik be a forró égéstermékhez, ezáltal a hőmérsékletet a turbina számára elfogadható értékre csökkentve. Általánosságban elmondható, hogy minden égőtér tartalmaz egy légsatornát, diffúzort, tűzcsövet és tüzelőanyag befecskendezőt. Az égőtér adott típusának és elrendezésének megválasztását nagymértékben a hajtómű tulajdonságai határozzák meg, de erősen befolyásolja a rendelkezésre álló hely lehető leghatékonyabb kihasználásának kényszere. A legtöbb égőtértípusnál a tüzelőanyagot az égési zónába porlasztják fűvókákon keresztül. Ehhez nagy nyomásra van szükség, hogy magas áramlási sebességet jöjjön létre, és a tüzelőanyag apró cseppekre szakadjon szét mielőtt az elsődleges tűztérbe kerülne. A folyadékcseppek méretének csökkenésével csökken a párolgási

idő és nagyobb a párolgás sebessége. A porlasztás minősége azért kiemelkedő fontosságú, mert kihatással van az égés minőségére, a lángstabilitásra, és a károsanyag-kibocsátásra is.

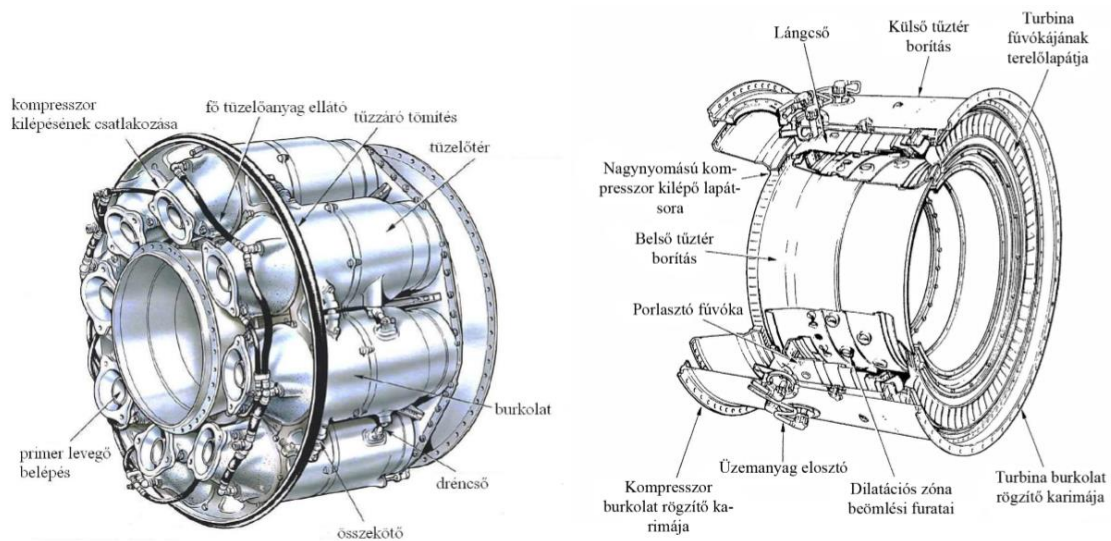


15. ábra: Hagyományos égőtér konfiguráció származtatása [25]

3.1.1. Tűzcső:

Az elmúlt hetven év leforgása alatt három féle, különböző égőtér felépítés terjedt el. A legtöbb korai gázturbinás hajtómű, például a Whittle W2B, a Jumo 004 és az RR Nene, a Dart és a Derwent egyaránt csöves égőtereket alkalmazott, rendszerint 6 - 16 darab tűzcsővel. Ezek fő előnye, hogy viszonylag olcsón és gyorsan előállíthatóak. Azonban a túl nagy hossz méret és súly miatt nem praktikus a használatuk a légi járművek hajtóműveiben. Fő alkalmazási területük olyan iparágakban van, ahol a könnyű hozzáférhetőség és egyszerű karbantartás elsődleges szempont. Az 1950-es évektől kezdődően általánosságban elmondható, hogy a legtöbb gyártó lassan elhagyta a csöves égőtereket és áttért csöves-gyűrűs égőtér kialakításra, ahol a gyűrűs égőtérházban helyezték el az általában 6-10 különálló tűzcsövet. Ez a koncepció a gyűrűs égőtér kompaktságát és a csöves égőtér mechanikai szilárdságát kombinálja. A csöves-gyűrűs kialakítás hátránya, mely már a csövesnél is jelentkezett, a rendszerösszekötők (keresztűtűzcsövek) szükségessége. A csöves-gyűrűs égőtérrel felszerelt hajtóművek közé tartozik az Allison 501-K, a GE J73 és a J79, a P & W J57 és a J75, valamint az RR Avon, a Conway, az Olympus, a Tyne és a Spey. Azonban a turbinák hőterhelése továbbra sem

egyenletes.



16. ábra: Csöves (balra) és gyűrűs (jobbra) égőterek [26]

Manapság azonban már ez a típus is kiszorult a korszerű hajtóművek esetében. A hatvanas évektől jelent meg és terjedt el a gyűrűs égőtér, ahol gyűrű alakú égőtérházban van elhelyezve a szintén gyűrű alakú tűzcső, így a kompresszor és a turbina közötti térben megy végbe a keverék kialakítás és az égés, továbbá a teljes reakciózóna (vagy annak egy része), valamint a keveredési zóna közös. Sok szempontból ez a tűzcső ideális formája, mert jobb keveredést és magasabb hatásfokot biztosít, mint az előzőek. Emellett ez a kialakítás sokkal könnyebb, kompaktabb, alacsonyabb nyomásvesztésű ($< 5\%$) egységet eredményez. A legfontosabb változás, elődjeihez képest, hogy a turbina belépő keresztmetszetén egyenletes gázhőmérsékletet biztosít. Azonban nagyobb mechanikai igénybevételnek kell megfelelniük, valamint fejlesztésük is sokkal munkaigényesebb és drágább, mivel rendkívül nagy közegáram generálása szükséges a kísérletekhez, és cseréje is csak a hajtómű teljes megbontásával lehetséges.

3.1.2. Diffúzor

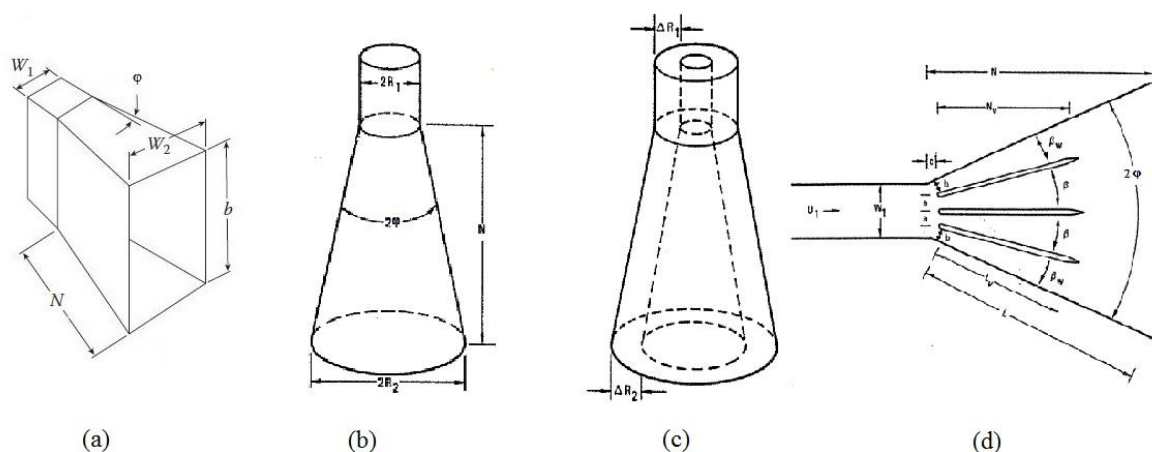
A kompresszorból kilépő 150-200 m/s axiális sebességű levegőt az égőtérbe való bejutás előtt szükséges lelassítani. Ennek két oka van:

- annak érdekében, hogy a láng stabil maradjon;
- az áramlás következtében keletkező súrlódás a tűzcső fala és az áramló közeg között (hideg veszteségek) minimalizálása céljából.

Ezt a diffúzor kialakításával valósítják meg, melynek szerepe tehát elsősorban a levegő sebességének csökkentése az égőtér előtt, illetve a sebességcsökkenésből adódóan a nyomás további növelése. A kialakításnál sajnos nincsenek egzakt számítási módok, amelyekkel egyértelműen meg lehet adni a méreteket, ezért a mérnökök a különböző paraméterekkel rendelkező modelleken végzett kísérletek segítségével dolgozzák ki a diffúzorok végleges kialakítását. A mérések és a tapasztalat megmutatták, hogy a diffúzorban két féle veszteség a mérvadó. Az egyik a fali súrlódásból származó veszteség, mely a diffúzor nyílásszögének növelésével csökken. A másik pedig az áramlás leválásából származó veszteség, mely a nyílásszög növeléssel növekszik. Ha a diffúzor nyílásszöge nagyon kicsi, akkor leválásból származó veszteség nincs, ellenben a kis nyílásszög miatt a diffúzor hossza megnövekszik, mely a fali súrlódás értékének növekedését vonja maga után. Ha a keresztmetszet bővülést rövid úton valósítjuk meg, akkor a diffúzor nyílásszöge lesz nagy. Ebből adódik, hogy a fali súrlódás gyakorlatilag elhanyagolható, ellenben a leválási veszteség nagy. Ezekből kiindulva a kialakításnál arra kell törekedni, hogy mindkét típusú veszteség együttesen a lehető legalacsonyabb legyen.

Általában a következő diffúzor kialakításokat alkalmazzák:

- téglalap keresztmetszetű diffúzor (18.a ábra)
- kör keresztmetszetű diffúzor (kúpos) (18.b ábra)
- gyűrűs diffúzor (18.c ábra)
- lapátos diffúzor (18.d ábra)



17. ábra: Leggyakoribb diffúzorfajták [20] [25]

A geometriai kialakítást, illetve a diffúzor hatékonyságát alapvetően befolyásolják a kompresszorból kilépő, azaz a diffúzorba belépő közeg paraméterei:

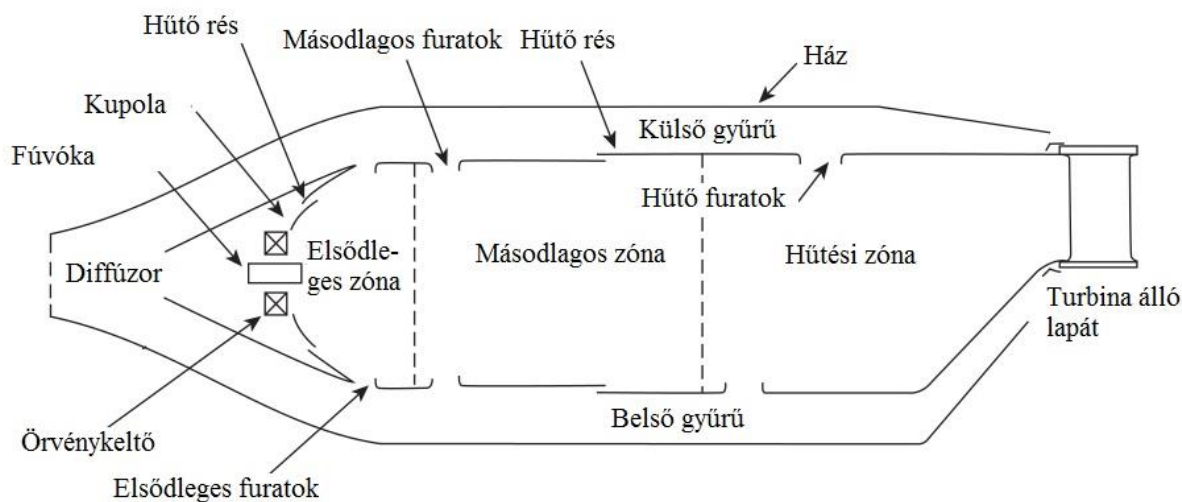
- Reynolds szám
- Mach szám
- Turbulencia mértéke
- Forgási sebesség (közeg tangenciális irányú sebessége)

Reynolds szám:

Vizsgálatok kimutatták, hogy a diffúzor vékony határréteg mellett működik jól, és a határréteg vastagodásával romlik a diffúzor teljesítménye. A Reynolds szám növekedése egy bizonyos határig javítja a diffúzorok áramlási tulajdonságait, hiszen a belépő keresztmetszetben a Reynolds szám növekedésével csökken a határréteg vastagsága. Ez a hatás más-más mértékben jelenik meg az különböző diffúzor fajtáknál. A gázturbinák égőtereiben alkalmazott diffúzoroknál ez néhány millió értékű, ennél fogva nem érzékenyek a Reynolds-szám változásra. Azonban részüzem módon, mikor a Re szám csökken, már romolhatnak a körülmények a diffúzorban.

4. ÁRAMLÁSOK AZ ÉGŐTÉRBEN

Ahogy azt az előző fejezetben is láthattuk, a megfelelő áramlási viszonyok létrehozása meghatározó fontosságú az égőtér és ezzel az egész hajtómű megfelelő működése szempontjából. Az égőtérben végbemenő folyamatok szimulációjához meg kell vizsgálnunk a benne lejátszódó áramlási folyamatokat, illetve azok okait. Ahhoz, hogy a hőközlés stabil maradjon, és a lehető legtökéletesebb égést érjük el, az égőtérben turbulens áramlás létrehozására van szükség. Azonban a turbulencia intenzitásának növelésével – a sűrűlódás miatt – a nyomásvesztés is nőni fog. Ahhoz, hogy ez a hatás minél kisebb mértékben jelenjen meg, de a hőközlés mégis hatékony maradjon, pontosan megtervezett áramlásrendszert hoznak létre, melyet primer, szekunder és tercier zónákra osztanak. (18.ábra)

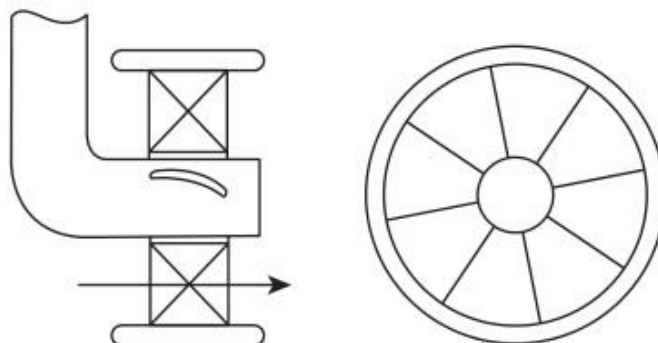


18. ábra: Az égőtér fő szekciói [20] [25]

4.1. Elsődleges égési zóna:

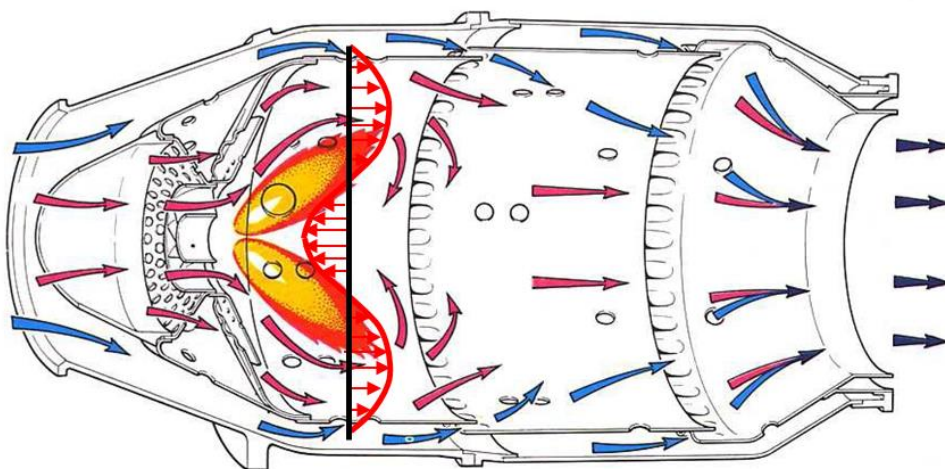
Az égőtér e zónájának fontosságát nem lehet eléggé hangsúlyozni, hiszen meghatározza az utána következő folyamatokat és ezzel a teljes égőtér hatékonyságát is. Itt találkozunk először a beporlasztott tüzelőanyag és a már a diffúzorban lelassult levegőáram 30-40%-a, melynek feladata az égés stabilizálása és az égéshez szükséges megfelelő légfelesleg tényező biztosítása. Emellett itt történik meg a gyújtása is. Már az előző fejezetekben ismertetett okokból kifolyólag nagy hangsúlyt fektetnek a láng stabilizálására. A diffúzor segítségével 150-200 m/s axiális sebességű levegőt 20-30 m/s-ra képes lassítani, ez azonban továbbra is magában hordozza a lángkialvás veszélyét, mely érdekében egy ellenáramú zónát hoznak létre az örvénykeltő segítségével, amely a forró égéstermékek egy részét használja fel, hogy a bejövő levegő és az

üzemanyag keveréknek folyamatos gyújtást biztosítson. (19.ábra)



19. ábra: Axiális lapátos örvénykeltő [25]

Ebben a kialakításban a tüzelőanyag-fúvókák köré helyezett axiális irányú lapátok adják meg a beáramló levegő számára a szükséges perdületet, mely örvényt hoz létre az égőtérben. Az örvény külső oldalán magas, míg a belsőn alacsony nyomás uralkodik, így az üzemanyag-levegő keverék igyekszik az égőtér közepe felé áramolni, ezzel irányt változtat és létrehozza a recirkulációs zónát. Az TV2-117A hajtóműben lévő axiális lapátos örvénykeltőn a levegő tengelyirányban halad keresztül. A benne található lapátok beállítási szögétől és számától függ a levegő megforgatásának mértéke és ezzel a recirkulációs zóna nagysága. A perdület növekedésével növekszik a visszaáramlás nagysága is, amely egy bizonyos mértékig előnyös, de a túlzott recirkuláció már túl sok égéstermékot áramoltat vissza, amely rontja az égés hatásfokát. (20.ábra)



20. ábra: Áramlások az égőtérben [22] [26]

Egy tipikus axiális lapátos örvénykeltő jellemző a következő határok között mozognak:

Lapátok beállítási szöge, δ	30°-60°
Lapátvastagság, t_l	0,7-1,5 mm
Lapátszám, z	8-16
Nyomásveszteségi tényező, σ_δ	96-97 %
Légerő tényező, c_δ	1,15-1,5

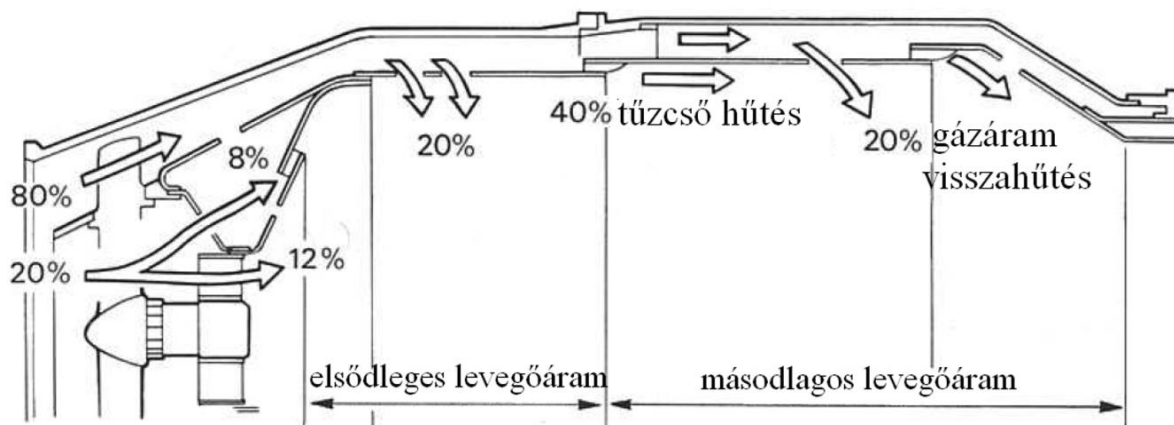
4.2. Másodlagos égési zóna:

Mivel a primer zóna hőmérséklete 2000 K° feletti, a disszociációs reakciók szén-monoxid (CO) és hidrogén (H₂) jelentős koncentrációját eredményezik a kiáramló gázokban. Ha ezek a gázok közvetlenül átjutnak a tercier (visszahűtési) zónába, a nagy mennyiségű hűtőlevegő közlése bevezetése miatt hirtelen hűlnének le, és a kiáramló gáz összetétele nem változna. Így a nem tökéletes égésből származó CO mennyiség egésze, amely károsanyag, változatlanul távozna az égőtérből. Emiatt a primer zóna után először csak kisebb mennyiségű hűtőlevegőt vezetnek be, ezzel relatív kis mértékben csökkentve a gáz hőmérsékletét. Ez a megoldás elősegíti a korom kiégését és lehetővé teszi a CO és az el nem égett szénhidrogének elégetését. Különösen nagy figyelmet igényel a hűtőlevegő mennyiségének pontos megválasztása, hiszen a túl nagy levegőáram a már említett módon túlhűtést okozhat, mely drasztikusan csökkenti a reakciósorozat sebességét és hatékonyságát. Ezen kritériumnak megfelelően, ebbe a zónába a levegőáram megközelítőleg 30%-át vezetik be. Mivel az örvénykeltő lapátok itt is kifejtik hatásukat, a bevezetett levegő jobban szétoszlik és elkeveredik az égő gázokkal, ezért az égési hatások javul, ellenben a turbulencia miatt a nyomásveszteség itt is növekszik. [1] [7] [8]

4.3. Tercier zóna:

Végül a visszahűtési, vagy másnéven a tercier zónában a fennmaradó levegő keveredik az égéstermékkel, hogy az lehűljön olyan hőmérsékletre, amelyet a turbinalapátok már képesek elviselni, ezzel növelve azok élettartamát. A hűtésre rendelkezésre álló levegő mennyisége általában a teljes gázáram 20-40% -a. Ezt forró gázáramba a bélésfalán lévő furatokon keresztül vezetnek be, melyek mérete és alakja úgy van megválasztva, hogy optimalizálják a légsugarak beáramlását, és keverését a főárammal. Elviekben bármilyen keveredési minőség létrehozható hosszú tercier zóna használatával, vagy a nagy nyomásveszteségi tényező tolerálásával. Azonban a gyakorlatban megállapítható, hogy a keveredés kezdetben nagymértékben javul az

égőtér elején, majd ezt követően fokozatosan romlik. Azért, hogy a keveredés optimális legyen, a visszahűtési zónák hossz-átmérő arányát általában 1,5 és 1,8 közötti szűk tartományban határozzák meg.



21. ábra: A tűzcsőbe bejutó levegőmennyiség eloszlása [23] [26]

5. ÉGŐTÉRBE LEZAJLÓ FOLYAMATOK

Az égés rengeteg folyamatot és jelenséget magában foglal. Még egy rövid összefoglaló arról a nagy mennyiségű anyagról, amelyet a tüzelési tudományban és a technológiában közzétettek, messze meghaladná e munka terjedelmét és szándékát. Ehelyett a figyelem középpontjába az égés olyan kulcsfontosságú szempontjait helyeztem, amelyek a gázturbinás hajtóművek szempontjából a legfontosabbnak tekinthetők. Az égést legegyszerűbben a tüzelőanyag és oxidálószer exoterm reakciójaként írják le. A már korábban taglalt égőtéralkalmazásoknál az tüzelőanyag lehet gáz vagy folyadék, de az oxidálószer mindig levegő. Az égés számos formában fordulhat elő, amelyek nem mindegyike jár lánggal vagy fényjelenséggel. Az égésnek két fontos típusát érdemes elsőként megkülönböztetni:

- *Hirtelen égés:*

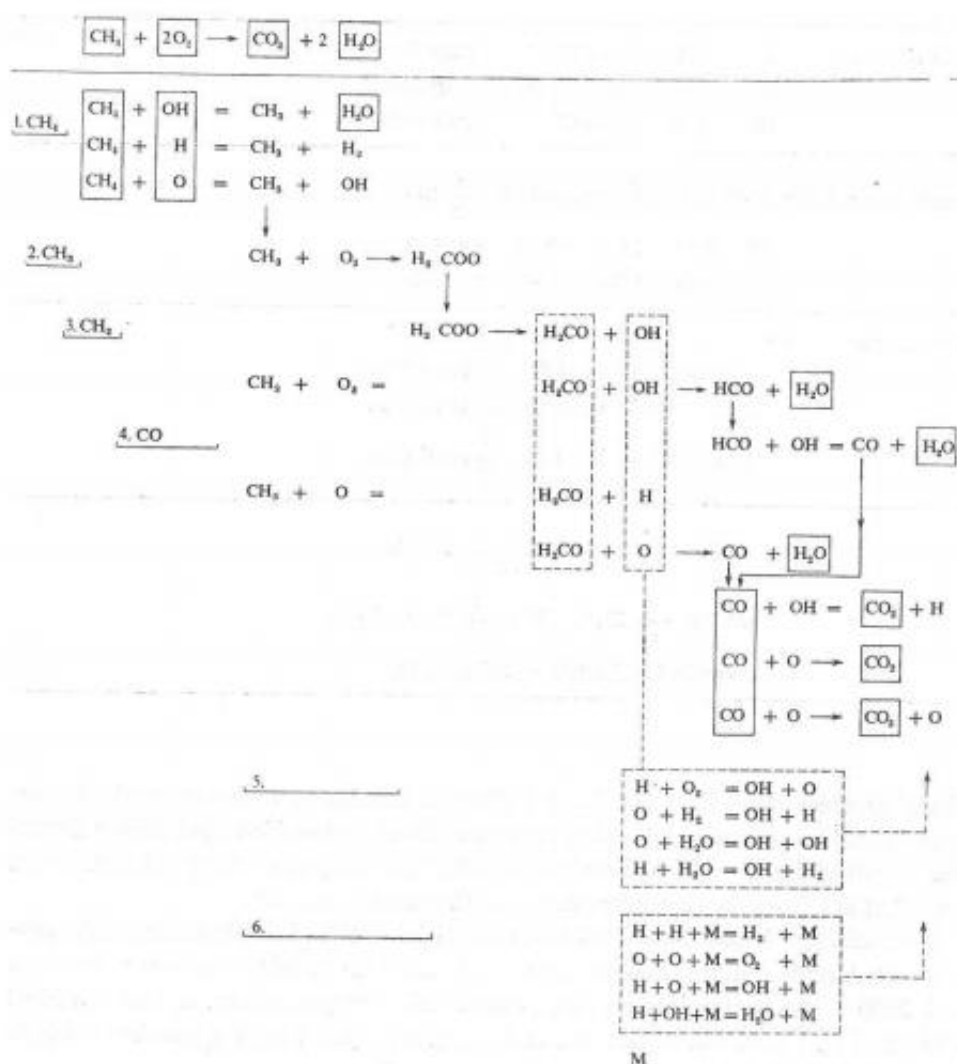
Ez egy rendkívül gyors folyamat, melynek 80%-a 1 ms alatt zajlik le. Ezt a folyamatot láng jelenléte jellemzi, amely az el nem égett keveréken keresztül terjed. A lángot úgy határozhatjuk meg, mint egy nagyon vékony rétegben bekövetkező gyors kémiai átalakulást, amely meredek hőmérsékletemelkedést és az éghető anyag fajkoncentrációjának csökkenését vonja maga után, valamint fényjelenséggel jár. Makroszkópiusan nézve a lángfront úgy tekinthető, mint egy határfelület az elégett gázok és a még el nem égett keverék között. Az el nem égett keverékhez képest az égéstermékek nagyobb hőmérséklettel és térfogattal, de kisebb sűrűséggel rendelkeznek. A tüzelőanyag-levegő keverékekben a láng terjedési sebessége lamináris áramlásban általában 1 m/s, turbulens áramlásban 5-8 m/s körül mozog. A gázturbinás égőterekben előforduló összes folyamat ebbe a kategóriába tartozik. [20]

- *Detonáció:*

Jellemző velejárója egy lökéshullám, mely a kémiai reakció folytán jön létre és ez a reakció táplálja. A detonációs hullámok 1-4 km/s közötti sebességgel terjednek. Ilyen reakció nem fordulhat elő a gázturbinás égőterekben alkalmazott hagyományos üzemanyag-levegő keverékekben, de a lehetősége fennáll, olyan esetekben, amikor többlet oxigénbefecskendezést alkalmaznak a begyújtás vagy a gyorsítás elősegítése érdekében, például légi indítás nagy magasságban. [20]

5.1. Az égés fizikai és kémiai folyamatai

Az égés témaköre magában foglalja a fizikai és kémiai folyamatok összességét. A kémiai reakció általi energia felszabadulás alapvető fontosságú az egész égési folyamatban, de a magas hőmérsékletű égés esetében ez nagyon gyors lefolyású a többi folyamathoz viszonyítva. A szénhidrogén alapú tüzelőanyagok égőterekben való égésének folyamata nem egyszerűen a sztöchiometriai egyenletek alapján zajlik, hanem számos részreakció összességéként alakul ki. Hőközlés során a nehezebb, összetett szénhidrogének kisebb, könnyebb részekre, úgynevezett gyökökre bomlanak. Így az égés során több száz reakció zajlik le a végállapot eléréséig.



22. ábra: Metán égésének részfolyamatai [9]

Először vizsgáljuk meg a szénhidrogén égési reakció mechanizmusainak alapvető jellemzőit a metán égésén keresztül. A szénhidrogén levegővel való keveredése normál környezeti hőmérsékleten nem reakcióképes, hacsak nincs gyújtóforrás. Amikor a keveréket felmelegítik, az szénhidrogén végül oxigénnel reagál. Az égési reakciót általánosságban a szénhidrogén molekulából származó hidrogénatom egy oxigénmolekulával való összekapcsolódásként

értelmezhetjük. Bonyolítja a helyzetet az a tény, hogy a napjainkban használt tüzelőanyagok több, különböző típusú szénhidrogén komplex keverékei, emellett kötött nitrogént is tartalmaznak, elsősorban aminok vagy N-heterociklusos vegyületek alakjában. Az aminokból főleg NH_2 , az N-heterociklusos vegyületekből pedig főleg HCN köztitermékek keletkeznek a lángokban, amelyek reakciók sorozatán keresztül végül nagyrészt NO-vá alakulnak. A nitrogénvegyületek magas hőmérsékleten lezajló reakcióinak sokszínűségét jelzi, hogy a keletkező NO egy része N_2 molekulává alakulhat. A teljes reakciósorozatot lemodellezni azonban nem szükséges, hiszen Hess tétele kimondja, hogy a kémiai folyamatok reakcióhőjét a kezdeti és végállapot egyértelműen meghatározza. A reakcióhő független az esetleges részfolyamatok számától, minőségétől és sorrendjétől. Így majdnem irreleváns az összetétele az eredeti szénhidrogénnek. [24]

Az égési reakciók modellezésében felmerülő nehézségek leküzdésének egyik módja az, hogy a folyamatot kisszámú mesterséges reakcióval reprezentálják, amelyek mindegyike számos alapvető reakciófolyamat eredményeit írja le. Ezek az úgynevezett „globális mechanizmusok”, melyek sztöchiometrikus kapcsolatokat jelölnek. A részletes kinetikus mechanizmusokból megfelelő egyszerűsítő feltételekkel globális reakcióegyenletek származtathatók. A globális mechanizmusok nagymértékben csökkentik a kinetikai számítások összetettségét, mivel néhány lépést alkalmaznak sokelemes reakciósorozatok leírására. Ráadásul az egyszerűsített reakciók általában magukban foglalják a főbb stabil szénhidrogén típusokat. Ez a redukálás bizonyos mértékben hasznos lehet, de egyes esetekben jelenthet túlzott egyszerűsítést is. Hiszen a kisebb, kevesebb atomos molekulákból álló szénhidrogének jelentősen befolyásolják a szennyező anyagok képződését, ezért az egyszerűsített globális mechanizmusok nem tartalmazhatnak elegendő kémiai részletet a károsanyag képződés lépéseinek leírására. Ebből kiindulva számos kiváló reakciókinetikai modell készült, melyek mind pontosabb közelítést adtak a különböző anyagok égésekor lejátszódó kémiai folyamatokról. A gyakorlatban azonban a fizikai folyamatok, mint a hőátadás, termodinamika és gázdinamika, sokkal inkább meghatározzák az égés minőségét, mint a kémiai folyamatok. Hiszen normál működési tartományban nem az égés határai a lényegesek, hanem inkább a hőfelszabadulás sebessége, az égéstermékek, a magas-hőmérsékletű láng hősugárzás tulajdonságai, valamint a levegő és az égéstermékek áramlási viszonyai, turbulenciájának mértéke határozza meg a láng méretét, sebességét, és stabilitását. [24]

A fentebb leírt bizonytalansági tényezők ellenére feltételezhetjük, hogy az égést teljesen egyetlen globális reakcióval le lehet írni, ahol az üzemanyag és a levegő azonnal reagál és égéstermékek jönnek létre. Feltételezzük továbbá, hogy az égési zónába belépő tüzelőanyag és

levegő azonnal összekeveredik az összes többi anyaggal a zónán belül és az égéstermék hőmérséklete és összetétele nem változik, miközben elhagyja az égési zónát. Egy hagyományos égőtérben alapvető követelmény az alacsony nyomásveszteség értéke, amely alapvetően gátat szab a megfelelő sebességű és minőségű keveredésnek, ezáltal a homogén keverékképzésnek. Ezt a folyamatot modellezi a Longwell-Weiss féle „keveréses égőtér”, melyben közvetlen keveredés jön létre a friss keverék és az égéstermék között annak érdekében, hogy nagy mennyiségű energiaközlés valósuljon meg a beáramló éghető keverékkel. Azonban ez jelentős nyomásveszteséggel jár.

Longwell a tüzelőanyag-levegő keverék reakció intenzitásának kifejezésére az anyagok egyensúlyi egyenletét használta fel:

$$\eta_c \varphi \dot{m}_1 = C_{cf} V T^{0,5} e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \rho^n c_t^m c_o^{n-m} \quad (1)$$

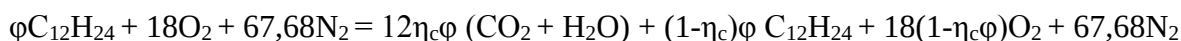
A vizsgálathoz szükséges bizonyos egyszerűsítő feltételezéseket megállapítanunk:

1. Az elégetett anyag CO_2 , CO , H_2 és H_2O keverékét alkotja, melyek „T” hőmérsékleten egyensúlyi állapotban vannak.
2. Az eredeti tüzelőanyag $(1-\eta_c \varphi)$, illetve az eredeti oxigén $(1-\eta_c)$ hányada a maradvány, és csak ezek tekinthetők reaktánsnak. A szegény keverékekben az elégett tüzelőanyagból csak CO_2 és H_2O keletkezhet.

Ahhoz, hogy az alternatív tüzelőanyagokat vizsgálhassuk, ki kell jelölnünk egy összehasonlítási alapot, melyből kiindulva értékelhetjük egyéb anyagok paramétereit is. Esetünkben a leglogikusabb választás a kerozin. Longwell és Weiss oktán-levegő keverék égéséből vezették le reakció egyenleteiket és származtatták kerozinra, amit jelen esetben dodekánként ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}$) jelenítik meg, hiszen kémiai fizikai tulajdonságai leginkább e szénhidrogén tulajdonságaival mutatnak hasonlóságot.

5.1.1. Teljes reakció intenzitás elmélete szegény keverék esetén

Ha a légfelesleg tényező $\varphi < 1$, tehát a rendszer kevesebb O_2 -t tartalmaz, mint amennyi a sztöchiometrikus égéshez szükséges, az egyensúlyi egyenlet így módosul:



Ebből adódik

$$c_t = \frac{(1-\eta_c)\varphi}{85,68+\varphi+5\eta_c\varphi} \quad (2)$$

és

$$c_o = \frac{18(1-\eta_c\varphi)}{85,68+\varphi+5\eta_c\varphi} \quad (3)$$

Ahol:

φ légfelesleg tényező [-]

η_c elégett tüzelőanyag hányad [-], égőtér hatásfok [-]

c_t tüzelőanyag koncentráció [%]

c_o oxigén koncentráció [%]

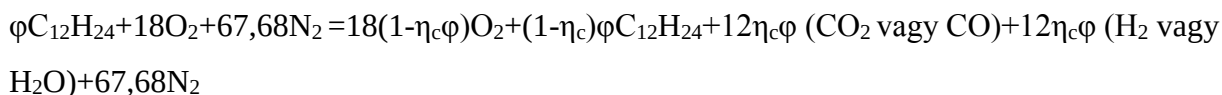
Az eredeti tanulmányban Longwell az m és n együtthatóknak 1 illetve 2 értéket adott, melyek másodrendű reakciónak felelnek meg.

Általánosságban azt mondhatjuk, hogy a kísérleti adatok jobban megfeleltethetők ha n értéke valamivel kisebb, mint 2. Longwell és Weiss a következőkben az n értékét 1,8-ra változtatta, ezzel bizonyítottá vált a nyomásfüggőség. Ezután az n és m értékét 0,75 és 1,75-re módosították, így az összefüggés már összhangban van az égés sebesség paraméterrel. Így az egyenlet:

$$\frac{\dot{m}_l}{Vp^{1,75}} \propto \frac{1}{T^{1,25}e^{\frac{E}{RT}}} \frac{1}{\varphi^{0,25}} \frac{(1-\eta_c)^{0,75}(1-\eta_c\varphi)}{\eta_c} \quad (4)$$

5.1.2. Teljes reakció intenzitás elmélete dús keverék esetén

Ha a légfelesleg tényező $\varphi > 1$, tehát a rendszer több O_2 -t tartalmaz, mint amennyi a sztöchiometrikus égéshez szükséges.

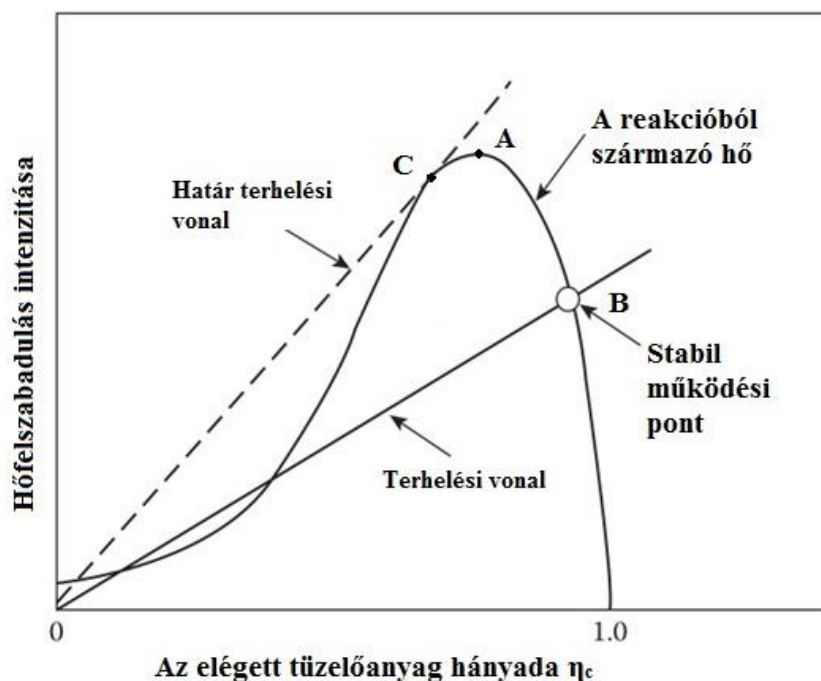


Követve a szegény keveréknél alkalmazott levezetés mintáját, ha $n=1,75$ és $m=0,75$, akkor:

$$\frac{\dot{m}_l}{Vp^{1,75}} \propto \frac{\varphi^{0,75}}{T^{1,25}e^{\frac{E}{RT}}} \frac{(1-\eta_c)^{1,75}}{\eta_c} \quad (5)$$

Ahol:

$\dot{m}_l$ levegő tömegárama [kg/s]
 V térfogat [m³]
 R egyetemes gázállandó [J/K]
 T hőmérséklet (K)



23. ábra: A reakcióintenzitás folyamata [20][25]

Alacsony η_c esetén a hőfelszabadulás értéke kicsi, mert a hőmérséklet is alacsony. Ahogy az égés folytatódik, a hőmérséklet emelkedik, ezáltal növelve a hőfelszabadulás sebességét is, amíg a maximális értéket el nem éri (24. ábra A pont), amely körülbelül 0,7-0,9 η_c értékek között helyezkedik el a légfelesleg tényező (φ) és a kezdeti hőmérséklet függvényében. Ezen a ponton túl a hőmérséklet folyamatos emelkedéséből fakadó további reakcióintenzitás növekedést elnyomja az el nem égett tüzelőanyag és oxigén csökkenő koncentrációjának hatása. Ezért a hőfelszabadulás intenzitása hirtelen zuhanni kezd, amíg, maximális hőmérsékleten, el nem éri a nullát, ami szintén 100 %-os égéshatékonyságnak felel meg. Tehát az összes tüzelőanyag elégett. A terhelési vonal azt a hőmennyiséget jelöli, amely ahhoz szükséges, hogy az el nem égett keveréket felmelegítse a reakció kezdeti hőmérsékletére. Az a pont, ahol a hőfelszabadulás görbéje metszi a terhelési vonalat, az égőtér működési pontjának nevezzük (B pont). Ekkor a felszabaduló hő és a szükséges hő egyensúlyban van. Ahogy a keverékes égőtérbe egyre több keveréket juttatunk, a tömegáram emelkedik, a keverék felmelegítéséhez szükséges hő növekszik, ezért a terhelési vonal meredeksége emelkedik,

egészen addig, amíg végül már nem metszi a hőfelszabadulás görbáját (C pont), és a felszabaduló hő nem lesz elégséges ahhoz, hogy fenntartsa az égést, és a láng kialszik. [20] [25]

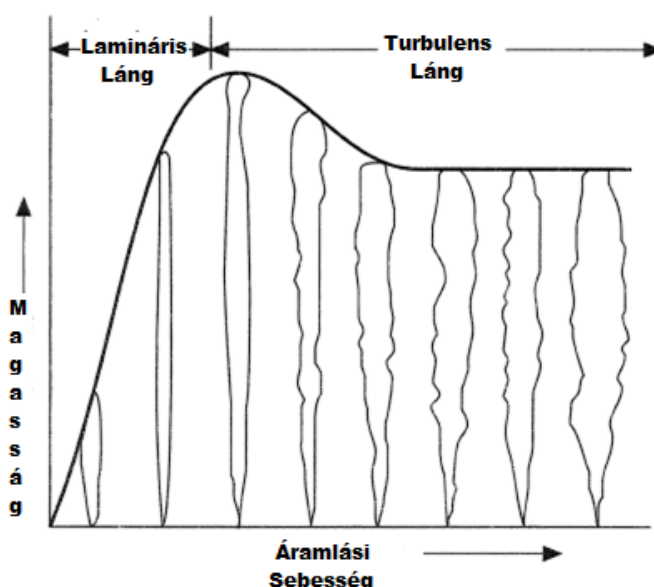
5.2. A lángok típusai:

Mivel a lángok keletkezése és a bennük lejátszódó folyamatok egy nagyon összetett jelenséget alkotnak, ezért sok tanulmány leegyszerűsíti ezt a gyakorlatban az égés vizsgálatához.

Az égőtérben keletkező lángok, az tüzelőanyag és az oxidálószer keverékének mértékétől, illetve az égési gázok áramlási viselkedésétől függően, vagy a reakcióelegy a reakciózónához való eljutásának módja szerint többféleképpen lehetnek. Megkülönböztetünk lamináris előkevert, lamináris diffúziós, turbulens előkevert és turbulens diffúziós láng típusokat. Esetünkben kiemelt figyelmet érdemelnek az előkevert lángok, ahol a tüzelőanyag és az oxidálószer már az égetés előtt molekulárisan keveredik, elősegítve ezzel az sztöchiometrikus égés megközelítését. [20]

5.2.1. Lamináris láng:

Az előkevert lamináris láng felépítésében nagy szerepet játszik az aerodinamika, a hőáramlás, a hőátmenet, tömegátmenet, és a kémiai reakciók. Az érintett kulcsfolyamatokat Gaydon és Wolfhard írta le.



24. ábra: Lamináris és turbulens lángok méretei az áramlási sebesség függvényében [38]

Az idealizált elképzelés szerint a lángot egy egydimenziós modellben vizsgáljuk, ahol a láng egy mozdulatlan, végtelen kis vastagságú határfelület, amely elválasztja a még el nem égett friss keveréket az égéstermékektől.

A lángfront terjedését úgy lehet elképzelni, mint a gágrétegek felrobbanását gyorsan, egymás után. A hideg gágréteg, felmelegedésével reakcióképessége nő, majd a diffúzóval érkező reakcióképes molekulák robbanást idéznek elő. Az ebből létrejövő hőmennyiség a közelben levő gágréteget is felmelegíti és ez a folyamat ismétlődik. Mivel a hőátadás és az anyagdifúzió időigényes folyamatok, emiatt az égőtérben nem egy pillanat alatt robban fel a tüzelőanyag-levegő keverék, hanem egy lángfront fog végigterjedni a tűzcsövön keresztül. Ennek a terjedésnek a sebességét a különböző vegyületek molekuláris diffúziója, a hőáramlás és a reakciók sebessége befolyásolja, ennek megfelelően az értéke 0,3-0,6 m/s tartományban mozog. Az égés sebessége a gyakorlatban nagyon fontos a lángstabilizálás és a hőfelszabadulás intenzitása tekintetében. Azonban, ahogyan azt az előző fejezetben említettem, még az igen komplex szénhidrogén alapú tüzelőanyagok is metán molekulákra, valamint egy vagy két szénatomos molekulákra és hidrogénre bomlik fel, mielőtt belépne az égési zónába. Így az esetek nagy részében az égést megelőző pillanatban a keverék összetétele lényegében független az eredeti tüzelőanyag fajtájától.

Egy adott tüzelőanyag-levegő keverék előkevert lángját alapvetően három fő paraméter határozza meg. Elsőként a nyomás, melynek hatását már számtalan tanulmány vizsgálta és a következő összefüggésre jutott:

$$S_L^0 \sim p^{\frac{n}{2}-1} \quad (6)$$

Ahol „n” értéke különböző tüzelőanyagok esetén változhat.

S_T turbulens láng sebessége [m/s]

Másodszor a kezdeti hőmérséklet, melynek hatását Dugger és Heimel vizsgálta metán, propán és etilén esetén. Arra a következtetésre jutottak, hogy a kezdő hőmérséklet növekedésével nő a láng terjedési sebessége.

Harmadszor a légfelesleg tényező értéke, mely megadja a tüzelőanyag mennyiségét a keverékben. Itt a légfelesleg tényező egy bizonyos mértékű növelésével szintén emelkedik az égési sebesség. A legtöbb szénhidrogén alapú tüzelőanyag esetében a maximális égési

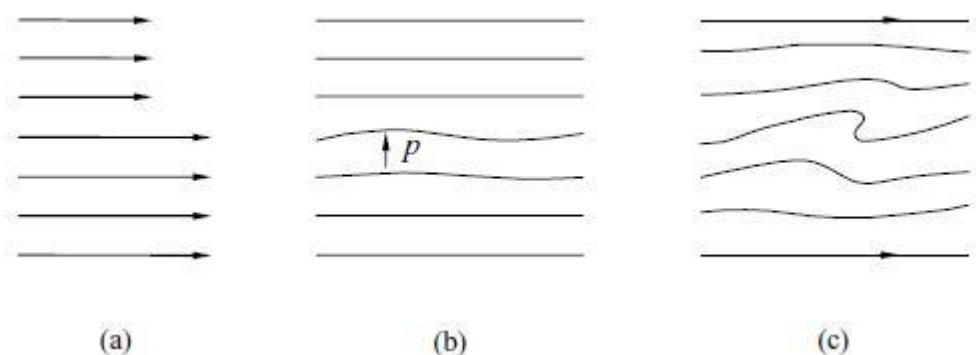
sebességet 1,05-1,1 légfelesleg tényező értékek között érjük el. Ezután viszont, a keverék további dúsításával ismét csökkenni kezd.

A nem előkevert lángok esetében, ha a keverés gyorsan bekövetkezik a kémiai reakciókhoz képest, az égési sebesség kizárólag a homogén folyamatok szempontjából vizsgálandók. [20]

5.2.2. Turbulens láng:

Turbulens áramlási viszonyok között az előkevert lángot lehetővé tevő beáramlási sebesség jóval nagyobb, mint a lamináris lángsebesség. Ennek oka az, hogy a turbulencia olyan örvényeket okoz, amelyek jelentősen eltorzítják a lamináris lángfrontot. Nagy Reynolds-szám esetén az átlagos turbulens lángsebesség a lamináris lángsebesség négy-ötszöröse, vagyis körülbelül 3 m/s metán-levegő keverékek esetében. Az előzőek alapján világos, hogy a hő visszaáramoltatása (forró égéstermékek égéstérbe történő visszavezetésével) nélkül lehetetlen nagy égési sebesség mellett stabilizálni az előkevert lángokat.

Egy lamináris áramlás instabillá tehető, ha egy elenyészően kis intenzitással megzavarjuk. Például egy surlódásmentes folyadéknak két párhuzamos, de különböző sebességű áramlását (44.a ábra), zavarjuk meg azáltal, hogy az egyik áramvonalat torzítjuk az egyik irányban (44.b ábra). A megzavarás kidomborodásánál az áramcső felülete megnő, így a folytonossági egyenletből adódóan az áramlás sebessége lecsökken, a nyomás pedig megnő. Ekkor a szomszédos áramcső összezsugorodik, a felülete csökken, az áramlás sebessége megnő, a nyomás szintén csökken. A nyomás egyensúlyának felbomlása miatt az áramvonalak eltorzulnak (44.c ábra), ez pedig az eredeti zavarás intenzitásának növekedéséhez vezet, így az áramlás instabillá válik.



24. ábra Az áramlás megzavarása surlódásmentes közegben [22]

Az instabilitás növekedését fenntartandó, az alsó áramcsőből kiürülő tömeget pótolni kell a felső áramcsőből. Emellett az áramlási kör zárása érdekében a felső áramcső egy részében az áramlásnak ellentétes irányúnak kell lennie az alsó áramcsőben lévő áramláshoz képest. Az így kialakult jelenséget örvénynek nevezzük, és a turbulens áramlást a különböző erősségű és kiterjedésű örvények jelenléte jellemzi. [22]

A zavar növekedését a folyadék véges viszkozitása korlátozhatja, amely hajlamos a zavarás megszüntetésére és ezáltal stabilizáló hatást fejt ki az áramlásra. Ha a viszkozitásból származó tapadóerő elég nagy tehetetlenségi erőhöz képest, akkor a csillapítás elég erős ahhoz, hogy az áramlást stabillá, és ezáltal laminárisra rendeződjön.

Továbbá, e hatás miatt a destabilizált áramlásnak nem feltétlenül fog turbulens áramlássá fejlődni, hiszen vissza tud alakulni laminárisra. Az áramlás csak akkor válik turbulenssé, ha a kezdeti destabilizáció után kaotikus, rendezetlen viselkedést mutat.

Felismerve a tehetetlenség és a viszkozitás jelentős hatásait az áramlás stabilitására nézve, egy dimenzió nélküli paramétert vezettek be, amely azt mutatja meg, hogy egy áramlás mennyire hajlamos instabillá és következésképpen turbulenssé válni. Ez a Reynold szám

$$Re = \frac{\rho v L}{\nu} \quad (7)$$

ahol:

ρ -áramló közeg sűrűsége

v -áramló közeg jellemző sebessége

L -az áramlás kiterjedésére vonatkozó méret

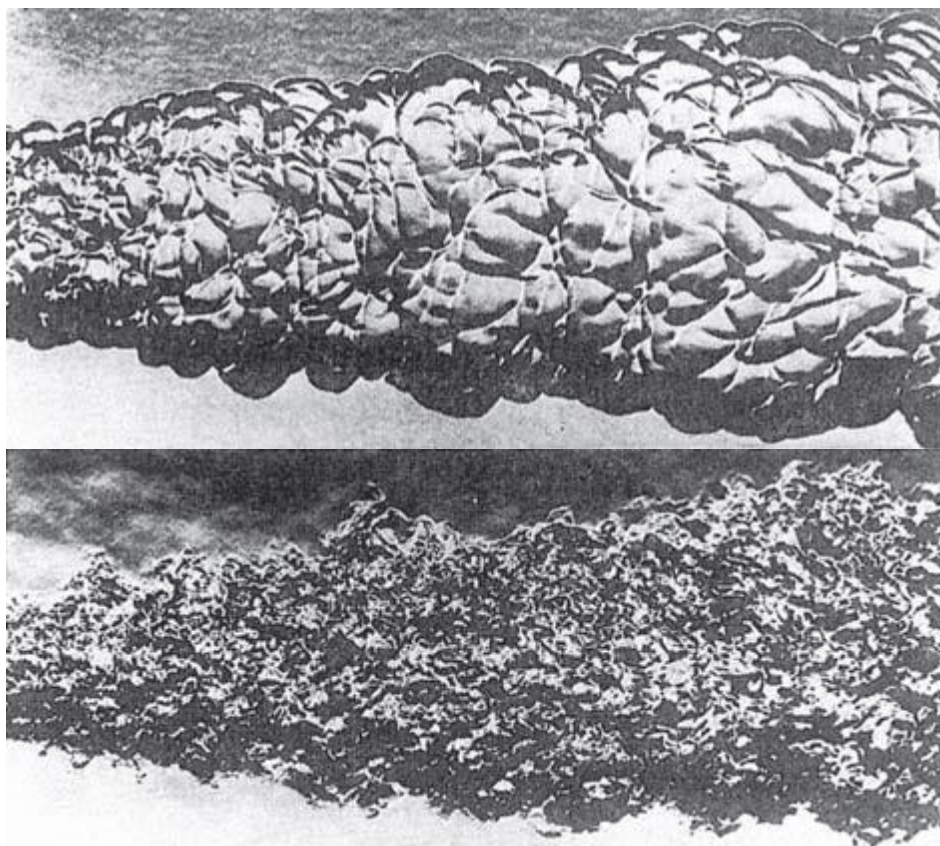
ν -áramló közeg viszkozitása

Az alacsony Reynolds számú áramlás lamináris, míg a magas Reynolds számmal rendelkező áramlás turbulens. Ennek egyik oka, a nagy mozgási energia, amely szükséges ahhoz, hogy fenntartsa a folyamatos generálódását a turbulens örvényeknek, amelyek végül elhalnak a közeg viszkozitása miatt. Következésképpen a turbulens áramlás általános struktúrája az, hogy tartalmaz nagy örvényeket, amelyek a fő áramlásból elvont energiából keletkeznek. Ezek a nagyobb örvények aztán folyamatosan bomlanak kisebbekre, amíg el nem érik azt a kis méretet, ahol már érvényesül a viszkozus közeg elnyelő hatása. Mivel az örvények felgyorsítják a hő-

és anyagátadást, így a láng nagyobb mennyiségű el nem égett keveréket képes a reakcióba bevonni. [27]

Vizsgálatok kimutatták, hogy kismértékű turbulencia esetén a turbulencia mértéke a lángvastagság nagyságrendjébe esik, és ekkor a turbulencia nem érdesíti a lángot, hanem megtartja a lamináris tulajdonságait. Azonban az égési sebesség növekszik a turbulencia hatására, hiszen a lángfelület is kiterjedtebb lesz. A lángban uralkodó magas hőmérséklet miatt a viszkozitás nagy, és a lángvastagságnál kisebb méretű örvények disszipáció útján elhalnak. A nagyobb örvények hatására a lángfelület hullámosodni, ráncosodni kezd, és a láng megvastagodik.

A láng szerkezetét az alacsony és nagy turbulencia-intenzitás két szélsőségében a 2.5 Ábra szemlélteti. Ennek az ábrának a felső képe azt mutatja, hogy ha a turbulencia alacsony, akkor a lángfelületen olyan kerek kidomborodások jelennek meg, amelyek mérete a láng expandációjával fokozatosan növekszik. Az alsó kép a láng szabdaltságát, és töredezettségét mutatja be, melyet a nagy turbulencia-intenzitás okoz. [25]



25. ábra: Sztöchiometrikus előkevert turbulens lángok (felül) $u' = 3,1$ m/s, (alul) $u' = 30,5$ m/s [25]

A kémiai reakció jelenlétével a turbulens áramlás vizsgálata még komplexebbé válik. Áramlástan szempontból, a turbulencia növeli az égés intenzitását azáltal, hogy fokozza a reagensek keveredését és a hőátadást, valamint a „ráncosító” tulajdonságának köszönhetően növeli a reakciók lejátszódásához rendelkezésre álló teljes láng felületét. Előfordulhat, hogy a rendkívül erős turbulens örvények okozhatnak kis, lokális lángkialvásokat, ezáltal hátrányosan befolyásolva az égési hatásfokot. Összességében láthatjuk, hogy a turbulens áramlás alkalmazásával nem csak a tüzelőanyag porlasztás és levegővel való keveredés minősége javul, hanem reakciók intenzitása és a láng-sebessége is nő. Mindent összevetve jobban megközelíthető a tökéletes égés. Ezekből az égést elősegítő hatásokból láthatjuk, hogy logikus megoldás a gázturbinás hajtóművek égőtereibe olyan elemeket beépíteni, melyek elősegítik és fokozzák az előkevert turbulens láng kialakulását. [20]

6. AZ ALTERNATÍV TÜZELŐANYAGOK TÍPUSAI ÉS ÉGÉSÜK BEMUTATÁSA

A fosszilis energiahordozókra épülő világunkban egyre égetőbb problémája és kérdése, hogy mi fog történni, ha a Föld kőolajtartalékai kifogynak. Ez az idő, bizonyos előrejelzések szerint már 2050-re el fog érkezni. Emellett a föld légkörének hőmérséklet emelkedését és a szélsőséges időjárási viszonyok kialakulását, azok gyakoribbá válását is az emberi tevékenységgel, pontosabban a káros anyagok egyre növekvő mértékben történő kibocsátásával hozzák összhangba. A széndioxid kibocsátás és a hőmérsékletváltozás ezidáig ciklikusan változott, azonban az elmúlt évtizedekben eddig még nem tapasztalt mennyiségű széndioxid jutott a légkörbe. Közel felével haladja meg a koncentráció a korábbi százezer évek csúcseit. Ennek a szennyezésnek egy igen nagy hányada a folyamatosan növekvő számú közlekedési eszközök hajtóművei által kibocsátott káros anyagból származik. Ezen belül is a légiközlekedés jelenti a legmagasabb energiafogyasztást az összes közlekedési mód közül. Beláthatjuk, hogy az új energiaforrások kutatása és az alternatív megoldások fejlesztése már nem opció, hanem a fennmaradáshoz szükséges alapvető szükséglet. A repülésben is fontos, hogy tudjuk alkalmazni az alternatív üzemanyagokat. A megfelelő alternatív üzemanyag megtalálása nem egyszerű feladat. A cél, hogy hosszútávon és gazdaságosan kitermelhető legyen, és még előállításával sem terheli a környezetet, emellett a jelenleg alkalmazott erőgépeink, hajtóműveink működtetésére is alkalmasnak kellene lennie lényeges átalakítás nélkül. Akárcsak a hagyományos tüzelőanyagnak, ennek is meg kell felelnie bizonyos követelményeknek, hogy a repülőgépek hajtóanyaga lehessen. E cél elérése érdekében számos kutatás és kísérlet folyik napjainkban is. Munkámnak nem célja e kutatások maradéktalan feldolgozása, csupán néhány potenciális alternatív hajtóanyaggal foglalkozok, melyek a TV2-117A típusú hajtómű ellátására is alkalmas alternatívát nyújthatnak. [28]

Elsőként érdemes lefektetni az az új hajtóanyaggal szemben támasztott alapvető követelményeket, melyeknek meg kellene felelnie ahhoz, hogy a jelenleg használatos tüzelőanyagokat kiválthassa:

- magas fűtőértékű;
- környezetkímélő;
- kémiaiilag stabil halmazállapotú, a fedélzeti tüzelőanyagrendszer elemeivel, berendezéseivel nem reagál;
- hosszú időre, megbízható, könnyen és olcsón kitermelhető, vagy feldolgozható tartalékok álljanak rendelkezésre;

- nagy energiaigényű vagy környezetetkárosító technológia még a kitermelése, feldolgozása és átalakítása során sem jelenhet meg;
- alkalmas a szükséges berendezések, hajtóművek, légkondicionáló rendszerek és a meghatározott hordfelületek a megfelelő mértékű hűtésére;
- a jelenleg rendszerben lévő repülőgépek és azok kiszolgálásához szükséges infrastruktúra, lehetőleg változtatás nélkül, vagy minimális átalakítással, korszerűsítéssel legyen alkalmas a vele történő működésre. [28]

A bio- és szintetikus üzemanyagok kutatása évek óta egymással párhuzamosan, összefonódva történik. A szintetikus üzemanyagok halmazállapota legtöbbször égetésre alkalmas folyékony, (néha gáznemű), melyeket szénből, kőszénből, földgázból, vagy akár biomasszából, különböző eljárásokkal állítanak elő. Az első szintetikus üzemanyagot Németország készítette szénből még a második világháború előtt, de a fejlesztésnek kényszerlökést az 1944-es év adott, mikorra is a visszavonuló német csapatok sorozatban veszítették el a korábbi meghódított kőolaj és földgáz lelőhelyeik nagy részét [13]. Környezetvédelmi szempontból azért kedvező használatuk, mert égésük sokkal tisztább, mint a hagyományos üzemanyagoké, így kevesebb károsanyag kerül a levegőbe alkalmazásuk során. A folyamatos kutatás eredményeként napjainkra már több, különböző eljárással előállított alternatív hajtóanyagot is létrehoztak melyek közül a fontosabbakat a 2. táblázatban láthatjuk összefoglalva.

6.1. Repülőgép tüzelőanyagok főbb tulajdonságai:

6.1.1. Energiatartalom:

A repülőgépek hajtóművei, ahogy azt már tárgyaltuk, az üzemanyagban tárolt kémiai energiát mechanikai energia és hő kombinációjává alakítja át. Mivel a szabad tér a legtöbb repülőgépen igen limitált, az adott mennyiségű üzemanyag által tárolt energia mennyiségének maximalizálására törekszenek.

A hajtóanyag energiatartalma az általa kibocsátott hő (égéshő) mennyiségével mérhető, ha ismert mennyiségű üzemanyagot égetnek el specifikus körülmények között. A felszabaduló hő mennyisége attól függ, hogy az égés során keletkező víz a gőzfázisban marad-e, vagy folyadékhhoz kondenzálódik.

Az energiatartalom gravimetrikusan (energia/tömegegység) vagy volumetrikusan (energia/térfogategység) fejezhető ki.

Mivel az egyes szénhidrogének energiatartalma különbözhet, a hajtóanyag összetételnek is hatása van az energiatartalomra. A hatást rendszerint az üzemanyag-sűrűség előre jelzi, amely szintén az összetétel függvénye. Általában a kisebb sűrűségű hajtóanyagok nagyobb gravimetriás energiatartalommal rendelkeznek, és a nagyobb sűrűségűek nagyobb volumetrikus energiatartalmúak.

6.1.2. Stabilitás

Egy stabil tüzelőanyagnak nevezzük azt, amelynek tulajdonságai bizonyos hatások ellenére is változatlanok maradnak. A tüzelőanyag-tulajdonságok káros megváltozásához vezető hatások közé tartozik az idő (tárolási stabilitás) és a hőváltozásnak való kitettség (hőstabilitás).

A tüzelőanyag-instabilitás többlépcsős kémiai reakciósorozatot foglal magába, amelyben oxidációs reakciók is előfordulhatnak. A hidrogénperoxidok és peroxidok oldódhatnak fel az üzemanyagban és lerövidíthetik egyes alkatrészek élettartamát. Egyes esetekben olyan oldhatatlan részecskék képződését eredményezik, melyek eltömíthetik az üzemanyag szűrőket és lerakódhatnak az üzemanyag-rendszerek belső felületén, korlátozva a folyadék áramlását a csövekben.

- Tárolási stabilitás:

A tüzelőanyagot meg kell vizsgálni annak érdekében, hogy használat előtt megfeleljen követelményeknek.

Mivel a hosszabb-, vagy a nem megfelelő tárolásnak vagy kezelésnek kitett üzemanyagban a reaktívabb összetevők okozhatnak problémát. A tárolási stabilitást nagymértékben befolyásolja az üzemanyag összetétel is. Emellett az instabilitási reakciók gyorsabban és nagyobb mértékben fordulnak elő magasabb környezeti hőmérsékleten. A tárolási stabilitás javítása érdekében az üzemanyaghoz adnak oxidatív anyagokat, melyek gátolják a folyamatok lejátékozódását.

- Termikus stabilitás:

A termikus stabilitás az egyik legfontosabb üzemanyag-tulajdonság, hiszen a repülőgép üzemelése közben hatalmas hőmérsékletváltozások zajlanak az egész szerkezetben. Az üzemanyag felmelegedése felgyorsítja a gumi részek roncsolásához és a szemcsék kialakulásához vezető reakciókat.

6.1.3. Viskozitás:

A viszkozitás a folyadék nyomással szembeni ellenállásának mértéke. A "vékony" folyadéknak nevezzük a vizet vagy a benzint, melyek alacsony viszkozitásúak. A "vastag" folyadékok, mint a juharszirup vagy a motorolaj magasabb viszkozitásúnak számít. A folyadék viszkozitása, hőmérséklet csökkenésével, növekszik. A nagynyomású tüzelőanyag égőtérbe való befecskendezésekor a viszkozitás tulajdonsága meghatározó a megfelelő szórás kép és a cseppméret kialakulása szempontjából. Emellett az üzemanyag viszkozitása befolyásolja az üzemanyagrendszer-szabályozó egység teljesítményét is.

Az üzemanyag-rendszer teljesítményének elsődleges kritériuma a szivattyúzhatóság, tehát a tüzelőanyagnak a tartályból a hajtóműbe történő mozgatása. A szivattyúzhatóság mind a viszkozitás, mind az üzemanyagrendszer kialakítása által befolyásolható.

Szorosan összefügg a viszkozitással a fagyáspont. Mivel a hajtóanyag több, különböző szénhidrogén keveréke, mindegyiknek saját fagyáspontja van, a sugárhajtómű nem szilárdul meg egy hőmérsékleten, ahogyan a homogén folyadékok. Ahogy az üzemanyag hőmérséklete csökken, a legmagasabb fagyásponttal rendelkező szénhidrogén komponensek szilárdulnak meg először, kristályokat képezve. A további hűtés során az alacsonyabb fagyásponttal rendelkező szénhidrogének is kezdenek megszilárdulni. Így a tüzelőanyag egy homogén folyadékból, végül egy szilárdhoz közeli állapotú szénhidrogén blokkot fog képezni. A tüzelőanyag fagyáspontja az hőmérséklet, amelyen az első kristály megjelenik. Így az jóval meghaladja azt a hőmérsékletet, amelyen teljesen megszilárdulna.

A viszkozitással kapcsolatosan szintén fontos tulajdonság az illékonyság, mely a tüzelőanyag párolgásra való hajlamosságát jelenti. Azért fontos, mert az üzemanyagnak el kell párolognia, mielőtt megkezdődhetne az égés. Azonban a túl nagy illékonyság párolgási veszteségeket vagy a tüzelőanyagrendszer gőzzáródását eredményezheti.

6.1.4. Tisztaság

A tüzelőanyag tisztasága azt jelenti, hogy nem tartalmaz se szilárd részecskéket, se vizet. Hiszen a szemcsék, a rozsda, vagy egyéb szennyeződések eltömíthetik a szűrőket és növelhetik az üzemanyag-szivattyú kopását, valamint a bekerülő nátrium-, kálium- és egyéb alkálifémek korróziót okozhat a hajtómű turbina részében. Az üzemanyagban lévő víz elősegítheti a fémek korrózióját és a mikroorganizmusok növekedését. Fontos megemlíteni, hogy tüzelőanyagok tárolás és használat során sokféle anyaggal érintkeznek. Elengedhetetlen tehát, hogy az

üzemanyag ne reagáljon ezen anyagok egyikével sem, különös tekintettel a repülőgép üzemanyagrendszerének alkatrészeire.

Még az újonnan előállított tüzelőanyag is gyorsan elszennyeződhet olyan mikroorganizmusoktól, amelyek mindig jelen vannak a levegőben és a vízben. A tüzelőanyagokban megtalálható mikroorganizmusok közé tartoznak a baktériumok és gombák (élesztők és penészgombák), amelyek által létrehozott szilárd anyagok nagyon hatékonyan képesek eltömíteni az üzemanyagszűrőket, valamint egyes organizmusok savas melléktermékeket is termelnek, amelyek felgyorsíthatják a fémek korrózióját. A mikrobiális szennyeződés legjobb megközelítése a megelőzés. A legfontosabb megelőző lépés a tüzelőanyagtartályokban lévő szabad vízmennyiség lehető legalacsonyabb szinten tartása.

A folyadék nem ég, csak a felette lévő gőz, az is csak akkor, ha megfelelő arányban keveredik a levegővel és megfelelő hőmérsékletre melegedett, melyet lobbanáspontnak nevezünk. Ez a legalacsonyabb hőmérséklet, amelynél a gyúlékony folyadék feletti gőzök meggyulladnak.

6.2. Biomass to Liquids :

Meg kell említenünk a BTL (Biomass to Liquids), azaz a biomasszából előállított, cseppfolyósított üzemanyagokat, melyek a gyártásához felhasznált alapanyagtól függően két alapvető csoportba sorolhatóak. A magas cukor-, cellulóz-, vagy keményítő tartalmú növényekből bioetanol, a magas olajtartalmú növényekből biodízel készül. Létezik ezen kívül még a Bio-SPK (Bio Derived Synthetic Paraffinic Kerosene) elnevezésű bioüzemanyag típus is, melynek alapanyagául alga, faggyú egyéb természetes anyagok szolgálnak. Ezek közül az alga a legígéretesebb, amellyel egyre több kutatást folytat a Boeing, a General Electric és a Honeywell/UOP.

Üzemanyagok	Alapanyag	Energiasűrűség [MJ/kg]	CO ₂ kibocsátás elégetéskor [kg/kg]	Megjegyzés
Bioalkoholok	Növényekből			
Etanol	(kukorica, cukornád,	30	1,91	
Propanol	búza, burgonya,	34	N/A ¹	
Butanol	gyümölcsök) kinyert keményítő.	36,6	2,37	
Bioészterek	Alkoholok víztelenítésével előállítva.	N/A	N/A	Adalékanyagokként használják őket a teljesítménynöveléshez és a károsanyag kibocsátás csökkentésére.
Metanol	Növények ehető részeiből.	19,7	1,37	Az etanolhoz képest élettanilag mérgezőbb, és kisebb energiasűrűséggel rendelkezik.
Növényi olajok				
Ricinus olaj	Nem vagy csak	39,5	2,7	
Olíva olaj	kicsit módosítva	39	2,8	
Növényi zsír	a	32	N/A	
Napraforgó olaj	felhasználáshoz.	40	2,8	
Biogázok	Baktériumok és anaerob erjesztéssel előállított metán.	55	2,74	Ugyanolyan tulajdonságokkal rendelkezik, mint a fosszilis energiahordozókból előállított metán.
	Állati zsiradékok, növényi olajok, algák.	37,8	2,85	
Biodízel	Cellulóz és papírgyártási hulladékból FT szintézissel.	37,8	2,85	Az FT eljárás során szénhidrogén jön létre hidrogénből és szén-monoxidból.
"Zöld" dízel	Hidrokrakkolt ² olajból és zsiradékból.	48,1	3,4	Kémiai szempontból azonos a fosszilis eredetű dízellel.
Biohidrogén	Algákból vízbontással.	123	Nincs üvegházhatást okozó gáz kibocsátás elégetéskor.	Fosszilis energiahordozókból előállított hidrogén kiváltására.

1. táblázat: Különböző biotüzelőanyag fajták és néhány jellemzőjük [36]

¹ Not Available – nem elérhető (N/A)

² „Ipari eljárás, amely nagy molekulatömegű szénhidrogének elegyének hidrogén jelenlétében végzett katalitikus lebontására szolgál. A kiindulási anyagok kőolaj-feldolgozási melléktermékek és desztillációs maradékok, amelyekből az alkalmazott bifunkciós katalizátor típusától és a reakciókörülményektől függően kisebb molekulatömegű, főként elágazó szénláncú, telített szénhidrogének keletkeznek.” forrás: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Hidrokrakkol%C3%A1s> (letöltve: 2018. 02. 14.)

6.3. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids:

A jelenleg rendszerben lévő repülőgép hajtóanyagok egy másik kiváltási lehetősége lehet a jövőben a hidrogénezési eljárással előállított megújuló sugárhajtómű üzemanyag (Hydroprocessed Renewable Jet Fuel – HRJ) vagy más néven hidrogénezett észterek és zsírsavak (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids - HEFA). Ezeket használt sütőzsiradékból, növényi olajból és állati faggyúból állítják elő, miközben melléktermékként víz és propángáz keletkezik. Kémiai képletük: C_nH_{2n+2} , ami azt jelenti, hogy felhasználásuk során ugyan az üvegházhatású gázok keletkezése még mindig fennáll, de a szennyező anyagok kisebb mennyiségben kerülnek a légkörbe a hagyományos tüzelőanyagokhoz képest, valamint nem jön létre se hamu, se aromás vagy kén vegyület. Továbbá meg kell említeni, hogy magas cetánszámmal, energiatartalommal rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy akár önmagukban, keverés nélkül is felhasználhatók. Emellett termikusan stabil folyadékok. Hajtóműben nem okoznak korróziót, viszont magasabb paraffin értékük rontja a dermedési pontjukat, melynek értéke nagyban függ attól, hogy milyen alapanyagból készítik ezt a fajta bioüzemanyagot. Előnyeik közé sorolható, hogy nagyobb hajtómű átalakítások mellett is használhatóak. [35] Az IFPEN központ illetve a Shell Group kutatói két, különböző tulajdonságokkal rendelkező HEFA-t állítottak elő, melyet Jet A-1 jelzésű üzemanyaggal keverték össze eltérő arányokban. Kísérleteiket táblázatban foglalták össze:

Jellemzők	Sűrűség 15°C-on [kg/m ³]	Dermedési pont [°C]	Viszkozitás -20°C-on [mm ² /s]	Gyulladáspont elérése [min]
Jet A-1 előírás	775-840	-47 max.	8,0 max.	38
HEFA1	773,5	-27,0	11,72	67
Jet + 10% HEFA1	800,0	-49,0	4,426	43
Jet + 20% HEFA1	797,0	-46,5	4,859	43,5
Jet + 30% HEFA1	794,0	-44,5	5,363	45
HEFA2	765,9	-57,5	7,517	68
Jet + 75% HEFA2	775,0	-56	6,335	58

2. táblázat: Jet A-1, HEFA1 és HEFA2 üzemanyagok illetve keverékeik jellemzői [33] [34]

A táblázatból jól látható, hogy önmagában nem használható sem a HEFA1, sem a HEFA2 jelű bioüzemanyag, hiszen nem minden paraméterük felel meg a Jet A-1 előírásainak, viszont hagyományos üzemanyaghoz keverve javítanak egymás kémiai és fizikai tulajdonságaikon.

6.4. Gas to Liquid:

A GTL (Gas to Liquid) földgáz alapú üzemanyag, eljárás során biomasszából állítanak elő folyékony szénhidrogén üzemanyagot. Ez a módszer részben magába foglalja a Fischer-Tropsch szintézist. Kiindulási állapotként a biomasszát mechanikai és kémiai úton előkezelik. Ezután gázosítással szintézisgáz keletkezik, majd ezt az elegyet tisztítva pirolízist vagy Fischer-Tropsch módszert alkalmaznak a végtermék létrejöttéhez. A reakció 150 és 300°C között megy végbe különböző anyagú (pl. vas, nikkel, stb.) katalizátorok jelenlétében. Kedvező, hogy a gázturbinás hajtóművet ehhez a tüzelőanyaghoz már nem kellett átalakítani. [32] [34] [35]

7. TV2-117A HAJTÓMŰ ÉGŐTERÉNEK FELÉPÍTÉSE

7.1. Diffúzor

Diffúzora külső és belső házból áll:

A külső ház egy hegesztett kúp alakú köpeny, amely peremekkel van ellátva. Elöl a kompresszor hátsó házhoz, hátul az égőtérházhoz van erősítve. Részei:

- 8 db négyzet alakú perem a tüzelőanyag fúvókák felerősítéséhez;
- 4 pár háromszög alakú perem az olajbevezető, visszavezető és a támaszterek szellőzőcsöveinek felerősítéséhez;
- 8 db háromszög alakú perem a tűzcső felfüggesztő tartók rögzítésére;
- 2 db négyszög alakú perem az indító-gyújtó berendezés felerősítésére;
- a ház alsó részén felöntés van egy csőcsonk számára, amelyhez a tüzelőanyagot az égőtérből a túlfolyó rendszerbe vezető cső csatlakozik.

A belső ház szintén egy hegesztett szerkezetű csőtest, melynek mellső része a kompresszor tizedik fokozatának terelő lapátkoszorújához, hátsó része a kompresszor turbina álló terelőlapátkoszorú belső pereméhez van erősítve. Mellső részen profilírozott betét található, amely a diffúzort két kis nyílásszögű gyűrűs diffúzorra osztja. Ez a megoldás csökkenti az áramlás leszakadás lehetőségét. A belső felületére tömítésként szolgáló gyűrű van hegesztve.



26. ábra: TV2-117A hajtómű égőterének diffúzor külső háza

7.2. Égőtérház:

Kúpos hátsórésszel ellátott henger melyet előlről a diffúzor külső házhoz, hátulról a kompresszor turbina álló terelőlapátkoszorújának külső pereméhez csatlakozik. Jobb oldalon

egy háromszög alakú felöntés található, mely a meleg levegő elvezetésére szolgál (jégtelenítés). Jobb oldalon még hőelempárok összekötő csatlakozó tartói, alsó részén a túlfolyó szelepblokk tartói találhatók.

7.3. Tűzcső:

Hőálló acélból készült áramvonalazó lemezek borítják, melyek három-három külső és belső szakaszból állnak. Belső falára nyolc darab örvénykeltő van hegesztve melyek közepén egy-egy önbeálló gyűrű található. Ezek a gyűrűk sugárirányban elmozdulhatnak, ami engedi a tűzcső hőtágulását. Emellett gyűrűk belső felületén hosszanti kivágások vannak a fűvókákat hűtő levegő részére. A tűzcsövet nyolc sugárirányú tartó erősíti a diffúzor külső házához. A tűzcső hátsó része a kompresszor turbínájának álló terelőlapátkoszorújának peremére támaszkodik. A hajtómű működésekor a kompresszor turbina álló terelőlapátkoszorújának peremén, a tűzcső hőtágulása következtében tengelyirányban elmozdulhat. A tűzcső belső támszakaszára csúszógyűrű van felszerelve, amely megakadályozza, hogy a tűzcső a turbina álló terelőlapátkoszorú belső gyűrűjén történő elmozdulás esetén beakadjon. A gyűrű elfordulását rögzítő akadályozza meg.



27. ábra: Az égőtér tűzcsőve

7.4. Tüzelőanyagfűvóka:

A TV2-117A hajtóműben kétszatórnás, centrifugális fűvókát alkalmaznak. A fűvókaház rögzítőperemmel van ellátva. A ház belső részén két csöcsönk van a tüzelőanyag bevezetésére az első és második csatornába. E két csatorna porlasztó és szűrőelemei a ház kilépő részébe van beszerelve, melyek tömítő- és szorítógyűrűvel szerelt hüvellyel vannak rögzítve.

8. AZ ÉGŐTÉR MODELLJÉNEK ELŐKÉSZÍTÉSE A SZIMULÁCIÓKHOZ ANSYS CFX SZOFTVER FELHASZNÁLÁSÁVAL

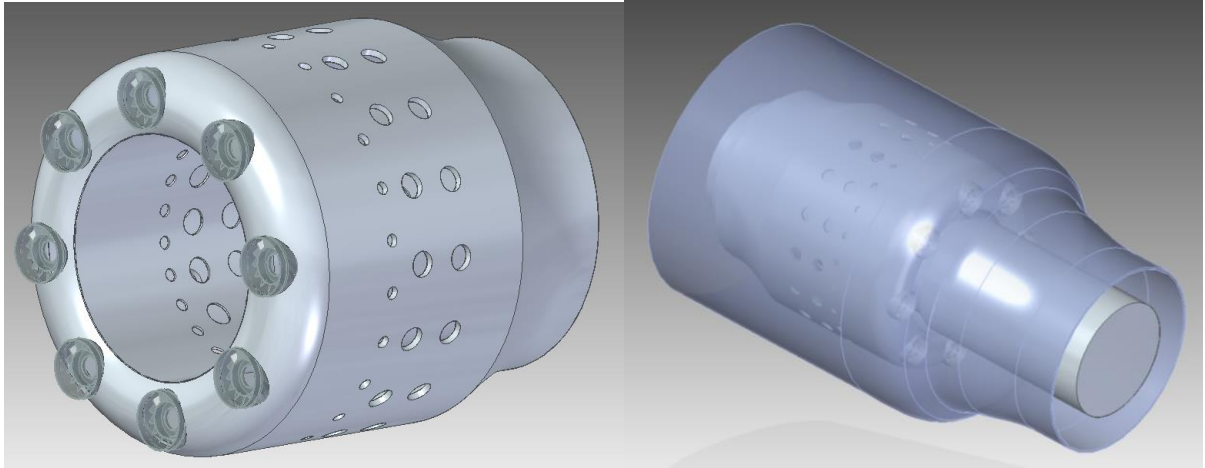
A 20. század második felétől a technológia gyors fejlődése és az ipar elvárásai miatt a közegáramlás numerikus technikái, vagy más szavak a Computational Fluid Dynamics (CFD), a közegáramlás vizsgálatának elsődleges módszereivé váltak. Eredetileg nukleáris és repülőipari célokra fejlesztették ki, de manapság ez a leghatékonyabb módja a költségek, a kapacitás és az idő megóvásának nemcsak a nukleáris, repülőgépipari vagy gépjárműipar, hanem, gyártási folyamatok, az építési technológiák, az atomenergia, a meteorológia, a környezetvédelem, a csillagászat és még az orvostudományban is. A CFD megoldók a legtöbb esetben a véges térfogatú módszeren alapulnak, ami azt jelenti, hogy a vizsgált térfogatot diszkrétizálják kis elemi térfogatokká.

8.1. Geometriai modell elkészítése:

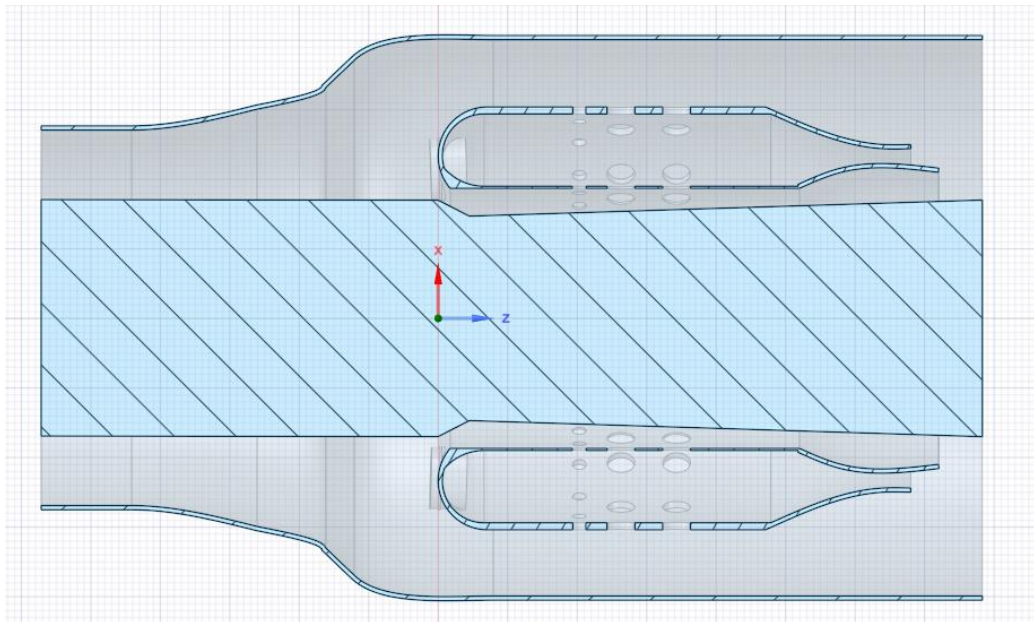
Mindenekelőtt szükséges magát a geometriát megalkotnunk, mely az alapját fogja képezni a további munkának. Ezt a feladatot a rendelkezésemre álló TV2-117A hajtómű metszeten végzett mérések alapján és egyéb forrásokból összegyűjtött méretek felhasználásával végeztem el. Szerencsére az ANSYS szofver képes felismerni és kezelni a főbb CAD-es programok kimeneti fájljait, például a Parasolid, CATIA, NX, SolidEdge, SolidWorks szoftverekét. A geometriai modellt azonban létrehozhatjuk az ANSYS beépülő SpaceClaim vagy DesignModeller szoftverével is. Én e lehetőségek közül a SolidEdge környezetet használtam, hiszen véleményem szerint kezelőfelülete egyszerűbb, átláthatóbb és tervezési szempontból sokkal inkább felhasználóbarát az előbb említett többi programénál.

A számos funkció segítségével igen pontos modell képezhető, azonban egyszerűsítések alkalmazására már itt is szükség van olyan elemeknél, melyek nem okoznak számottevő változást az eredményekben, de előállításuk annál bonyolultabb. A tűzcső szekunder szakaszában lévő hűtőlevegő beömlő nyílásai nagyon aprók, ezért ezeket nem építettem be a geometriába, azonban a későbbiekben a peremfeltételek definiálásakor egy vonalas bemeneti légáramlással fogom helyettesíteni. Ez a későbbiekben segíteni fogja a számítások redukálását. A geometria elkészítése után, a modellt szétbontottam különböző felületekre, amiket a későbbi előkészítő folyamat miatt előre meg kellett határoznom. Emellett meg kell határoznom az elkövetkezendőkben vizsgálandó térfogatot, mely a valós geometriának az inverze. Ez azt jelenti, hogy nem maga az égőtér test van modellezve, hanem az általa körülhatárolt áramlási térfogat. [39]

Számos lehetőség van a geometria vizsgálandó szegmensének kiválasztására. Például analízis 2D-ben az injektor keresztmetszeti síkjában, analízis 3D-ben, 90° -nál kisebb szegmensszög esetén, esetleg negyed, fél, vagy teljes geometria analíze. Nyilvánvaló, hogy a teljes geometria vizsgálata nyújtja legrealisztikusabb eredményt, azonban a kisebb méretű szegmensek vizsgálatával egyre több egyszerűsítés, pontatlanság és hiba fog bekapcsolódni a szimulációba. A numerikus hálónak képesnek kell lennie az előző fejezetekben említett égéshez kapcsolódó különböző jelenségek kezelésére.



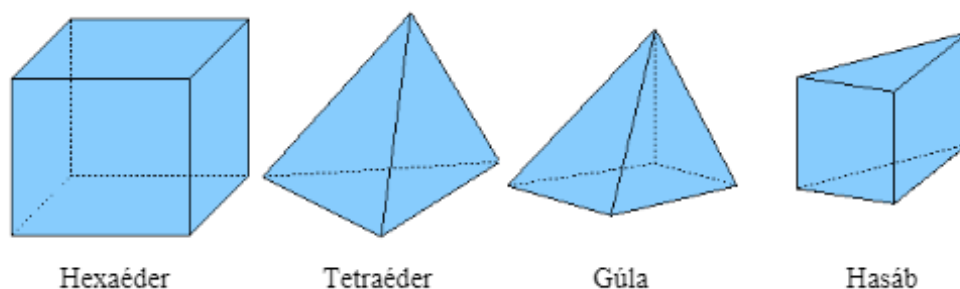
28. ábra: A tűzcső és a teljes égőtér modellje SolidEdge környezetben (saját kép)



29. ábra: Az égőtér modelljének keresztmetszete ANSYS SpaceClaim környezetben

8.2. Numerikus háló definiálása

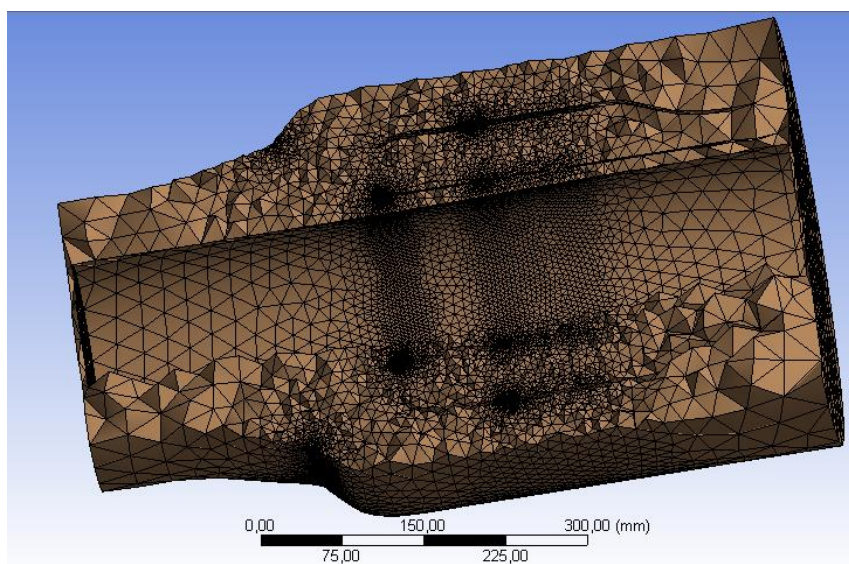
A második és talán a legkritikusabb lépés a vizsgálandó térfogat numerikus hálójának elkészítése. Ez azt jelenti, hogy az áramlási teret fel kell bontani háromdimenziós elemekből álló hálózott térre. A matematikai megoldót később ezekre az elemi terekre inicializáljuk. Ezek többfélék lehetnek a geometria komplexitásától, az elemeinek méretétől függően.



30. ábra: Az alapvető háromdimenziós hálóelemek [41]

Ha az áramlás álló fal mentén történik, a falon a közeg sebessége (a tapadás törvénye értelmében) zérus, attól távolodva hirtelen növekszik. Ennek érdekében a szerkezet felületeinek irányába besűrítettem a hálót, ami elengedhetetlenül szükséges a megfelelő számítási pontosság elérésének érdekében. A hálózási művelet, egyik kiemelkedően fontos eleme a dimenzió nélküli faltávolság (y^+). Nagyon fontos, hogy a határrétegben a logaritmikus faltörvényt milyen érvényességi feltétel mellett használjuk, milyen közelítést alkalmaz a szoftver. A határrétegben lezajló folyamatok modellezésére kétféle közelítés létezik, a „Wall Function Approach” és a „Near-Wall modell Approach”. A program automatikusan eldönti az elkészült háló és az áramlás tulajdonságai alapján azt, hogy melyik közelítést célszerű figyelembe venni. Az y^+ értékének ellenőrzésére természetesen csak a számítás lefuttatása után kerülhet sor. [41] A számítás gyorsasága és pontossága nagymértékben függ a létrehozott háló kialakításától és összetételétől. Bizonyos helyeken a bonyolult geometria és a kis hajlásszögű felületcsatlakozások sűrűbb hálót eredményeztek. Emiatt a cellaméretet nem lehet egy bizonyos érték fölé emelni, mert ezen érték felett a hálózás nem szolgáltat elfogadható eredményeket. A teljesen strukturált háló készítése összetett modellek felhasználása esetén ritkán alkalmazható, hiszen rendkívül időigényes és nagy tapasztalatra van szükség a helyes eljárás végrehajtásához. Az általam készített, 627 171 darab elemből álló, strukturálatlan tetraéderes háló létrehozásakor egyrészt törekedtem, hogy a valóságos folyamatokkal leginkább megegyező beállításokat alkalmazzak, másrészt pedig a hatékony modellalkotás és a szimuláció gyorsaságának szempontját is igyekeztem szem előtt tartani. Szükséges a hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése

is, melynek során a numerikus rács finomításával és a célparaméterek monitorozásával kiválasztható az optimális rács sűrűség. A kiválasztás során figyelembe kell venni, hogy elegendően sűrű legyen a numerikus rács ahhoz, hogy a vizsgált térfogatot megfelelő részletességgel fel tudjuk vizsgálni, hiszen túl kevés elem esetén bizonyos fontos áramlási jelenségek nem jelennek meg. Azonban arra is érdemes odafigyelni, hogy ne legyen indokolatlanul sűrű sem. A rácsfüggetlenségi vizsgálatoknál általában a rács sűrűségének az előző rácshoz képest megközelítőleg annak a duplájára való növelése a megszokott módszer. Ennek a vizsgálatnak azonban majd csak a kapott eredmények kiértékelése után lesz jelentősége, azok nem megfelelő volta esetén. Az említett tulajdonságok fényében megállapító, hogy a különböző hálótípusok összehasonlítása fontos kérdés, mivel ez által egy adott szimulációs típusról ki tudjuk deríteni, hogy milyen mértékben van szükség a strukturált kialakítású hlóra. Azonban a teljes eljárás jósága így nem kizárólag mérések útján állapítható meg.



31. ábra: Égőtér tetraéderes hálós metszete egy szimmetriatengely mentén (saját kép)

Az ezután következő lépés a peremfeltételek definiálása és anyagtulajdonságok megadása, geometriához rendelése lesz, mely magában foglalja a belépési- és kilépési paraméterek meghatározását, közegáramlás iránya, nyomás és sebesség mértékét, illetve az anyagok keveredésének minőségét és egymással való reakciójuk definiálását. Az analízis beállításai során a tér anyagtulajdonságait ideális gázként értelmezett levegőként állítom be. Az be- és kiáramló levegő tulajdonságait pedig a hajtómű műszaki leírása alapján viszem be. Tekintve, hogy a vizsgált hajtómű több üzemmódon és magasságban is képes működni, szükséges meghatározni ezeket a paramétereket is. Tekintsük a hajtóművön kívüli nyomást Nemzetközi

Egyezményes Légkör szerinti szabványos 101325 Pa-nak, melyet a hajtómű kompresszora 6,6-szeresére sűrít, így a levegő 668 745 Pa nyomással érkezik a diffúzorba. Itt a tömegáram értéke $\dot{m} = 6,8 \text{ kg/s}$. Emellett külön meg kell jelölnöm a tüzelőanyagbefecskendező nyílásokat, mint rendszeren belüli bemenetet, valamint magához a tüzelőanyag típushoz tartozó tulajdonságokat is szükséges meghatározni, melyben segítségemre lesz az ANSYS egy másik beépülő modulja, a Chemkin. Fontos emellett az alkalmazandó turbulencia modellt is kiválasztani. Számos ilyen modell kifejlesztésére került sor. Ezek közül is a leggyakrabban használtak a következők:

- Mixing length modell, mely alkalmas vékony nyírórétegek, sugarak, keveredési rétegek, határrétegek megoldásához, emellett ez egy rengeteg kísérlettel összehasonlított modell, melynek korlátai teljességgel fel lettek térképezve. Azonban nem alkalmas határréteg-leválás és recirkuláció megoldására.
- Spalart-Allmaras model viszonylag egyszerű és számításokra, alkalmas kedvezőtlen nyomásgradiensű határrétegek megoldására. Általában szárnyprofilok megoldásához alkalmazzák. Hátránya, hogy nem megfelelő komplex geometriák modellezésére, ahol a hosszú skálákat nehéz definiálni, valamint nem eléggé érzékeny az energiaátadó folyamatok észlelésére gyorsan változó áramlások esetében.
- k- ϵ model a legegyszerűbb turbulencia modell, amelyhez már a kezdeti vagy peremfeltételek megadása is elégséges. Kiváló választás ipari alkalmazások esetében. Hátránya, hogy gyenge teljesítményt nyújt ezen külső áramlások azaz csóvák, keveredési rétegek, sugarak vizsgálatánál, amelyek viszont tipikusak a repülőgépmérnöki alkalmazásokban, emellett rosszul működik falak mentén, jól a falaktól távol.
- k- ω model kiváló választás külső aerodinamikai problémákra, nem csak belső áramlásokra. Hátránya, hogy csak fal mentén alkalmazható
- Shear Stress Transport model (SST) Kombinálja a k- ϵ és k- ω modellek előnyeit, azaz a k- ϵ modellt használja távol a falaktól, ezáltal kizárja a beömlésnél beállított turbulens intenzitásra való érzékenységet, emellett k- ω modellt használ a fal mentén. Kiváló a külső aerodinamikai problémák megoldására, azaz zéró, vagy kedvezőtlen nyomásgradiensű határrétegek, és szabad nyírórétegű áramlások esetében.
- Reynolds Stress Model (RSM) A legáltalánosabb az összes klasszikus turbulens modell közül csak kezdeti vagy peremfeltételek megadása elégséges. Megvan benne a potenciál, hogy az összes átlagáramlási tulajdonságot pontosan leírja anélkül, hogy "állítani" kellene. [42]

Ezek közül a Shear Stress Transport model alapján fogom beállítani.

A peremfeltételek meghatározása után a tesztesetek lefuttatása következik az ANSYS Solver modul segítségével. A megoldó, az egyenleteket iteratívan oldja meg. Itt beállításainál megadhatjuk az iterációk számát, valamint megfigyelési pontokat hozhatunk létre, amelyekben konvergenciagörbéken keresztül a vizsgált paraméterek értékeinek változását tudjuk nyomon követni az iterációs lépések folyamán. Emellett bállíthatjuk, hogy milyen konvergencia-kritérium esetén álljon le a számítási folyamat. A program futtatását követően vizsgálhatóak a kapott eredmények, azaz következhet a poszt-processzálas. Ahol vizsgálhatóak

9. ÖSSZEGZÉS

Dolgozatomban bemutattam a gázturbinás hajtóművek égőtereinek általános felépítését, külön kitérve a TV2-117A típusú hajtómű égőterére. Ezután kifejtettem az ott lejátszódó égési folyamatok jellemzőit. Emellett dolgozatomban kitértem a felhasználni kívánt alternatív tüzelőanyag típusok meghatározására, tulajdonságaik ismertetésére és a definiált környezetben való viselkedésének elemzésére. Ezeket szem előtt tartva bemutattam az égőtér CFD modelljének létrehozásának módját és előkészítését a szimulációk elvégzéséhez, emellett ajánlásokat dolgoztam ki a szimuláció további beállításaira vonatkozóan. Az égőtérben lejátszódó bonyolult áramlási folyamatok identifikálása, az égés reakciókinetikai leírása – mely meghatározza az égéstermékek összetételét – hosszadalmas és összetett feladat, így annak teljeskörű elemzése túlnyúlik a dolgozatom keretein. További munkám során, peremfeltételek definiálása és a tüzelőanyagok adatainak betáplálása után olyan összehasonlító elemzéseket lehet elvégezni, melyekkel részletesen szemléltethetők a lejátszódó folyamatok és az áramlások azon tulajdonságai, melyeket kísérleti módszerekkel nem, vagy csak jelentős anyagi befektetéssel lehet. Munkám eredményeként olyan modellt hoztam létre, mely alapjául szolgálhat a teljes szimulációs projekt elkészítéséhez. Ezzel lehetőség nyílik olyan elemzések elvégzéséhez, melyek a különböző alternatív tüzelőanyagok hajtóműben való alkalmazása esetén létrejövő emisszióval kapcsolatosak.

A dolgozatomban leírt eddig elért eredményeim felhasználhatóak más típusú hajtóművek égőtereinek ilyen célú értékeléséhez. A szimulációval előállított adatok felhasználásával meghatározható egy adott, az állami légiközlekedésben használt légijármű flotta környezetterhelése, környezetkárosító hatása.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Fülöp Zoltán, Gázturbinák, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1975
- [2] Varga Béla, Kavás László: Gázturbinás hajtóművek égőterei és nyomásveszteségük becslése, REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK, 28. évfolyam, 2017, (pp. 85-95) url: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-Repulestudomanyi_kozlemenyek.pdf (2018.03.15.)
- [3] Stanely S. McGowen: Helicopters: an illustrated history of their impact, ABC-CLIO, Santa Barbara, California, 2005 ISBN: 1-85109-473-3
- [4] Varga Béla: Helikopter hajtóművek a kezdetektől napjainkig, Repüléstudományi konferencia, Szolnok, 2009
- [5] url: <http://www.frankwhittle.co.uk/content.php?act=viewDoc&docId=3&docFatherId=1&level=sub> (2018.02.15.)
- [6] url: http://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=214 (2018.02.15.)
- [7] H. Cohen, G.F.C. Rogers, H.I.H.Saravanamuttoo: Gas Turbine Theory, 5th Edition, Cornwall, 2001, ISBN: 013015847X
- [8] Czifra László: Gázturbinás hajtóművek. III. rész 1-2 kötet A hajtómű fő részeinek szerkezete, működése. NKE HHK tankönyv, 1989
- [9] url: ftp://ftp.energia.bme.hu/pub/Energetikai_folyamatok_es_berendezesek_BMEGEENAG71/Eloadasok-2017/Biomassza_Egesi_folyamatok.pdf (2018.03.14.)
- [10] url: http://www.enginehistory.org/Museums/LeBourget/Jumo004_1.jpg (2018.03.15.)
- [11] url: <http://www.aviation-history.com/engines/bmw003.html> (2018.03.15.)
- [12] url: <http://www.frankwhittle.co.uk/content.php?act=viewDoc&docId=3&docFatherId=1&level=sub> (2018.03.15.)
- [13] url: <http://www.glue-it.co.uk/engines/de%20havilland/goblin/photo1.html> (2018.03.15)
- [14] url: <http://stonehengeairmuseum.org/j33-turbojet-engine> (2018.03.15)
- [15] url: http://aviationweek.com/century-aviation-week/milestones-100-years-aero-engine-development#slide-0-field_images-1382521 (2018.03.15.)
- [16] url: <https://www.thisdayinaviation.com/16-december-1951/> (2018.03.15)
- [17] url: <https://www.ragay.nl/kaman-htk-hok-huk/htk-history> (2018.03.15)
- [18] url: <https://airplanelife.blogspot.hu/2015/01/general-electric-t58-engine-cutaway.html> (2018.03.15)
- [19] url: http://www.redstar.gr/Foto_red/Aero_Engines/En_VK_1/DSC05671.jpg (2018.03.15)
- [20] Németh Roland: Repülőgép hajtómű égőterében lejátszódó égési folyamat aerodinamikai, termodinamikai és égésméleti vizsgálata, Szolnok, 2017,
- [21] Varga Béla: Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatásfok növelésének műszaki technológiai háttere, és ezek hatása a katonai helikopterek korszerűsítésére, PhD értekezés, Budapest, 2013, url: http://archiv.uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2013/varga_bela.pdf (2018.03.16.)
- [22] Varga Béla, Kavás László: Gázturbinás hajtóművek égőterei és égési folyamata, égőtér hatásfoka, emissziója, REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK, 28. évfolyam, 2017, (pp. 85-94) url: http://epa.oszk.hu/02600/02694/00074/pdf/EPA02694_rtk_2017_02_085-094.pdf (2018.03.17.)
- [23] Bödő Sándor: Repülőgép hajtóművek fejlesztésének lehetőségei, Szolnok, 2016, url: http://www.repulestudomany.hu/tdk/2016_Bodo_Sandor_TDK.pdf (2018.04.10.)
- [24] Turányi Tamás: Kémiai folyamatok kinetikájának leírása részletes reakciómechanizmusok alapján, MTA doktori értekezés, Budapest, 2003, url: <http://garfield.chem.elte.hu/Turanyi/TTMTAD.PDF> (2018.03.20.)

- [25] Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal: Gas Turbine Combustion, Alternative Fuels and Emissions, Taylor and Francis Group, 2010, ISBN: 978-1-4200-8605-8
- [26] Rolls-Royce: The Jet Engine (fifth edition). Birmingham England, Rolls-Royce plc. 1996, url: http://airspot.ru/book/file/485/166837_EB161_rolls_royce_the_jet_engine_fifth_edition_gazoturbiny_y_dviga.pdf (2018.04.17.)
- [27] Chung K. Law: Combustion Physics, New York, 2006, ISBN: 9780511754517
- [28] Szegedi Péter, Óvári Gyula: Alternatív üzemanyagok alkalmazásának lehetőségei a repülésben, REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK, 2010/2. (pp. 1-12.) url: http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2010_cikkek/Ovari_Gyula-Szegedi_Peter.pdf (2018.04.01)
- [29] Szegedi Péter, Óvári Gyula: Hagyományos repülőgép-üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai; Hadmérnök 5. évfolyam. 4. szám, 2010, (pp. 16-37) url: http://hadmernok.hu/2010_4_ovari_szegedi.pdf (2018.04.01)
- [30] Szabó László: Szerkezeti és üzemanyagok jegyzet, Szolnok, Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, 1989, (p.148)
- [31] Dr. Penninger Antal: Tüzeléstechnika, BME KKFT, Budapest, 2014, <http://docplayer.hu/11746762-Penninger-antal-tuzelestechnika-bme-energetikai-gepek-rendszerek-tsz-tuzelestechnika-segedanyag-az-eliadasokhoz-dr-penninger-antal-egyetemi-tanar.html> (2018.04.01)
- [32] Rozovicsné Fehér Krisztina: Korszerű eljárások a légijárművek energia-takarékos és környezetkímélő üzemeltetésének javítására, Economica, A szolnoki főiskola tudományos közleményei, 8. évfolyam 4/2. szám, 2015, (pp. 189-199)
- [33] L. Strack, L. Pidol, N. Jeuland, T. Chapus, P. Bogers, J. Bauldreay: Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimisation of Process Yield. Oil & Gas Science and Technology, 2016, ISBN: 978-94-6186-810-7
- [34] Rozovicsné Fehér Krisztina: A repülésben használható korszerű bioüzemanyagok, Hadmérnök XII. évfolyam. 2. szám, 2017, (pp. 108-122) url: http://hadmernok.hu/172_09_feher.pdf (2018.04.01)
- [35] H. T. Kandaramath, Z. Yaacob, N. N. Binitha: Aviation Biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, (pp. 1234-1244) <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114009204> (2018. 02. 13.)
- [36] <http://biofuel.org.uk/types-of-biofuels.html> (2018.04.06.)
- [37] https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Aircraft-FE-Trends_20150902.pdf, (2018.03.15)
- [38] <http://www.thermopedia.com/pt/content/766/> (2018.03.15.)
- [39] Rácz Gábor, Veress Árpád: Háló- és anyagtulajdonság-érzékenységi vizsgálat forgó áramlási tér elvén alapuló légsavar-szimulációs módszer esetén, REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK, 26. évfolyam 2. szám, 2014 (pp. 360-378) url: <http://docplayer.hu/3662893-Halo-es-anyagtulajdonsag-erzenysegi-vizsgalat-forgo-aramlasi-ter-elven-alapulo-legcsavar-szimulacios-modszer-eseten-3.html> (2018.04.06.)
- [40] <http://www.enginehistory.org/museums/lebourget/leborget.shtml> (2018.04.16.)
- [41] Rácz Gábor, Veress Árpád: Indukált sebességeloszlás meghatározása és alkalmazása légsavaros repülőgép körül kialakult áramlás modellezésére, REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK, 25. évfolyam 2. szám, 2013 (pp. 600-625) url: http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2013_cikkek/2013-2-46-Racz_Gabor-Veres_Arpad.pdf (2018.04.17.)
- [42] url: https://www.feszty.com/uploads/3/6/7/8/3678219/sze-jft_alkalmazott%C3%81raml%C3%A1stan_week7_hun.pdf (2018.04.17.)