

Varga Béla, Kavas László, Tóth József, Óvári Gyula

Kriogén hajtóanyagok a polgári repülés területén

A légi közlekedés növekedésének hatására az elmúlt évtizedekben (1960–2018) az ágazat CO₂-kibocsátása 6,8 millió tonnáról 1034 millió tonnára nőtt. Az ICAO globális CO₂-csökkentési törekvéseinek elérését célzó intézkedéscsomag fontos technológiai elvárásokat fogalmaz meg a hajtóműgyártókkal szemben is. Ennek megfelelően a gyártók, illetve egyetemi kutatói csoportokkal és kutatóintézetekkel alkotott konzorciumaik lázasan keresik a megoldásokat. Ezek a kutatások kiterjednek új működési alapelvek, szerkezeti megoldások, szerkezeti anyagok, illetve új hajtóanyagok lehetséges alkalmazására is. Az előadást a cseppfolyósított földgáz (LNG¹) és kerozint égető, úgynevezett Multi-Fuel Hybrid Engine (MFHE) koncepciója ihlette, feldolgozva a Feijia Yin és társai Performance assessment of a multi-fuel hybrid engine for future aircraft cikkét [6], másrészt vizsgáljuk, hogy az LNG, illetve az LH2² alkalmazása hogyan érinti a repülőgép-hajtóművek tüzelőanyag-hatékonyságát és a várható teljesítményét a kerozin hajtóanyaggal összehasonlítva.

Kulcsszavak: *fajlagos hasznos munka, termikus hatásfok, alternatív tüzelőanyagok, kriogén tüzelőanyagok, LNG, LH2*

1. Bevezetés

Az új évezred légi közlekedése forradalmi megoldásokat igényel a biztonság, a megbízhatóság, a környezeti kompatibilitás és a megfizethetőség javítására irányuló lakossági igények kielégítésére. Ebből is kiemelkedik a környezeti hatások csökkentése, elsősorban is a széndioxid és az egyéb üvegházhatást növelő gázok kibocsátásának csökkentése. Ennek fényében a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) úgy határozott, hogy az ICAO és tagállamai az érintett szervezetekkel együttműködve törekednek arra, hogy elérjék a globális úgynevezett „szén-dioxid-semleges növekedést”, ami azt jelenti, hogy 2020-tól a nemzetközi légi közlekedési iparág nettó szén-dioxid-kibocsátása nem növekedhet. Az intézkedéscsomag sok más mellett természetesen magában foglalja a technológiai elvárásokat hajtóművek szempontjából, valamint a fenntartható alternatív üzemanyagok alkalmazását. Az eredmények jellemzésére szükséges találnunk olyan mutatókat, amelyek egyértelműen jellemzik a hajtóművek megfelelőségét. A gázturbinás hajtóművek fajlagos hasznos munkája és termikus hatásfoka éppen olyan jellemzők, amelyek alapvetően meghatározzák a hajtóművek megfelelőségi fokát.

¹ LNG – Liquefied Natural Gas: cseppfolyósított földgáz.

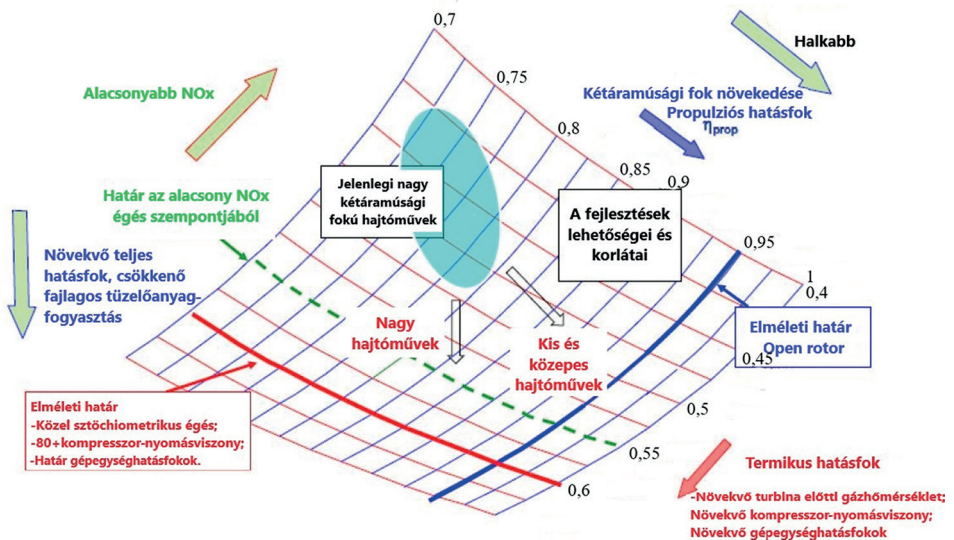
² LH2 – Liquefied Hydrogen: cseppfolyósított hidrogén.

A következő fejezetekben megvizsgáljuk, hogy a címben szereplő tüzelőanyagok milyen hatással lesznek a gázturbinás hajtóművek fent említett teljesítményparamétereire, illetve szén-dioxid-kibocsátására.

2. Lehetőségek és korlátok a fejlesztésben

A hajtóművek hatásfokát és ezzel tüzelőanyag-hatékonyságát (szén-dioxid-kibocsátását) jellemzően az alábbi néhány tényező határozza meg, úgymint:

- a kétáramúsági fok a propulziós hatásfokon keresztül;
- a turbina előtti gáz hőmérséklet és a nyomásviszony a termikus hatásfokon keresztül;
- a gépesség hatásfokok különböző mértékben szintén a termikus hatásfokon keresztül;
- a turbinalapátok hűtési igényének csökkenése is a termikus hatásfokot javítja (kompresszorból való levegőelvétel csökkenésén keresztül);
- esetleg veszteség hő újrahasznosítása (egyelőre távol a gyakorlati hasznosítástól);
- az elégetett tüzelőanyagok tulajdonságai, összetétele;
- anyagtechnológiai és gyártástechnológiai fejlesztések alapvetően a hajtómű tömegén keresztül.



1. ábra

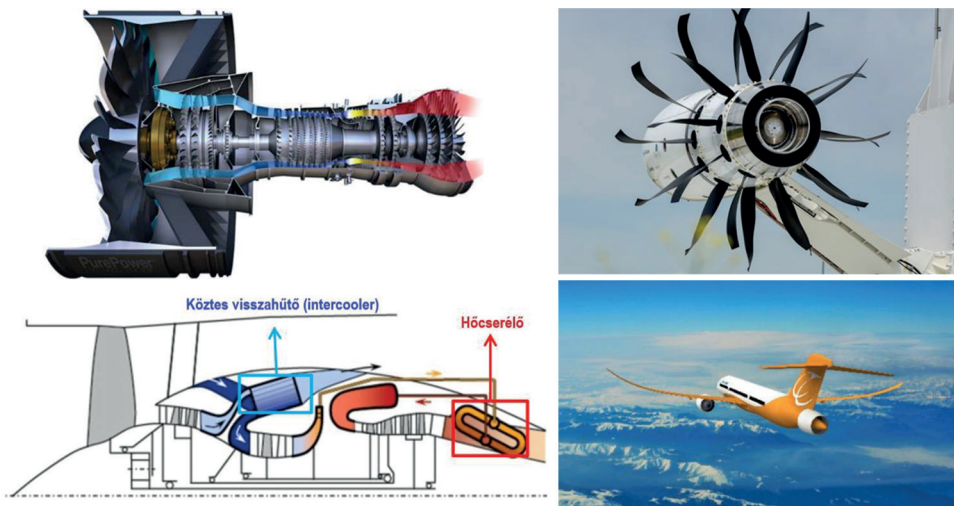
A termikus és a propulziós hatásfok növelésének lehetőségei és korlátai [1]

A termikus és propulziós hatásfok növelésének lehetőségeit és határait az 1. ábra szemlélteti. Mindkét hatásfok javításának szempontjából a tervezők egyre súlyosabb nehézségekkel néznek szembe. A nagy kétáramúsági fokú hajtóművek kompresszorainak nyomásviszonya évtizedek alatt több mint kétszeresére nőtt. A legújabb hajtóműveknél ez elérte a 45-öt, és tart 50 feletti értékekhez, és valószínűleg hamarosan elérheti a 60-at. Ilyen magas értékeknél

azonban már a kompresszor kilépő keresztmetszetében mért hőmérséklet is igen magas, valahol 900 K és 1000 K között van. Ez egyrészt felveti már a kompresszor utolsó fokozatainak a magas hőterhelését. Továbbá mivel a szükséges nyomáskülönbség miatt az első fokozat turbinalapátjainak hűtéséhez az utolsó kompresszor fokozattól kell hűtőlevegőt elvenni, így a hűtőlevegő mennyiségét növelni kell, rontva ezzel a termikus hatásfokot. További kedvezőtlen hatás, hogy a nyomásviszony növelése csökkenti a hátsó fokozatok lapátmagasságát, ami legtöbbször a kompresszor politrópikus hatásfokának csökkenéséhez és ezáltal szintén a termikus hatásfok csökkenéséhez vezet.

Másik probléma az égés során a megnövekedett nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátása. Ez a szennyezés nagyon káros a növényzetre és az élővilágra is. Nagyszámú kutatás bebizonyította, hogy az NO_x kibocsátása arányos a kompresszor-nyomásviszonnyal és a turbina előtti hőmérséklettel. Ezt még a különböző CAEP³ NO_x-kibocsátási határértékeknél is figyelembe veszik, magasabb NO_x-kibocsátási értéket engedélyezve a magasabb nyomásviszonnyal rendelkező hajtóműveknél.

A fejlesztési irányok (lásd a 2. ábrát) rendkívül sokoldalúak, és pillanatnyilag szinte eldönthetetlen, melyik fejlesztési irány, illetve irányok kombinációja hozhat áttörést a tüzelőanyag-fogyasztás, illetve a károsanyag-kibocsátás tekintetében.



2. ábra

Polgári repülés területén megjelenő hajtóműfejlesztési irányok [2], [3], [4], [5]

A 2. ábra bal felső sarkában látható hajtómű, úgynevezett Geared Turbofan, már tulajdonképpen egy régebbi, körülbelül 50 éves múltra visszatekintő és mára megvalósult koncepció. A fő cél ebben az esetben, hogy a kétáramúsági fokot úgy lehessen növelni, hogy (a fan fokozat elkerülhetetlen fordulatszám-csökkentése mellett) ez ne járjon a kisnyomású forgórész fordulatszám-csökkenésével és ezzel a kompresszor- és a turbinafokozatok számának növekedésével. Ezekbe a hajtóművekbe egy bolygóműves fordulatszám-csökkentőt építenek be,

³ Committee on Aviation Environmental Protection – Repülési Környezetvédelmi Bizottság.

ezzel lehetővé téve a kisnyomású forgórész magasabb fordulatszámát és ezzel a kompresszor- és a turbinafokozatok száma nemhogy nem nőtt, hanem csökkenhetett. Előny a propulziós hatásfok növekedése és esetlegesen némi tömegcsökkenés [2].

A 2. ábra jobb felső sarkában az úgynevezett Open Rotoros elrendezés tulajdonképpen csak felmelegítése egy korábbi, már akkor sokat ígérő fejlesztésnek. A hajtómű alkalmazásával 25–30%-os tüzelőanyag-megtakarítást értek el az 1970–1980-as években a korabeli hajtóművekkel összehasonlítva, de az akkori zajnormákat (ICAO Chapter 3) a hajtómű nem tudta teljesíteni. Végül a technológiai és gazdasági kockázat, a zajszint, a közvélemény elutasítása és az üzemanyagárak csökkenése a projekt iránti érdeklődés csökkenéséhez vezetett. Manapság azonban, főleg a szén-dioxid-kibocsátás, illetve a klímaváltozás miatti aggodalmak ismét e felé a koncepció felé (is) terelték a hajtóműtervezéssel foglalkozó szakemberek figyelmét. A tüzelőanyag-hatékonyságot tekintve ezeknél a hajtóműveknél még a mai korszerű reduktoros nagy kétáramúsági fokú hajtóművekhez képest is kb. 15%-os fogyasztáscsökkenést predesztinálnak. A zajcsökkentésre nagy erőfeszítéseket tesznek, de ez egyelőre megoldatlan [3].

A 2. ábra bal alsó sarkában egy köztes visszahűtött és hőcserélős hajtómű elvi felépítését láthatjuk. Több kutatási projekt is foglalkozott és foglalkozik ezzel az elgondolással, többek között az MTU Aero Engines AG és LEMCOTEC⁴ európai kutatási projekt. Az alapelv egyszerű, de a megvalósítás rendkívül összetett. Nyilvánvaló, hogy a fűvócsövön kiáramló magas hőmérsékletű gázzal nagy energiát veszünk. A kompresszió során a köztes visszahűtés sem új megoldás, de ezeknek már egy működő struktúrába beillesztése, úgy, hogy sem a tömeg, sem a méret, sem az áramlási veszteségek ne nőjenek jelentősen, rendkívül bonyolult feladat [5].

A 2. ábra jobb alsó sarkában látható elgondolás elnevezése „Propulsive Fuselage Concept”. A hagyományos nagy kétáramúsági fokú hajtóművek tömeg- és ellenállás-csökkentése, valamint a tolóerő által a repülőgép szerkezetére ható terhelés kedvezőbb elosztása érdekében ígéretes lehet a tolóerő megosztása. Ez egyben lehetővé tenné az alap hajtómű fan fokozat átmérőjének csökkentését úgy, hogy a propulziós hatásfok növekedne az összességében nagyobb fan felület miatt [4].

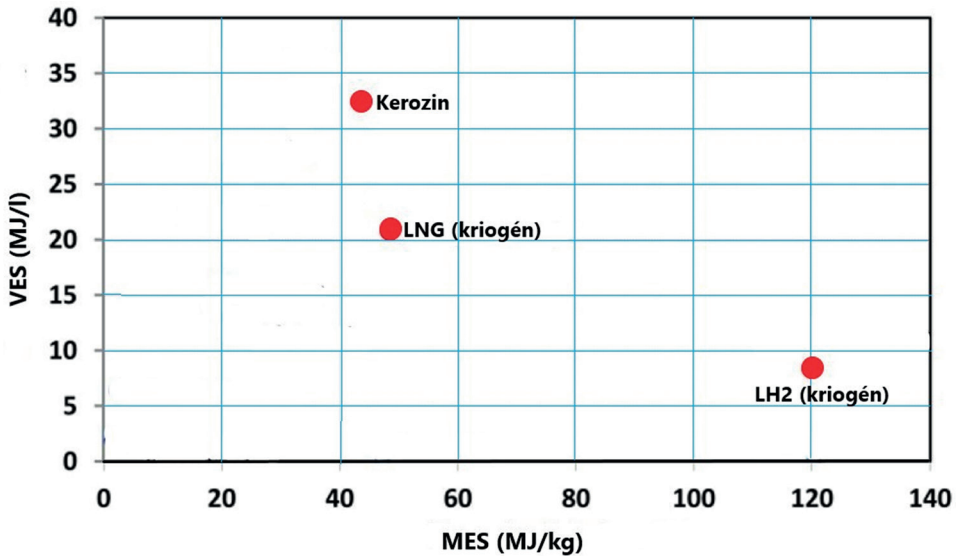
A következő fejezetekben részben a kriogén tüzelőanyagokkal (LNG, LH₂) kapcsolatos nemzetközi kutatásokkal foglalkozunk, illetve vizsgáljuk, hogy ezek a tüzelőanyagok milyen hatással lesznek a gázturbinás hajtóművek legfontosabb teljesítmény- és megfelelőségi mutatóira.

3. Kriogén tüzelőanyagokkal végzett nemzetközi kutatások

Ahogy az előző fejezetben szóba került, az elégetett tüzelőanyag tulajdonságai, összetétele is befolyásolhatja a tüzelőanyag-hatékonyságot és a károsanyag-kibocsátást.

A tüzelőanyag kiválasztásának számos kritériuma van. Az egyik fő tényező az energiasűrűség, mivel a tömeg és térfogat csökkentése kiemelten fontos a repülés szempontjából. A tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűség (MES [MJ/kg]) és a térfogategységre vonatkoztatott energiasűrűség (VES [MJ/l]) egyaránt lényeges.

⁴ Low Emissions Core-Engine Technologies.

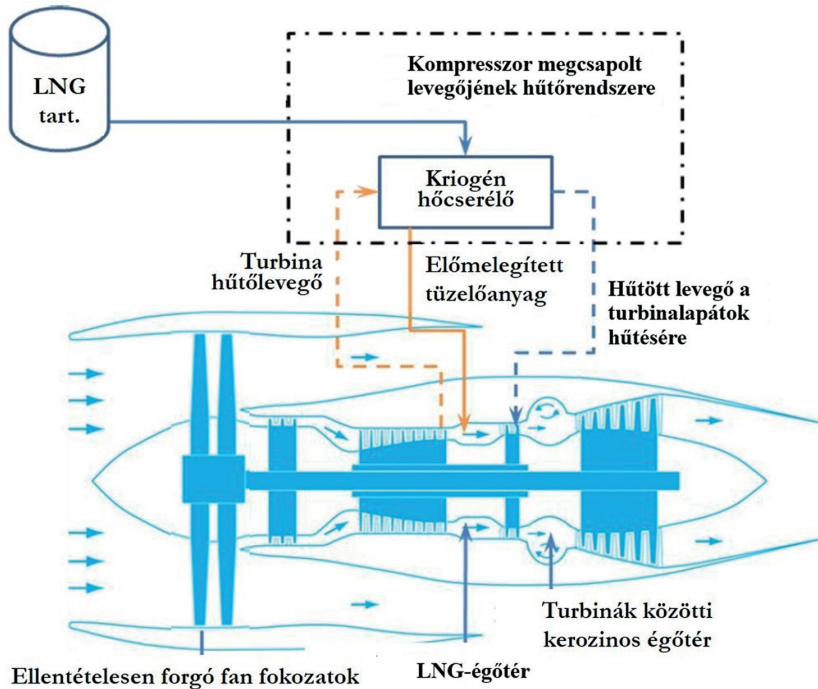


3. ábra

Tüzelőanyagok tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűsége (MJ/kg) és a térfogategységre vonatkoztatott energiasűrűsége (MJ/l) (a szerzők [6] alapján)

A 3. ábrán a különböző energiaforrásokra láthatjuk ezeket az adatokat. Látható, hogy a kerozin esetében ezek az értékek kedvezők, ezért alkalmas repülőgép-tüzelőanyag. A cseppfolyósított hidrogén (LH2) magas MES-sel, de gyenge VES-sel rendelkezik, ami arra utal, hogy bármilyen észszerű mennyiségű LH2 szállításához nagy tárolókapacitásra lenne szükség. Ez kihívást jelent az LH2 repülésben való használatában. Ezen túlmenően az LH2 használata más kihívásokkal is jár, mint például a biztonság, logisztika stb. Természetesen nem szabad elhanyagolni az LH2 használatának előnyeit, mivel a CO₂-kibocsátás kiküszöbölhető [6].

Emellett jelentős figyelmet kapott az elsősorban metánból álló cseppfolyósított földgáz (LNG). Az LNG olyan földgáz, amelyet cseppfolyósítottak az energiasűrűség (VES) növelése és a nagynyomású tárolás elkerülése érdekében. A 3. ábrán látható, hogy az LNG a kerozin és az LH2 között helyezkedik el, mind a VES, mind a MES szempontjából. Jelenleg az LNG az egyik legolcsóbb elérhető üzemanyag. A földgáz globális készletei óriásiak, ami arra utal, hogy az LNG ára stabil lehet. Ráadásul az LNG az egyik legtisztább tüzelőanyag, és a közelmúltban bebizonyosodott, hogy LNG megújuló energia felhasználásával is előállítható [6]. Mindezt persze manapság bonyolítja, hogy a jelen gázellátási válság hatására megugrott a földgáz iránti kereslet, aminek hatására az árak kiszámíthatatlanul változnak, és az ellátás is bizonytalanra vált. A 4. ábrán egy LNG kerozin kombinált hajtóanyagú hajtómű elvi vázlatát láthatjuk.



4. ábra

Lehetséges „multi fuel” gázturbinás hajtómű elrendezése (a szerzők [6] alapján)

Az LNG előnyei:

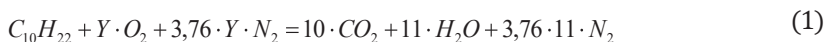
- körülbelül 25%-os CO₂-kibocsátás-csökkenés azonos energiafogyasztás mellett;
- a földgáz jobban keverhető levegővel, mint a kerozin, ami csökkenti az NO_x-kibocsátást;
- a kriogén hőcserélővel a kompresszortól elvett levegő hőmérséklete 400 K-nel csökkenthető, az LNG hőmérséklete pedig körülbelül 200 K-nel növelhető. Ennek eredményeként a turbina hűtőlevegő tömegárama 45%-kal csökkenthető;
- az LNG tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűsége nagyobb, mint a keroziné [6].

Hátrányai:

- a kerozinnal ellentétben az LNG-t nem lehet szárnyakban tárolni;
- az LNG szigetelt hengeres vagy gömb alakú tartályokban tárolható, növelve a repülőgép üzemi üres tömegét;
- az LNG térfogati energiasűrűsége kisebb, mint a keroziné;
- repülőtéri létesítmények és logisztika szükséges az LNG tárolásához és tankolásához;
- az LNG égésének H₂O-kibocsátása (nagyobb magasságban szintén növeli az üveg-házhatást) magasabb a kerozinéhoz képest [6].

4. Tüzelőanyagok sztöchiometrikus égésekor keletkező égéstermékek

Vizsgálatunk tárgyát a fentieknek megfelelően három tüzelőanyag, a kerozin, a földgáz és a hidrogén képezi. Elsőként ezek sztöchiometrikus égését vesszük górcső alá. Természetesen mind a kerozin, mind a földgáz összetétele némileg változhat. A kerozin esetében, hogy a sztöchiometrikus égés kémiai egyenlete felállítható legyen, egy reprezentatív összetevőt érdemes kiválasztanunk. A kerozin összetétele alapján leginkább a $C_{10}H_{22}$ szénhidrogénnel azonosítható. A kémiai reakció vizsgálata [(1) és (2) egyenletek] megadja, hogy a sztöchiometrikus égés esetén 1 kg tüzelőanyag elégetéséhez mennyi levegő szükséges, illetve ennek reciprokaként a tüzelőanyag és levegő arányát (f).



Könnyen belátható, hogy a reakció végeredménye szén-dioxid és víz(gőz). Optimális esetben a levegő nitrogénje nem vesz részt a reakcióban, de a levegő mint gázkeverék egyik összetevőjeként figyelembe kell venni a tüzelőanyag–levegő arány meghatározásánál. Az (1) egyenletben Y -nal jelzett szám a tökéletes égéshez szükséges O_2 -molekulák száma. Mivel a keletkezett égéstermékek összesen 31 oxigénatomot tartalmaznak, így az (1) egyenletben $Y = 15,5$. Az atomtömegek sorrendben szén, hidrogén, oxigén, nitrogén (M_C, M_H, M_O, M_N), segítségével a (2) egyenlettel számítható a keresett tüzelőanyag–levegő arány (f) [7].

$$f = \frac{\dot{m}_{tüza}}{\dot{m}_{levegő}} = \frac{10M_C + 22M_H}{31M_O + 31 \cdot 3,76M_N} = \frac{10 \cdot 12 + 22 \cdot 1}{31 \cdot 16 + 31 \cdot 3,76 \cdot 14} = \frac{142}{2127,8} = 0,0667 \quad (2)$$

A fenti érték reciproka megadja, hogy 1 kg tüzelőanyag elégetéséhez körülbelül 15 kg levegő szükséges. Ugyanakkor sztöchiometrikus égést feltételezve ez kb. 3,1 kg szén-dioxid és 1,4 kg víz(gőz) keletkezésével jár. Hasonlóan elvégezve a számításokat a metánra és a hidrogénre is az 1. táblázatban található eredményeket kapjuk.

1. táblázat
A vizsgált tüzelőanyagok tökéletes égését jellemző adatok [Varga Béla]

Sztöchiometrikus égés	kglev/kgtüza	kgCO ₂ /kgtüza	kgH ₂ O/kgtüza	kgtüza/kglev	Fűtőérték [MJ/kg]
C ₁₀ H ₂₂ (kerozin)	14,985	3,099	1,394	0,0667	43,2171
CH ₄ (metán)	17,160	2,750	2,250	0,0583	50
H ₂ (hidrogén)	34,320	0,000	9,000	0,0291	118,429

Mivel a földgáz döntő része metán (97%), a továbbiakban a földgáz vizsgálatánál a metán égését vizsgáljuk. A 1. táblázatból az is látható, hogy a földgáz mint tüzelőanyag jelentősen kevesebb szén-dioxidot produkál, míg fűtőértéke magasabb, mint a keroziné.

Az égés feltételeinek javításával a fenti égéstermékek mennyisége nem csökkenthető, legfeljebb maga a tüzelőanyag-fogyasztás takarékosabb hajtóművekkel, aerodinamikai szempontból jobb sárkány- és szárny kialakítással, tömegcsökkentéssel, optimálisabb forgalom-szervezéssel. Természetesen az égés nem lesz tökéletes a hajtómű égőterekben, így a fenti két

égésterméken felül egyéb káros anyagok is keletkeznek (2. táblázat). A kénoxidszármazékok alapvetően nem az égőterektől és az égés minőségétől függenek, hanem a finomítás során a tüzelőanyagban maradt kéntartalomtól. A többi káros anyag kibocsátásának mértéke némileg csökkenthető az égőterek és az égés optimalizálásával.

2. táblázat
1 kg kerozin elégetése során keletkezett égéstermékek grammban kifejezve [7]

káros anyag	CO ₂	H ₂ O	NO _x	SO _x	CO	el nem égett tüzelőanyag	korom
g/kg tüzelőanyag	3100	1394	9–15	0,3–0,8	0,2–0,6	0–0,1	0,01–0,05

Az égés során keletkezett káros anyagokat hatásuk szempontjából is ketté kell választani. Egyrészt a közvetlen földközeli környezetszennyezésre, illetve a magaslégtörzi szennyezésre.

A földközeli környezetszennyezés alapvetően a repülőterek közelségében jelentős, és ilyen szempontból a gurulás, a fel- és leszállás, valamint az emelkedés és megközelítés fázisait érinti a repülésnek. Mivel ezek közvetlenül érintették a repülőterek környezetét és ennek megfelelően az ott élő lakosságot és természetet, így ez került elsőnek a figyelem középpontjába és lett a szabályozások tárgya is. Ennek megfelelően az ICAO már az 1960-as évektől törekszik egyre szigorúbb szabályozással ezeknek a szennyező anyagoknak a csökkentésére.

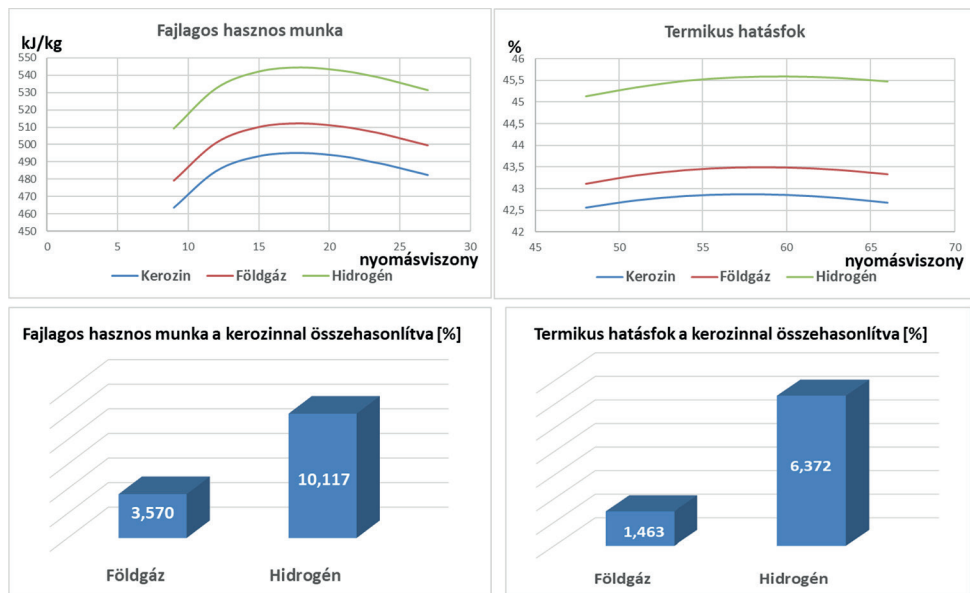
A magaslégtörzi környezetszennyezés nem annyira nyilvánvaló és azonnali hatású, de hosszabb távon következményei súlyosabbak lehetnek, figyelembe véve a globális felmelegedést, a klímaváltozást és az ózonréteg károsodásának már ma is jelen lévő jelenségeit. Az égésnél keletkező vízre mondhatnánk, hogy ez ártalmatlan, hiszen a természetben előforduló, életünk szerves részét képező anyag. Magaslégtörzi kibocsátásának hatása azonban még ma sem tisztázott, de a környezet- és klímavédelmi szakértők számára egyre aggasztóbb a nagy mennyiségű vízgőz sztratoszférába kerülése. A fő „ellenség” azonban a szén-dioxid.

A további vizsgálatok tárgya is ennek megfelelően a szén-dioxid, nevezetesen hogy az esetlegesen alkalmazott alternatív tüzelőanyagok hogyan befolyásolják a szén-dioxid-kibocsátást, illetve a hajtóművek teljesítményparamétereit.

5. Kriogén tüzelőanyagok hatása a hajtómű teljesítményparamétereire

Ebben a részben a három tüzelőanyag hajtóműteljesítmény-paramétereire, nevezetesen a fajlagos hasznos munkára és a termikus hatásfokra gyakorolt hatását vizsgáltuk meg a GasTurb 10 program segítségével. Minden esetben a bázisértéket a kerozinnal kapott adatok adják. Az ehhez képesti %-os eltéréseket ábrázoljuk a két alternatív tüzelőanyag esetében.

Turbina előtti gázhőmérsékletként 1750 K-t adtunk meg, ami meglehetősen magas, de a jelen technológiai viszonyok mellett már nem kiugró. A hatásfokok és veszteségek sorrendben: a kompresszor politrópus hatásfoka: 0,85, az expanzió hatásfoka: 0,88, az égőtér hatásfoka: 0,97, a hajtómű teljes nyomásvesztési tényezője: 0,94, és végül a mechanikai hatásfok: 0,97.



5. ábra

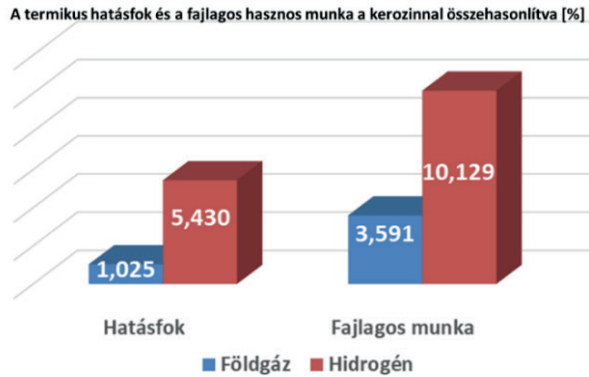
A maximális fajlagos hasznos munka és a maximális termikus hatásfok változása földgáz és hidrogén mint alternatív tüzelőanyagok alkalmazásával [a szerzők]

Megjegyzendő, hogy a gázturbinás (Brayton) körfolyamatok, adott hőmérséklethatárok között és gépegységveszteségek mellett, mind fajlagos hasznos munka, mind pedig termikus hatásfok szempontjából rendelkeznek maximális értékekkel, amelyeket a kompresszor nyomásviszonyával lehet jellemezni [8, p. 41]. A fajlagos hasznos munka és a termikus hatásfok maximumaihoz tartozó nyomásviszonyértékek azonban jelentősen eltérnek egymástól. Ennek megfelelően egyszerre nem produkálható mindkét optimum. A program segítségével meghatározható a maximális fajlagos hasznos munkához, a maximális termikus hatásfokhoz tartozó nyomásviszony, illetve számítható a hozzájuk tartozó fajlagos hasznos munka és termikus hatásfok értékek.

A megkapott eredményeket Excel diagramszerkesztővel szemléltettük. A fajlagos hasznos munka és a termikus hatásfok szerinti optimumok a nyomásviszony függvényében jól kirajzódnak, amit az 5. ábra felső részén láthatunk. Ennek megfelelően a maximális fajlagos hasznos munkához tartozó nyomásviszony körülbelül 17 a maximális termikus hatásfokhoz tartozó nyomásviszony pedig körülbelül 60, illetve ezek értéke nem változik jelentősen az alkalmazott tüzelőanyagok függvényében. Ugyanakkor az aktuális nyomásviszonyok mellett (17 és 60) mind a fajlagos hasznos munka, mind a termikus hatásfok jelentősen nőtt, összehasonlítva a kerozin által produkált értékekkel. Az 5. ábra jobb alsó részén ezek a relatív növekedési értékek leolvashatók sorrendben a földgáz és a hidrogén esetében. Ez például hatásfok szempontjából 0,63%-os, illetve 2,71%-os abszolút hatásfok-növekedést jelentene.

Természetesen egyetlen gázturbinás hajtómű esetén sem várható, hogy a munkapont a két szélsőérték valamelyikére lenne hangolva, hanem valamilyen köztes optimális nyomásviszonyértékre. Ebben a vizsgált esetben ezt a nyomásviszonyt (önkéntesen), 23-as értékre

vettük fel. Természetesen ebben az esetben mind a fajlagos hasznos munka, mind a termikus hatásfok alacsonyabb lesz, mint az 5. ábrán látható maximális értékek. A 6. ábrán erre a nyomásviszonyra vonatkozó változás értékeit látjuk mind a hatásfok, mind pedig a fajlagos hasznos munka százalékos változásának tekintetében.

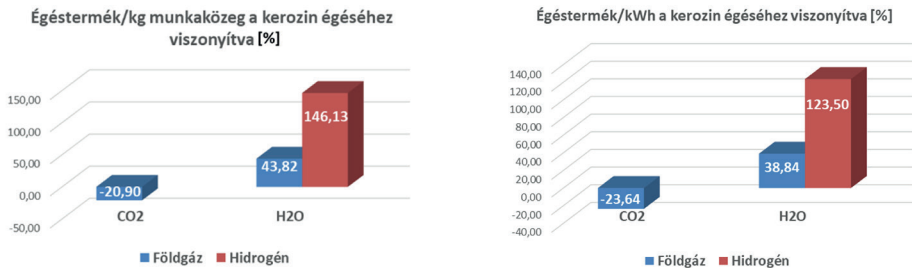


6. ábra

A termikus hatásfok és a fajlagos hasznos munka változása földgáz és hidrogén esetében egy köztes munkapontra (nyomásviszony: 23) [a szerzők]

Ebben az esetben is hasonló eltéréseket tapasztalhatunk a fajlagos hasznos munka esetén, a termikus hatásfok tekintetében viszont kicsit alacsonyabb a növekedés, mint a legjobb hatásfokokhoz tartozó nyomásviszonynál. Ez azonban nem szignifikáns, amiből az következik, hogy mindkét jellemző esetében az értékek javulása a lehetséges üzemi tartományban nem változik jelentősen.

A 7. ábrán a szén-dioxid- és a vízgőzkibocsátás vizsgálata látható 1 kg munkaközegre, illetve 1 kWh hasznos munkára vetítve. A szén-dioxid-kibocsátás csökkenése már a földgáz esetében is nyilvánvaló, értelemszerűen a hidrogén esetében pedig zérus. A vízgőzkibocsátás mindkét esetben nőtt. Még jelentősebb az eltérés, ha a fajlagosítás a kWh egységre történik.

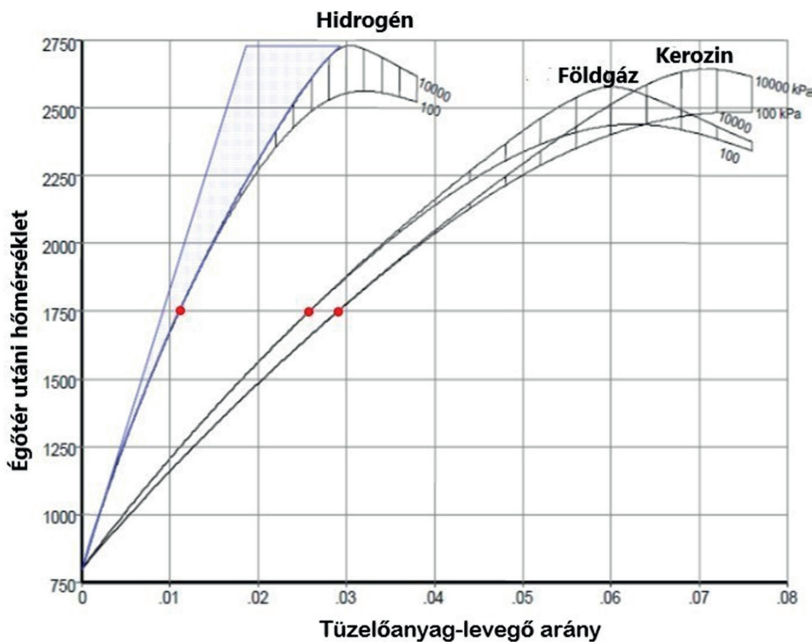


7. ábra

A kibocsátott szén-dioxid és vízgőz mennyiségének %-os változása 1 kg munkaközegre, illetve 1 kWh-ra vetítve [a szerzők]

Mivel rendelkezésre állnak a tüzelőanyag-fogyasztási értékek és a hajtómű levegőfogyasztása minden esetben 1 kg/s, ez egyben a tüzelőanyag–levegő viszony (f) értékét is megadja nekünk. Sorrendben kerozin 0,0286, földgáz 0,0255, hidrogén 0,0109.

A 8. ábrán a NATO Műszaki Csoportja által publikált teljesítmény-előrejelzés és a gázturbinás hajtóművek működésszimulációja tanulmányának egy diagramja látható, ahol 800 K-es égőtérbe belépő levegő-hőmérséklet mellett leolvasható, hogy egyes tüzelőanyagok esetében adott tüzelőanyag–levegő arány (f) mellett milyen kilépő gázhőmérséklet várható [9].



8. ábra

A kilépő gázhőmérséklet egyes tüzelőanyagok esetében adott tüzelőanyag–levegő arány mellett [9]

Mivel a korábban említett 23-as nyomásviszonyt állítottuk be mint bázis munkapontot, amely esetében a kompresszor utáni gázhőmérséklet körülbelül 800 K, valamint feltételeztük az 1750 K-es turbina előtti gázhőmérsékletet, így összehasonlítva a modell által meghatározott tüzelőanyag–levegő arányt és a 8. ábrán megjelölt piros pontokat, jelentős egybeesést látunk, igazolva eredményeink helyességét.

6. Összefoglalás

A cikkben nem vizsgáltuk az adott tüzelőanyagokkal szemben felmerülő egyéb problémákat, amelyek különösen repülőgép-gázturbinák esetében jelentenek súlyos nehézségeket. Ezek például a fedélzeten történő tárolás, illetve a hidrogén esetében a fokozott tűzveszélyesség. Földi gázturbinák esetében ez kevésbé jelent problémát, és számos földi gázturbina üzemel

földgázzal. Tisztán a hajtómű üzemére gyakorolt hatás szempontjából viszont mindkét tüzelőanyag mindkét mutatóra pozitív hatással volt. A hatások szempontjából érdemes a gázturbina részegységeit külön megvizsgálni. A kompresszorban semmi eltérés nem lehet. Mindhárom tüzelőanyag esetében azonos tömegáram sűrítése történt ugyanakkora nyomásviszonnyal, ami ugyanakkora kompresszormunkát igényelt. Az égőtérben ugyanakkora turbina előtti gázhőmérséklet (1750 K) eléréséhez mindkét alternatív tüzelőanyag esetében kevesebb tüzelőanyag szükségeltetett a magasabb fűtőérték miatt, ami a fajlagos fogyasztásértékeket csökkentette. Az azonos turbina előtti gázhőmérséklet, nyomás és tömegáram nem jelenti azt, hogy a továbbiakban mindhárom esetben azonos teljesítményadatokat várhatunk. Ennek oka, hogy ebben a keresztmetszetben a gáz összetétele szignifikánsan eltér egymástól. Már a földgáz esetében is jelentősen magasabb a víz(gőz) és alacsonyabb a szén-dioxid-tartalma az égésterméknek, a hidrogén esetében pedig értelemszerűen nem tartalmaz szén-dioxidot. A magasabb víz(gőz) tartalom magasabb fajlagos hasznos munkát és jobb hatásfokot eredményez. Ugyanakkor az előbbi okból a földgáz esetében is csökken a szén-dioxid-emisszió, a hidrogén esetében pedig zérus.

Felhasznált irodalom

- [1] A. L. Mohd Tobi, A. E. Ismail, „Development in Geared Turbofan Aeroengine,” *2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 131. évf. p. 012019. 2016. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/131/1/012019>
- [2] A. Epstein, *The Pratt & Whitney PurePower® Geared Turbofan™ Engine*. Academie de l’Air et de l’Espace Paris, September, 2015. Online: <https://academieairespace.com/wp-content/uploads/2018/05/prattw.pdf>
- [3] The Open Rotor, The Safran Group’s Engine of the Future, is Tested in Istres. *Invest in Provence*, 2017. október 12. Online: <https://www.investinprovence.com/en/news/open-rotor-safran-group-s-engine-of-future-is-tested-istres>
- [4] A. Seitz, et al., *Concept Validation Study for Fuselage Wake-filling Propulsion Integration*. 2018. Online: <https://www.semanticscholar.org/paper/Concept-validation-study-for-fuselage-wake-filling-Seitz-Peter/363d1667379603f040c5df6ee0482c39a2f1d139>
- [5] F. Yin, *Modelling and Characteristics of a Novel Multi-fuel Hybrid Engine for Future Aircraft*. 2016. Online: https://www.researchgate.net/figure/Intercooled-recuperated-aero-engine-27_fig9_322299242
- [6] F. Yin et al., „Performance Assessment of a Multi-fuel Hybrid Engine for Future Aircraft,” *Aerospace Science and Technology*, 77. évf. pp. 217–227. 2018. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.03.005>
- [7] N. Cumpsty, *Jet Propulsion*. Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
- [8] Varga B., *Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatásfok növelésének műszaki technológiai háttere, és ezek hatása a katonai helikopterek korszerűsítésére*. Doktori értekezés, Budapest, 2013. Online: http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2013/varga_bela.pdf
- [9] Component modelling for system models, Online: <http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/TR/RTO-TR-AVT-036/TR-AVT-036-04.pdf>

Cryogenic Energy Sources for the Commercial Aviation

As a result of the growth of air transport in the past decades (1960–2018), the sector's CO₂ emissions increased from 6.8 million tons to 1,034 million tons. The package of measures aimed to achieve ICAO's global CO₂ reduction goals sets important technological expectations for engine manufacturers as well. Accordingly, manufacturers and their consortia with university research groups and research institutes are feverishly searching for solutions. These researches also cover the possible application of new operating principles, structural solutions, structural materials, and new alternative fuels. The paper was inspired by the concept of the so-called Multi-Fuel Hybrid Engine (MFHE) burning Liquefied Natural Gas (LNG) and kerosene, investigated by Feijia Yin et al. [6], on the other hand, we examined how the use of LNG and LH2 affects the fuel efficiency and expected performance of aircraft engines compared to kerosene.

Keywords: *specific network output, thermal efficiency, alternative fuels, cryogenic fuels, LNG, LH2*

Dr. Varga Béla
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

varga.bela@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-3454-0825

Béla Varga, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer
Training
Department of Aircraft and Engine

varga.bela@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-3454-0825

Dr. Kavás László
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

kavas.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-7375-3527

László Kavás, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer
Training
Department of Aircraft and Engine

kavas.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-7375-3527

Dr. Tóth József
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-Hajtómű Tanszék

toth.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8647-3404

József Tóth, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer
Training
Department of Aircraft and Engine

toth.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8647-3404

Prof. Dr. Óvári Gyula
professor emeritus
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

ovari.gyula@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-8604-5861

Gyula Óvári, CSc
Professor Emeritus
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer
Training
Department of Aircraft and Engine
ovari.gyula@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-8604-5861
