



Varga Béla*

A gázturbinás repülőgép-hajtóművek fejlesztési irányai **IV. rész**

A hajtóműfejlesztésekkel kapcsolatos kihívások

A szerző cikksorozatában bemutatja a propulziós rendszerek működését, a tolóerő keletkezésének összefüggéseit, ezen belül részletesen foglalkozik a gázturbinás propulziós rendszerek típusaival, és szerkezeti kialakításukkal. Tárgyalja a hajtóművek fejlesztésének és – a klímaváltozás miatt is fontos – szén-dioxid-kibocsátás összefüggéseit. Vizsgálja az alternatív tüzelőanyagok alkalmazásának lehetőségét, azoknak a hajtómű termikus hatásfokára és fajtájagos hasznos munkájára kifejtett hatását. A tanulmány negyedik részében a szerző a hajtóművek fejlesztésének lehetőségeit és korlátait, valamint lehetséges irányait mutatja be.

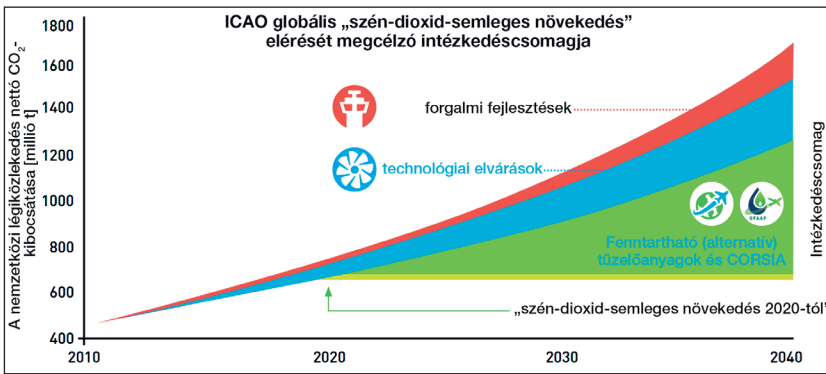
A szénhidrogének tökéletes és tiszta égést feltételező kémiai reakciójából szén-dioxid és vízgőz keletkezik. Ez történik a gázturbinás hajtóművek égőtereiben is a kerozin égésekor, az égés azonban nem tökéletes, így más égéstermékek (a léghőzt szennyező anyagok) is keletkeznek, többek között nitrogén-oxidok, kén-dioxid, szén-monoxid, korom, el nem égett üzemanyag-részecskék és aromás vegyületek. A szennyezőanyagok kibocsátása csökkenthető az égési folyamat optimalizálásával, tökéletesítve az üzemanyag-fúvókákat és magát az égőtereket. Ezek a káros anyagok felelősek a talajközeli légszennyezésért, hiszen keletkezésük alapvetően a gurulás, a fel- és leszállás, valamint az emelkedés és megközelítés repülési fázisok-

hoz köthető. Mivel ez a szennyezés közvetlenül érinti a repülőterek környezetét, az ott élő lakosságot és a természeti környezetet, így ez került elsőnek a figyelem középpontjába, és vált a szabályozások tárgyává. Ennek megfelelően az ICAO (International Civil Aviation Organization – Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) már az 1960-as évektől egyre szigorúbb szabályozással törekszik ezeknek a szennyező anyagoknak a csökkentésére. [37; 243. o.]

A magaslégköri környezetszennyezés nem annyira nyilvánvaló és azonnali hatású, de hosszabb távon következménye súlyosabb lehet, figyelembe véve a globális felmelegedést, a klímaváltozást és az ózonréteg károsodásának már ma is érezhető jelenségeit. A sztöchiometrikus égésnél¹⁴ keletkező vízre mondhatnánk, hogy az ártalmatlan, hiszen a természetben előforduló, életünk szerves részét képező anyag, de magaslégköri kibocsátásának hatása még ma sem tisztázott. A környezet- és klímavédelmi szakértők szerint egyre aggasztóbb a nagy mennyiségű vízgőz sztratoszférába kerülése. A fő „ellenség” ebből a szempontból azonban a szén-dioxid, hiszen minden tonna elégetett repülőgép-tüzelőanyag kb. 3,1 tonna szén-dioxid felszabadulásával jár együtt. [37; 243. o.]

Az emberi tevékenység miatti szén-dioxid-kibocsátás az Európai Bizottság és a Holland Környezetvédelmi Ügy-

* Alezredes (PhD), egyetemi docens, NKE HHK Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék ORCID: 0000-0003-3454-0825



34. ábra. Az ICAO intézkedéscsomagja a nemzetközi repülés fenntarthatóvá tétele érdekében [41]

nökség által 2015-ben kiadott EDGAR-adatbázis¹⁵ alapján 36061,71 millió tonna. [38] Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport (IPCC¹⁶) legfrissebb adatai szerint a belföldi és nemzetközi légi közlekedés az emberi tevékenység által termelt globális szén-dioxid-kibocsátás kb. 2%-át (814 millió tonna) teszi ki, amelyből a nemzetközi légi közlekedés a kibocsátás közelítőleg 1,3 százalékáért felelős. [39] Vannak ennél pesszimistább vélemények is, amelyek szerint a légi közlekedés növekedésének hatására az elmúlt évtizedekben (1960–2018) a CO₂-kibocsátás 6,8 millió tonnáról 1034 millió tonnára nőtt. [40] A károsanyag-kibocsátás növekedésének üteme a légi közlekedésben főként úgy csökkenthető, ha kevesebb tüzelőanyagot égetünk, ez pedig elsősorban a hajtóművek hatásfokának javításával érhető el. További lehetőségek az aerodinamikailag jobb szárny- és törzskialakítás, a súlycsökkentés és a hatékonyabb légiforgalom-szervezés is. A gondok ellenére, az utóbbi évtizedekben jelentős technológiai fejlődés történt a légi közlekedési ágazatban. A ma gyártott légi járművek utaskilométerenkénti tüzelőanyag-fogyasztása mintegy 80%-kal csökkent az 1960-as évekhez viszonyítva. Ebben az eredményben hatalmas, de nem egyedülálló szerepe van a hajtóművek fejlődésének. Az elkövetkezendő évtizedekben a légi járművek tüzelőanyag-hatékonysága még 1-2%-kal javulhat, miközben a légi közlekedési iparág várható 5%-os éves növekedése nagymértékben meghaladja ezt. A két tendencia tükröződik a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet Légiközlekedési Környezetvédelmi Bizottsága (ICAO CAEP – Council’s Committee on Aviation Environmental Protection) környezeti trendértékelésében, amely szerint a nemzetközi légi közlekedés tüzelőanyag-felhasználása a 2010-es szinthez képest 2040-re körülbelül 2,8–3,9-szeresre fog nőni. Sokféle becslés megjelent már e témában, és valamennyiben egyetértés mutatkozik abban, hogy a helyzet több, mint aggasztó.

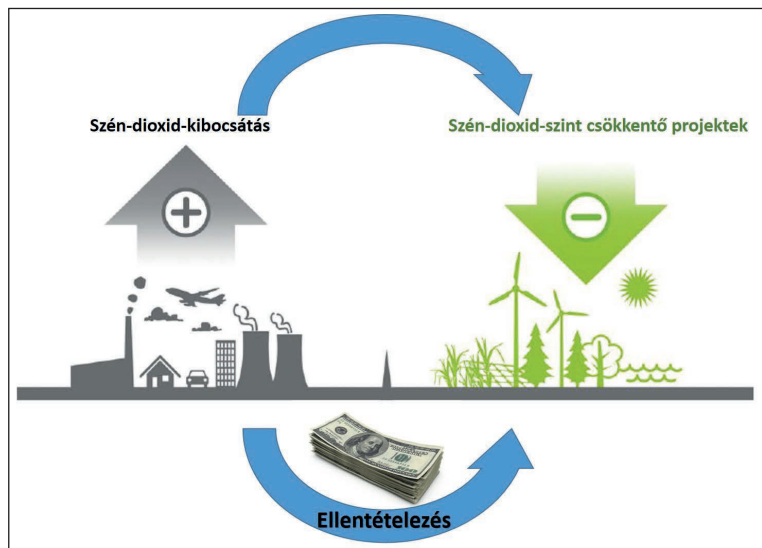
Ennek következtében 2013 októberében az ICAO közgyűlésének 38. ülészsaka elfogadta az A38-18. számú határozatot, amely szerint az ICAO és tagállamai – az érintett szervezetekkel együttműködve – törekszenek arra, hogy elérjék a nemzetközi légi közlekedés globális nettó szén-dioxid-kibocsátás 2020-as szinten történő befagyasztását (az ún. *Szén-dioxid-semleges növekedést 2020-tól*, illetve az eredeti angol kifejezéssel: „Carbon Neutral Growth from 2020”). (34. ábra)

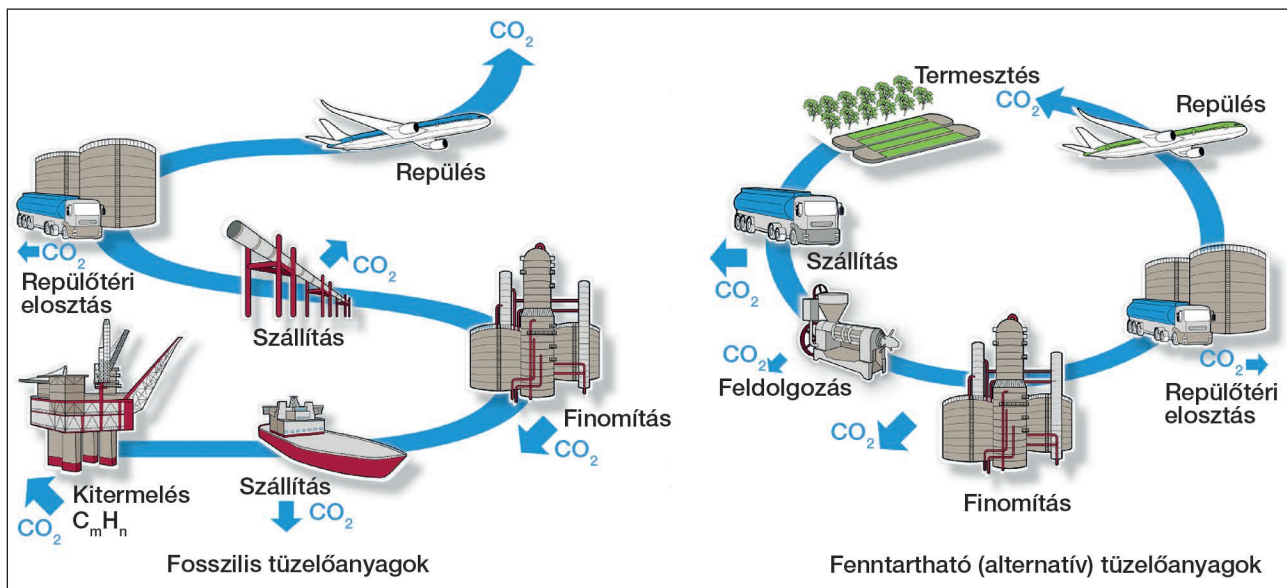
Offsetting and Reduction Scheme of International Aviation – Nemzetközi Légi közlekedés Szén(dioxid) Ellentételezési és Csökkentési Tervezete) elnevezést kapta, amely csak a nemzetközi légi forgalomra, ezen belül is csak a 9000 kg felszállótömeget meghaladó merev szárnyú repülőgépekre vonatkozik.

A projekt elindításának oka, hogy a szakemberek feltételezése szerint az első három intézkedéssel elért összesített környezeti előny sem lesz elegendő ahhoz, hogy a nemzetközi légi közlekedési ágazat 2020 után (a pandémia utáni időszakban) tartani tudja a szén-dioxid-semleges növekedést a forgalom intenzív növekedése miatt. A globális MBM-rendszer a megmaradt rés ellentételezésével, a szén-dioxid-kibocsátást csökkentő, vagy éppen a már kibocsátott szén-dioxidot elnyelő projektek finanszírozásával teszi lehetővé a nettó kibocsátás szinten tartását. (35. ábra)

Az ellentételezés értelmében a repülőgép-üzemeltető (légítársaság) a többlet szén-dioxid kibocsátását a szén-dioxid-piacon (Carbon Market) ún. karbonkrediteket vásárolva kompenzálja. A karbonkrediteket teremtik meg a pénzügyi alapját a világ különböző pontjain létrehozott szén-dioxid-kibocsátást csökkentő projekteknek, amelyek a nemzetközi repülési iparág (Global Airline Industry) nettó szén-dioxid-kibocsátása „remélhetőleg” szinten tartható.

35. ábra. A piaci alapú intézkedések (MBM) lényegét ábrázoló körfolyamat [42]





36. ábra. A hagyományos, és az alternatív tüzelőanyagok életciklusa [42]

Az ICAO igyekezett egy egységes, globális szén-dioxid-ellentételezési rendszert kidolgozni, és ezzel elkerülni az ún. „patchwork” (foltozgatásos) megoldásokat, amely alatt a nemzeti, vagy regionális rendszerben működő szén-dioxid adókat, vagy más ellentételezéseket értik. Ez utóbbiak nem képeznének egységes sztenderdet, ennek megfelelően a megvalósításuk bonyolultabb és költségesebb lenne, ugyanakkor pl. az adók esetében ezek a pénzek nem feltétlenül jelennének meg a szén-dioxid-kibocsátást ténylegesen csökkentő projekteknél. Az egységes intézkedés nemcsak egyszerűbbé teszi a rendszert, hanem csökkenti a piaci torzulás kockázatát is, mivel minden légitársasággal szemben egységes követelményeket támaszt. A CORSIA önmagában nem vezet a repülés fenntartható jövőjéhez, sőt az ICAO ezt átmeneti, szükségmegoldásnak tekinti mindaddig, amíg az intézkedéscsomag első három pontjával is célt lehet elérni. Az elképzelések szerint kb. 2050-től a CORSIA nélkül is szinten tarthatóknak, sőt csökkenőnek kell lennie a szén-dioxid-kibocsátásnak. [39] E cél megvalósításában a legnagyobb szerepet a fenntartható alternatív tüzelőanyagoknak szánják. [43] Erre az időszakra minden bizonnyal azok előállítási költsége versenyképes lesz a fosszilis tüzelőanyagokéval. Az alternatív tüzelőanyagok legfontosabb pozitív tulajdonsága, hogy az életciklusuknak egy része nem szén-dioxid-termelő, hanem éppen ellenkezőleg, szén-dioxid-abszorbeáló, (36. ábra) sőt a gyártási folyamat is környezetkímélő technológiával, megújuló energiaforrások felhasználásával történhet. [44]

Ahogy az előzőekben is láthattuk, a program egyik oszlopa a repülőszervezetek technológiai fejlesztése, beleértve a hajtóművek hatásfokának javítását, amely továbbra is a CO₂-kibocsátás csökkentésének egyik leghatékonyabb eszköze.

LEHETŐSÉGEK ÉS KORLÁTOK A FEJLESZTÉSBEN

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

- a kétáramúsági fok a propulziós hatásfokon keresztül;
- a turbina előtti gázhőmérséklet és a nyomásviszony a termikus hatásfokon keresztül;

- a turbinalapátok kisebb hűtési igénye is a termikus hatásfokot javítja;
- a gépegység-hatásfokok – a termikus hatásfokon keresztül – különböző mértékben;
- anyagtechnológiai és gyártástechnológiai fejlesztések alapvetően a hajtómű tömegén keresztül.

Ha mindezt egy nagy kétáramúsági fokú hajtóművön belül, ezen paraméterek fejlesztésével kívánjuk elérni, akkor meglehetősen korlátozottak a lehetőségeink.

A KÉTÁRAMÚSÁGI FOK¹⁷

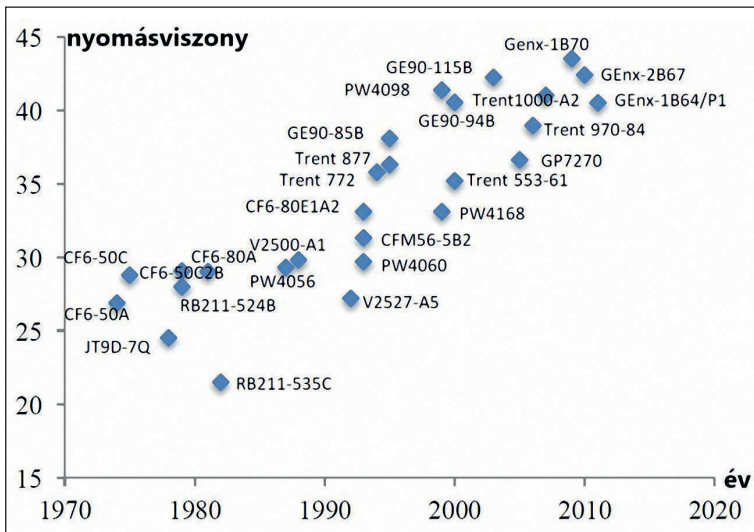
A nagy kétáramúsági fokú hajtóművekben a tolóerő nagy része (80-85%-a) úgy jön létre, hogy a beáramló levegő nagyobb részének a felgyorsítása mérsékelt az egyáramú hajtóművekhez képest, és annál kisebb lehet, minél nagyobb a hajtómű kétáramúsági foka. Ez a propulziós hatásfokon kívül a zajcsökkentés szempontjából is előnyös megoldás. A kétáramúsági fok értéke (pl. CFM LEAP – Leading Edge Aviation Propulsion) elérheti a 12-es értéket is.

A kétáramúsági fok további növelése azonban gondot okozhat, mert növeli a hajtómű átmérőjét – amely még a hajtómű elhelyezésénél is problémát okoz –, nem is beszélve az okozott extra légellenállásról, valamint a szükségszerűen alacsonyabb fordulatszámról, amely a kisnyomású egység fordulatszám-csökkentését is jelenti. Ez – feltételezve a ventilátorfokozat változatlan teljesítményigényét – a turbinafokozatok számának növelését jelenti, hozzájárulva a hajtómű tömegének növekedéséhez is. Ez utóbbi orvosolható fordulatszám-csökkentő egység (reduktor) beépítésével, de ez szintén tömegnövekedéssel jár.

A magasabb kétáramúsági fok a kisebb mag eredményeként is megvalósulhat, amely nagyobb fajlagos hasznos munkát feltételez. A kisebb gázgenerátor-egység méret azonban gyakran kisebb gépegység-hatásfokokat eredményezhet, csökkentve a termikus hatásfokot.

NYOMÁSVISZONY

A teljes kompresszor-nyomásviszony (a nagynyomású kompresszor kilépő és a kisnyomású kompresszor belépő

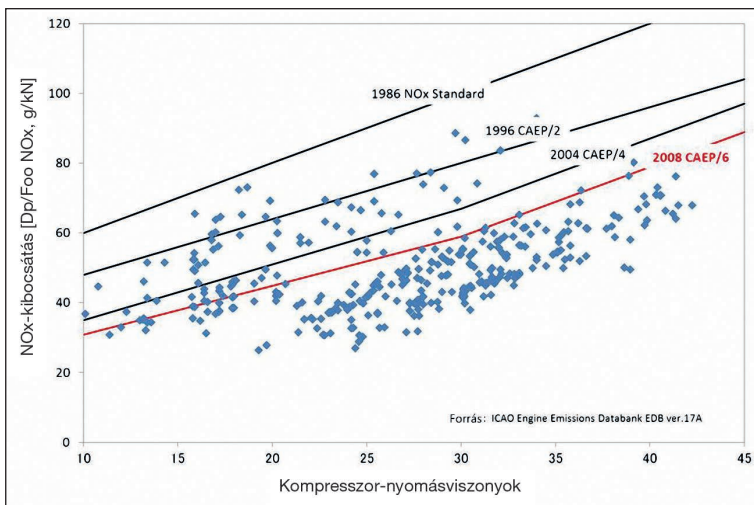


37. ábra. A hajtóművek kompresszor-nyomásviszonyának növekedése [46]

keresztmetszetei nyomásának viszonyyszáma) és a turbina előtti gázhőmérséklet együtt mozog. Önmagában csak az egyik, vagy a másik javítása csupán korlátozott eredményhez vezet. Megfigyelhető, hogy a nagy kétáramúsági fokkal rendelkező hajtóművek kompresszorainak nyomásviszonya évtizedek alatt több mint kétszeresére nőtt. A legújabb hajtóműveknél ez az érték elérte a 45-öt, és az 50 feletti értékek felé tart, valószínűleg hamarosan eléri a 60-at is. (37. ábra)

Ilyen magas értékeknél azonban már a kompresszor kilépő keresztmetszetében mért hőmérséklet is igen magas, 900–1000 K között van. Megjegyzendő, hogy ez az érték közelítően az első gázturbinák turbina előtti hőmérsékletének felel meg. Ez egyrészt felveti a kompresszor utolsó fokozatainak a hőterhelési kérdését. Továbbá, mivel a szükséges nyomáskülönbség miatt az első fokozat turbinalapátjainak hűtéséhez az utolsó kompresszorfokozattól kell hűtőlevet elvenni, így a hűtőlevet mennyiségét növelni kell, rontva ezzel a termikus hatásfokot. További kedvezőtlen hatás, hogy a nyomásviszony növelése csökkenti a hátsó

38. ábra. Az egyre szigorúbb CAEP-szabványok az NO_x-kibocsátás korlátozására. (Dp/Foo NO_x [g/kN]) a kibocsátott szennyező mennyisége grammiban, (Dp) egy szabvány le- és felszállási (landing and take-off (LTO) cycle) ciklusban, elosztva a NEL tengersizten megadott maximális hajtómű-tolóerővel (Foo) [kN]) [47]



fokozatok lapátmagasságát, amely legtöbbször a kompresszor politrópikus hatásfokának csökkenéséhez, és ezáltal szintén a termikus hatásfok csökkenéséhez vezet.

Egy újabb probléma az égés során a megnövekedett nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátása. Ez a szennyeződés nagyon káros hatással van az élővilágra. Számos kutatás bebizonyította, hogy az NO_x kibocsátása arányos a kompresszor kilépő nyomásával és hőmérsékletével. Ezt az összefüggést a különböző CAEP NO_x szabványoknál is figyelembe veszik.

Magasabb kompresszor-nyomásviszonynál (38. ábra) (vízszintes tengely) láthatóan magasabb emissziót engednek meg a szabványok, de ez a magasabb NO_x-kibocsátás csak az égési folyamat optimalizálásával kompenzálható. Egy-egy jelentősebb technikai ugrás az égőterek és a porlasztás fejlesztése terén, jellemzően ugrásszerű csökkenést jelentett az NO_x-kibocsátás tekintetében is. Ugyanakkor jól látható, hogy bármelyik CAEP-előírásnál a

nagyobb kompresszor-nyomásviszony tartományban fokozatosan megengedőbb a szabvány, mert a gyártók technikailag képtelenek lennének teljesíteni a szigorúbb követelményeket.

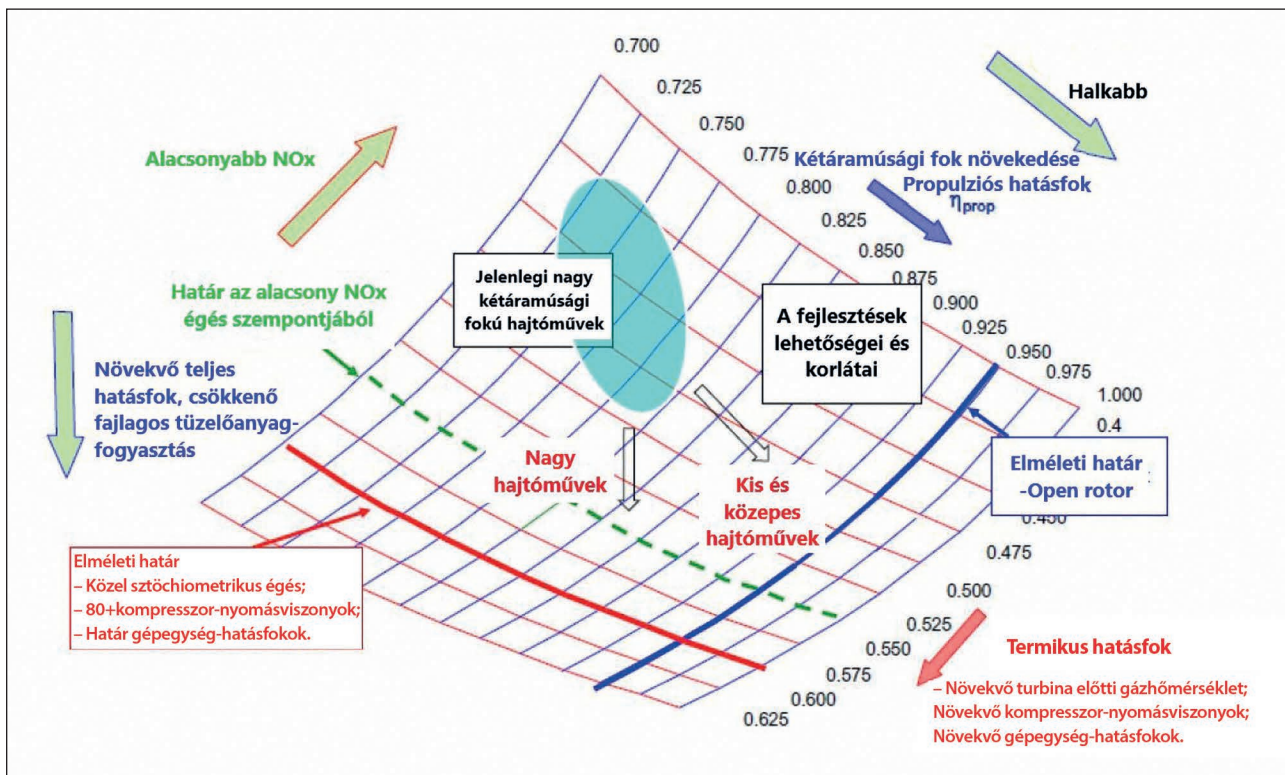
A TURBINA ELŐTTI GÁZHŐMÉRSÉKLET

A hajtómű-gázhőmérséklet a kompresszor-nyomásviszonnyal együtt nő, értékének pedig az anyagok hőállósága szab határt. A hajtóművek technológiai fejlődése során a turbina előtti gázhőmérséklet átlagos növekedése évente mintegy 18 K volt, amely jóval több, mint a turbina alapanyagát képező ötvözetek hőállóságnak növekedése (3 K/év). Ebből következően a turbina előtti gázhőmérséklet növekedése inkább a szofisztikált hűtési rendszerek következménye. A magasabb turbina előtti hőmérséklethez a magasabb kompresszor-nyomásviszony, és az ezzel együtt járó magasabb hőmérsékletű, és emiatt kisebb hatékonyságú hűtés az eredmény egy részét felemészti. A már szintén említett NO_x-kibocsátás negatív hatását is figyelembe véve valószínű, hogy a kereskedelmi repülés hajtóművei esetén az 1800 K-es turbina előtti hőmérsékletnél a tervezők nem törekednek magasabb értékre. Ez nem vonatkozik a katonai repülés kis kétáramúsági fokú hajtóműveire, amelyeknek nem kell megfelelniük ilyen szigorú környezetvédelmi követelményeknek. (39. ábra)

MA LÁTHATÓ HAJTÓMŰFEJLESZTÉSI IRÁNYOK

Tény, hogy az említett megoldások azt mutatják, a hajtóművek fejlesztése közel van a lehetőségek határaihoz. Számtalan kutatás folyik világszerte, hogy ezeken a korlátokon valamilyen innovatív megoldással átlépjének, és minőségi ugrást érjenek el a tüzelőanyag-hatékonyság területén. Az egyik ilyen innovatív kezdeményezés (ULTIMATE)¹⁸ vezetője a göteborgi Chalmers Műszaki Egyetem, míg a konzorcium tagjai a Cranfield Egyetem, a Bauhaus Luftfahrt, az ISAE Supaero, az Aristotle Egyetem Thessaloniki, a svéd GKN Aerospace,





39. ábra. A fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás változása a termikus és propulziós hatások függvényében (Forrás: a szerző szerkesztése a [48] alapján)

az MTU Aero Engines, a Rolls-Royce Holdings plc, a Safran Aircraft Engines és az ARTTIC. Természetesen számos további helyen képzelnek el merész fejlesztéseket a 2050-es évekre, amelyek közül néhányat a következő fejezetekben mutatok be.

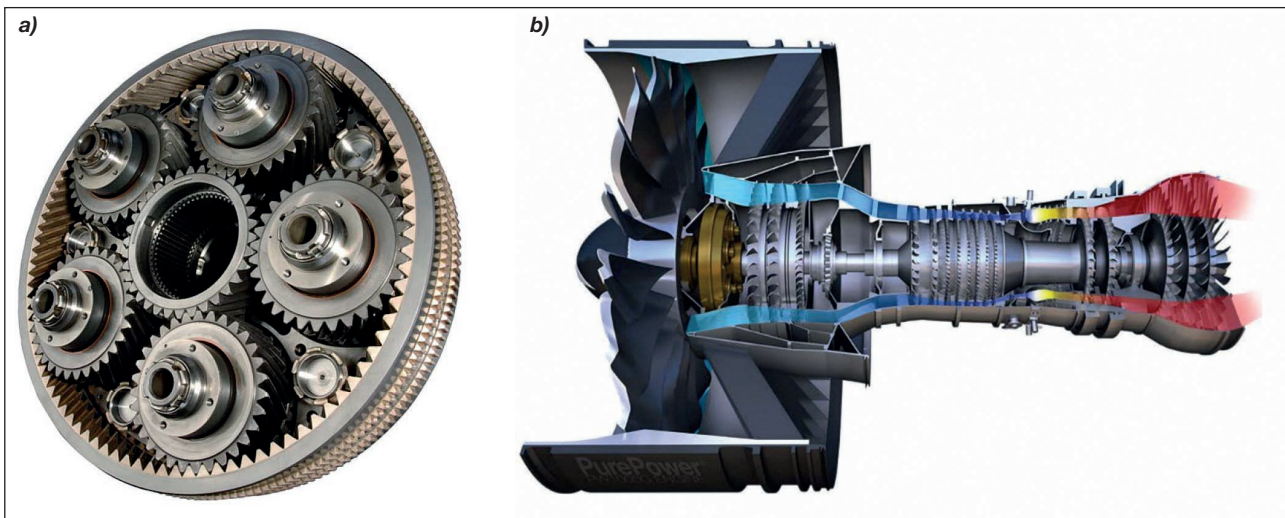
GEARED TURBOFAN¹⁹

A geared turbofan megnevezésű hajtómű mintegy ötven évvel ezelőtt indított, és mára megvalósult koncepció. A fő célja, hogy a kétáramúsági fokot úgy lehessen növelni, hogy (a fan fokozat elkerülhetetlen fordulatszám csökken-

tése mellett) ez ne járjon a kisnyomású forgórész fordulatszám-csökkentésével, és ezzel a kompresszor- és a turbinafokozatok számának növekedésével. Ezekbe a hajtóművekbe egy bolygóműves fordulatszám-csökkentőt építenek be, ezzel lehetővé téve a kisnyomású forgórész magasabb fordulatszámát, és ezzel a kompresszor- és a turbinafokozatok száma nemhogy nem nőtt, hanem csökkenthetett.

1993 nyarán a Pratt & Whitney a NASA²⁰ Ames szélcsatornájában tesztelni kezdte a 240 kN tolóerejű kísérleti hajtóművét 4:1 arányú fordulatszám-csökkentő fokozattal. A hajtómű 3000 mm-es átmérőjű ventilátor (fan) fokozata 18 db állítható lapáttal 15-ös kétáramúsági fokot biztosí-

40. ábra. A fordulatszám-csökkentő egység a) és a Geared turbofan hajtómű metszete b) [45]



tott. A cél a tüzelőanyag-fogyasztás 6-7%-kal, a károsanyag-kibocsátás 15%-kal történő csökkentése volt. Ugyanakkor a ventilátor lapátvégi sebességének 290 m/s-ra mérséklésével a zajkibocsátás csökkentését is megcélózták. A jelentős kihívás a megbízható fordulatszám-csökkentő fokozat létrehozása volt, mivel az mindenképpen plusz tömeget jelent, hő keletkezik, teljesítményvesztést okoz, és élettartam-problémák jelentkezhetnek. Fordulatszám-csökkentést korábban is alkalmaztak turboprop és turboshaft hajtóművek esetében is, de ebben az esetben nem néhány száz, vagy ezer kW átviteléről van szó, hanem 30 000–60 000 kW-ról. A fordulatszám-csökkentő egységek hatásfoka általában meglehetősen magas, 0,98–0,995 határok között mozog. Nagy átviteli teljesítmény mellett azonban a veszteségek így is jelentősek lehetnek, és a berendezés nagyon intenzív kenést, illetve az olajrendszeren keresztül hűtést igényel. A Pratt & Whitney szerint a hajtóművekben alkalmazott fordulatszám-csökkentő hatásfoka 99,5%-os, mindössze 13 fő alkatrészt tartalmaz, és 20 évet működhet karbantartás nélkül. [45] (40. ábra)

Jelenleg kizárólagos hajtóműként a PW1000G nagy kétáramúsági fokú geared turbofan hajtóműcsalád tagjait alkalmazzák az Airbus A220, a Mitsubishi SpaceJet és az Embraer második generációs E-Jet-ekben, illetve opcióként rendelkezésre áll az Irkut MC-21 és Airbus A320neo részre is. A PW1000G hajtómű első rendszerbe állítása 2016 januárjában történt a Lufthansa Airbus A320neo repülőgépein. [49]

A hajtómű – különösen az A320neo repülőgépek erőforrásai szempontjából – jelenleg a CFM LEAP hajtómű legfőbb vetélytársa. Megjegyzendő, hogy a LEAP is nagy előrelépést jelent a CFM 56 sorozathoz képest, hiszen kétáramúsági foka 12, ám nincs áttétel a fan és a kisnyomású forgórész között.

(Folytatjuk)

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [37] Varga Béla, Tóth József. (2017) A széndioxid, mint a legfőbb ellenség, avagy mi az ICAO által létrehozott CORSIA szerepe ebben a harcban Repüléstudományi Közlemények XXIX. 2017/3. pp. 243–252.;
- [38] Emissions Database for Global Atmospheric Research https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg50 (Letöltve: 2022.12.7.);
- [39] Why ICAO decided to develop a global MBM scheme for international aviation? <https://www.icao.int/Meetings/HLM-MBM/Pages/FAQ1.aspx> (Letöltve: 2020.11.13.);
- [40] The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689?via%3Dihub> (Letöltve: 2020.8.2.);
- [41] Forrás: <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/climate-change.aspx> (Letöltve: 2022.12.7.);
- [42] Forrás: <https://www.firstclimate.com/> (Letöltve: 2017.12.23);
- [43] Fehér Krisztina. (2018) Alternatív tüzelőanyagok alkalmazása a repülésben Műszaki Katonai Közöny XXVIII. 2018/2. pp. 43–56. <https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/PDF> (Letöltve: 2022.12.6.);
- [44] Fehér Krisztina. (2018) Biomass as Raw Material of Aircraft Fuels Repüléstudományi Közlemények, XXX. 2018/3. pp. 123–138. http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_3/2018-3-09-0176-Feher_Krisztina.pdf (Letöltve: 2022.12.6.);
- [45] Epstein, Alan. (2015) VP, Technology and Environment Pratt & Whitney Academie de l’Air et de l’Espace Paris p. 26. <https://academieairespace.com/wp-content/uploads/2018/05/prattw.pdf> (Letöltve: 2022.12.6.);
- [46] Feijia, Yin. (2016) Modelling and Characteristics of a Novel Multi-fuel Hybrid Engine for Future Aircraft <https://doi.org/10.4233/uuid:344b7d9c-f54c-4836-87ca-28582231a3d3> https://www.researchgate.net/publication/322299242_Modelling_and_Characteristics_of_a_Novel_Multi-fuel_Hybrid_Engine_for_Future_Aircraft (Letöltve: 2021.1.12.);
- [47] Dr. Dickson, Neil. (2014) Local Air Quality and ICAO Engine Emissions Standards https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2014-Kenya/4-1_LAQ-Technology_notes.pdf (Letöltve: 2021.2.20.);
- [48] Feijia, Yin, Arvind, Gangoli Rao. (2020) A review of gas turbine engine with inter-stage turbine burner Progress in Aerospace Sciences Volume 121. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100695> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037604212030107X>;
- [49] Kaminski-Morrow, David. (2016) Airbus: Delivery of P&W ‘golden’ A320neo engine imminent FlightGlobal 2016.07.27. <https://www.flightglobal.com/airbus-delivery-of-pandw-golden-a320neo-engine-imminent/121346.article> (Letöltve: 2022.12.6.).

JEGYZETEK

- 14 Elméletileg az a helyes tüzelőanyag-levegő arány, ahol a reakció (égés) után egyik anyagból sincs maradvány.
- 15 EDGAR: Emissions Database for Global Atmospheric Research – Emissziós adatbázis a globális légkörkutatáshoz.
- 16 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change – éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport.
- 17 Bővebben: Varga B.: A gázturbinás repülőgép-hajtóművek fejlesztési irányai I. rész Haditechnika LVII. évf. – 2023/1 p. 16. DOI: 10.23713/HT.57.1.03
- 18 ULTIMATE: Ultra Low Emission Technology Innovations for Mid-century Aircraft Turbine Engines – Alacsony károsanyag kibocsátású technológiák az évszázad közepére tervezett repülőgép-gázturbinákhoz.
- 19 Geared turbofan: fordulatszám-csökkentő egységgel (reduktor) ellátott, nagy kétáramúsági fokú hajtómű.
- 20 National Aeronautics and Space Administration – Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal.