

Az alternatív üzemanyagok alkalmazásának logisztikai aspektusai a Magyar Honvédség rendszerében

A légi közlekedési ágazat hatalmas változás előtt áll a most használt fosszilis repülőgép-tüzelőanyagok fenntartható alapanyagokból származó, nem fosszilis hajtóanyagokkal való helyettesítése tekintetében. A repülőgép-hajtóművek és az alternatív tüzelőanyagok kutatása és fejlesztése nagy ugrást ért el az elmúlt időszakban. Ez számos kihívást rejt magában. Nem szabad elfeledkezni az új üzemanyagok jelenlegi logisztikai rendszerbe történő beillesztésének kérdéséről. Bizonyos tüzelőanyagok tárolása, majd felhasználási helyére juttatása és a légi járműbe való betöltése nehézkes vagy még nem megoldott feladat. Dolgozatunkban áttekintjük az alternatív tüzelőanyagok logisztikai kihívásait, és olyan javaslatokat teszünk a Magyar Honvédség repülőgépüzemanyag-ellátó infrastruktúrájának átalakításával kapcsolatban, amelyek elősegíthetik a jelenleginél környezetkímélőbb katonai repülést, a fenntartható hajtóanyagokra való fokozatos átállást. Áttekintjük azokat a logisztikai folyamatokat és infrastrukturális elemeket, amelyek kulcsfontosságúak az alternatív üzemanyagok tárolásában, szállításában és felhasználásában.

Kulcsszavak: alternatív tüzelőanyagok, fenntartható repülés, logisztikai kihívások, infrastruktúra-átalakítás

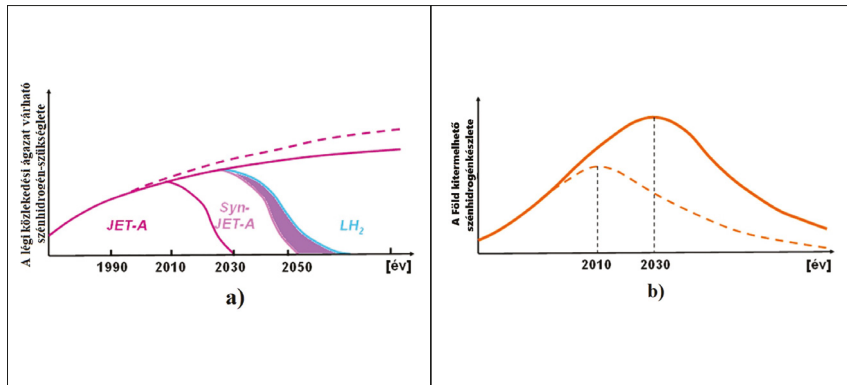
LOGISTICAL ASPECTS OF THE IMPLEMENTATION OF ALTERNATIVE FUELS IN THE HUNGARIAN DEFENCE FORCES

The aviation sector is on the brink of a significant transformation, particularly in replacing the currently used fossil-based aviation fuels with sustainable, non-fossil-derived propellants. Recent research and development in aircraft engines and alternative fuels have made substantial progress, bringing with them a host of challenges. It is essential not to overlook the integration of these new fuels into the existing logistical system. The storage, transportation, and refuelling of certain types of fuels can be challenging tasks that are often not yet fully resolved. In our study, we review the logistical challenges associated with alternative fuels and propose recommendations for transforming the fuel supply infrastructure of the Hungarian Defence Forces. These recommendations aim to facilitate more environmentally friendly military aviation and a gradual transition to sustainable propellants. We will also

examine the logistical processes and infrastructure elements that are crucial for the storage, transportation, and utilization of alternative fuels.

Keywords: alternative fuels, sustainable aviation, logistical challenges, infrastructure transformation

Bevezetés



9.1. ábra. A légi közlekedés energiaigényének és a kitermelhető szénhidrogén mennyiségének predikciója a 21. században

Forrás: ÓVÁRI–SZEGEDI 2010

Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) legfrissebb adatai szerint a légi közlekedés (belföldi és nemzetközi) felel az emberi tevékenység által generált szén-dioxid-kibocsátás 2,5%-áért (840 millió tonna), amely az évszázad közepére meghaladhatja a 3%-ot, de elérheti akár a 20%-ot is, amennyiben az egyéb emissziós források (döntően a hagyományos fosszilis energiahordozókat felhasználó közúti közlekedés) visszaszorulnak, például az elektromos meghajtás tömegessé válásával. Ezzel a repülés lesz a legnagyobb szén-dioxid-kibocsátó gazdasági ág az összes közül.¹ Azonban a repülés környezetkárosító hatása ennél jóval nagyobb mértékű, hiszen a repülőgépek általános üzemelési magasságán, a sztratoszféra határán már minimális a függőleges irányú légmozgás, így a hajtóművekből távozó szennyező

¹ Sections 2023.

anyagok (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, szén-monoxid) évtizedekig megmaradhatnak, akkumulálódnak, és megkötő közeg hiányában hatásuk sokszorozódik.²

Jelenlegi vélemények szerint 2030-at követően a Föld kitermelhető szén-hidrogénkészlete fokozatosan és véglegesen csökkenni kezd [9.1/b) ábra], miközben az iránta való igények folyamatosan tovább növekednek. Ezáltal – a fenntartható fejlődés érdekében – elengedhetetlen gondoskodni ennek a megbízható pótlásáról, illetve kiváltásáról. A fokozatos átállás a tüzelőanyagok árának drasztikus növekedése miatti gazdaságossági megfontolásokból adódóan is egyre sürgetőbb mind a civil szféra, mind a Magyar Honvédség számára.

Néhány elsődleges tudnivaló a jelenleginél környezetkímélőbb repülések megvalósíthatóságáról

A lehetséges megoldások között jelenleg a legígéretesebbek az olyan új meghajtási technológiák, mint például az akkumulátoros, a hibrid-elektromos vagy a hidrogén-meghajtás, valamint a fenntartható alternatív üzemanyagok alkalmazásával történő repülés. A megújuló energiával tölthető akkumulátoros elektromos repülőgépek az azal az előnnyel rendelkeznek, hogy repülés közben nincs károsanyag-kibocsátásuk és igen alacsony az üzemelési zajszintjük. Azonban a jelenleg rendelkezésre álló akkumulátorok korlátozott kapacitása miatt hatótávolságuk, repülési idejük jóval kisebb a fosszilis eredetű tüzelőanyagokat alkalmazó repülőeszközökénél. Ennélfogva alkalmazhatóságuk egyelőre a kisgépes kategóriában valósul meg, például pilóta nélküli repülőgépek (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*), kiképző-, oktató- és sportrepülőgépek esetén. Az eddig érdemben megismerhető fejlesztések, vizsgálatok azt mutatták, hogy az akkumulátoros elektromos meghajtás a belátható jövőben nem lesz méretezhető nagyobb repülőgépekre és hosszabb repülési hatótávokra az energiatároló berendezések kis teljesítménye, alacsony energiasűrűsége, valamint a használatból adódó folyamatos kapacitáscsökkenés miatt.³

A folyékony hidrogén mint alternatív meghajtás hosszú távon megfelelő alternatívát jelenthetne számos előnyös tulajdonsága miatt:

- nagy energiasűrűség, égéshője a kerozinénak a háromszorosa;
- 0,36 kg hidrogén elégetésével annyi energia szabadítható fel, mint amennyi 1 kg kerozin használatával keletkezne;

² ÓVÁRI-FEHÉR 2020.

³ SZEGEDI-ÓVÁRI 2010.

- égése során nincs CO₂- vagy más károsanyag-kibocsátás;
- üzemanyagcellákkal és elektromos motorokkal is alkalmazható;
- stabil égés;
- megújuló energiaforrásokkal előállítható.⁴

A hidrogén tüzelőanyaggal kapcsolatos legfontosabb logisztikai kihívások

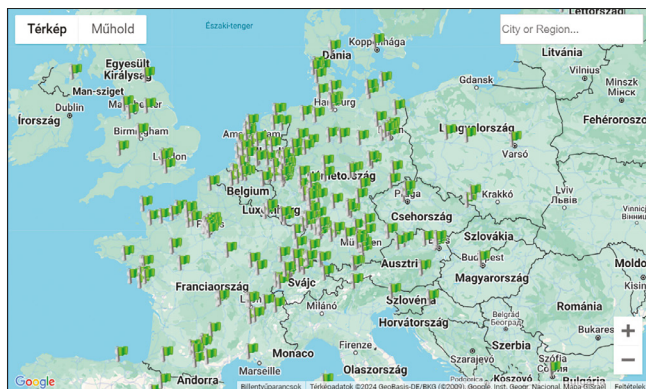
A hidrogén tüzelőanyagként való felhasználásának kutatása és fejlesztése napjainkban is folyik, azonban ez jelentős infrastrukturális átalakítást igényelne, illetve a technológia még nem kellőképpen kiforrott. Sűrűsége csupán $\frac{1}{11}$ – $\frac{1}{12}$ -e a kerozinénak, így egységnyi, a kerozinével megegyező energia tárolásához megközelítőleg 3,7-szeres tartálytérfogat szükséges. A tárolás gazdaságossága, a hajtóműbe történő precíz adagolás szükségessége miatt vagy cseppfolyósított (kriogén) állapotban, vagy magas nyomású gáz formájában célszerű alkalmazni. Előbbi esetben rendkívül alacsony forráspontja (-253 °C és -262 °C között) miatt folyamatos hűtést, második esetben pedig a 850 bar nyomásból adódó szilárdsági megfontolások miatt hengeres vagy gömbkialakítású fedélzeti tartályokat igényel. A töltő-leszívó berendezés hermetikusan és hőszigetelten csatlakozik a repülőgéphez. Az összekapcsolás előtt a tüzelőanyag-rendszer héliummal történő átfúvatása szükséges, a levegő (O₂) bekerülésének megakadályozása céljából. Amennyiben a gép hosszabb ideig tartózkodik az állóhelyen, a cseppfolyós H₂ gyors felmelegedésének megakadályozására vákuumszivattyúval a gázneművé vált felmelegedett hidrogént elszívják, és helyére hűtöttet vezetnek.⁵

A hazai hidrogénüzemű repülés fejlesztésének és alkalmazásának nem elhanyagolható logisztikai hiányossága, hogy a töltőkutak száma Közép- és Kelet-Európában jelenleg igen limitált (9.2. ábra). Azonban a hidrogén-üzemanyag alkalmazására vonatkozó jelenleg is folyó *NATO Science and Technology Organization* (STO) és *European Defence Agency* (EDA) -kutatások mellett előtérbe került egy európai együttműködés a hidrogén-infrastruktúra polgári és katonai kiépítésének megkezdésére, amelynek hazai megvalósítása is elkerülhetetlen.

Mivel ez az átállás évtizedeket fog felölelni, ez alatt az idő alatt feltételezhetően a hagyományos üzemanyaggal működő és a hidrogénüzemű légi járművek

⁴ BÉKÉSI–SÁRI 2021.

⁵ SZEGEDI–ÓVÁRI 2010.



9.2. ábra. Hidrogén-üzemanyagtöltő állomások Európában (2024. augusztus)

Forrás: H2Stations [é. n.]

egy időben is repülni fognak. Ennek megfelelően az infrastruktúra megkettőzésére lenne szükség a két merőben különböző hajtóanyagtípus miatt. A szállítási forgatókönyveket illetően megállapítható, hogy a sűrített vagy kriogén hidrogén teherautóval történő szállítása optimális lehet rövid távolságokra és kis mennyiség esetén. Ebben az esetben nincs szükség helyhez kötött üzemanyag-tárolásra a repülőtérre – a tankolás közvetlenül a mozgatható tárolóegységekből történne, amelyekkel a hidrogént a repülőtérre szállították. Ezzel szemben nagy távolságokra a csővezetékén történő szállítás a legjobb megoldás. Mindkét esetben nagyon fontos a tárolóegységek megfelelő szigeteléssel való ellátása, ugyanis a hőelnyelés következtében a hidrogén gyorsan tágul, így fokozott szivárgás- és robbanásveszély áll fenn. Ebből adódóan elengedhetetlen az olyan speciális tartályok fejlesztése, amelyek tartósan képesek a hidrogén cseppfolyós állapotának fenntartására⁶ (9.3. ábra).

A 9.1/a) ábrán látható, hogy az LH₂ (folyékony hidrogén) tüzelőanyag tömeges elterjedése majd csak a század második harmadára becsülhető. Amíg a folyékony hidrogén tüzelőanyagként való alkalmazásának technológiája el nem éri a megfelelő fejlettségi szintet, más alternatívák kifejlesztésére van szükség.

A jelenlegi piackutatások megalapozott előrejelzései szerint a 2050-es évekre csak az európai légi forgalom várhatóan megháromszorozódik, de világviszonylatban is hasonló növekedés feltételezhető.

⁶ MARKSEL et al. 2020.

Ahhoz, hogy ezek az új típusú hajtóanyagok beilleszthetők legyenek a Magyar Honvédség logisztikai rendszerébe, elengedhetetlen a rendelkezésre álló alternatívák fizikai és kémiai tulajdonságainak megismerése.

A Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (*The International Civil Aviation Organization, ICAO*) ezenkívül különbséget tesz az alternatív repülőgép-üzemanyagok (*Alternative Aviation Fuel, AAF*), valamint a fenntartható repülőgép-üzemanyagok (*Sustainable Aviation Fuel, SAF*) között. Az AAF-eket kőolajtól eltérő forrásokból állítják elő (szén, földgáz, biomassza, hidrogénezett zsírok és olajok). A SAF-ok olyan AAF-ek, amelyek megfelelnek a fenntarthatósági kritériumoknak. A nemzetközi légi közlekedés szén-dioxid-kiegyenlítési és -csökkentési rendszerének (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA*) meghatározása szerint a SAF-nak legalább 10%-os karbonlábnyom-csökkenést kell elérnie a fosszilis tüzelőanyagok 89 g CO₂e/MJ-os értékéhez képest.⁸

Az alternatív tüzelőanyagok főbb típusai

A hagyományos gázturbinás hajtómű-üzemanyagok szénhidrogének keverékei, amelyek legfőképpen paraffinokat, izoparaffinokat, cikloparaffinokat és aromás vegyületeket tartalmaznak. Ezeket a kőolaj desztillációjával vagy krakkolással állítják elő.⁹

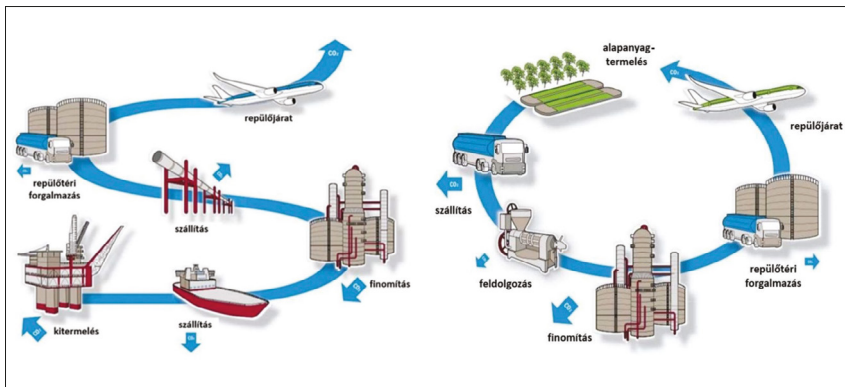
Ehhez jelenthetnek potenciális alternatívát a bio- és a szintetikus tüzelőanyagok, amelyeket nem lehet egymástól teljesen elkülönítve kezelni, hiszen alapanyagaikban, illetve előállítási technológiájukban is átfedések vannak (9.1. táblázat).

A bioüzemanyagok alapjául szolgáló biomassza anaerob bomlás eredményeként jön létre mezőgazdasági növényekből, ipari, illetve kommunális hulladékokból. Alapanyaguk eredete, származása, termőterülete alapján vagy az előállítási technológiai generációk szerint (első, második, harmadik, negyedik) kategorizálhatók. Az első generációs bioüzemanyagok élelmezésre is alkalmas növényekből származnak, mint például a kukorica, a burgonya vagy a napraforgó. A második generációs bioüzemanyag kiindulópontját olyan növények és szerves hulladékok biztosítják, amelyek se emberi élelmezésre, se állati takarmányozásra nem megfelelők, azonban a termesztés ebben az esetben is olyan termőföldön történik, ahol emberi fogyasztásra alkalmas növények is megélnék.¹⁰ A harmadik generáció fő

⁸ PECHSTEIN–ZSCHOCKE 2018.

⁹ SAMIMI 2012.

¹⁰ NAIK et al. 2010.



9.4. ábra. A hagyományos tüzelőanyag (balra) és SAF (jobbra) szén-dioxid-kibocsátása életciklusa során

Forrás: CABRERA – DE SOUSA 2022

alapanyaga a különböző mikro- és makroalgák, amelyek termesztéséhez nyílt vízi medencéket vagy fotobioreaktorokat alkalmaznak. A negyedik generációs bioüzemanyagok, más néven elektro- vagy fotobiológiai üzemanyagok esetén pedig a génmódosított mikroalgák mellett élesztőgombák és cianobaktériumok által szén-dioxidból előállított vegyületek szolgálnak alapanyagként.¹¹ Hosszú távon a bioüzemanyagok bizonyos tekintetben prioritást élveznek más alternatívákkal szemben, mivel előállításuk technológiai szempontból a legkevésbé terheli a környezetet, illetve a szén-dioxid-kibocsátás az életciklus során jelentősen csökkenthető, mivel a szén-dioxid egy részét a következő generációs növények újra felhasználják. A 9.4. ábra az életciklus-kibocsátás területén értelmezhető különbözőséget mutatja a fosszilis alapú repülőgép-üzemanyag és a bio SAF között. Azonban az alapanyagok elérhetősége korlátozott lehet, potenciálisan versenyhelyeztetel járhat és etikai kérdések is felmerülhetnek a termőföldek más célra történő felhasználhatósága miatt.¹²

A jelenleg alkalmazott repülőgép-hajtóanyagok kiváltási lehetőségét jelenthetik még a jövőben a hidrogénezési eljárással előállított megújuló üzemanyagok (*Hydroprocessed Renewable Jet Fuel, HRJ*) vagy más néven hidrogénezett észterek és zsírsavak (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acid, HEFA*). Ezeket használt sűrűsítékből, növényi olajból és állati faggyúból állítják elő, melléktermékként

¹¹ CHOWDHURY–LOGANATHAN 2019.

¹² FEHÉR–ÓVÁRI 2017.

pedig víz és propángáz keletkezik. A hajtóműben nem okoznak korróziót, viszont magasabb paraffinértékük rontja a dermedési pontjukat, amelynek értéke nagyban függ attól, hogy milyen alapanyagból készítik ezt az üzemanyagot. Emellett a kén és az oxigén hiánya miatt kenési tulajdonságaik is elmaradnak a kerozinétól.¹³

A másik nagyobb csoportot a szintetikus üzemanyagok alkotják, amelyek csak az ipari folyamatokból származó vagy közvetlenül a levegőből kinyert szén-dioxid és hidrogén előállításához és szintéziséhez igényelnek energiát. Alapanyaguk szerint megkülönböztetünk szén (*Coal-To-Liquids, CTL*), földgáz (*Gas-To-Liquids, GTL*) és biomassza (*Biomass To Liquid, BTL*) feldolgozásával létrehozható hajtóanyagokat. Ezek kiváló *drop-in* üzemanyagok lennének mind a légi járművek, mind a gépjárművek számára. Azonban a létrehozásukhoz szükséges Fischer–Tropsch-eljárás továbbra is az energiahatékonyság, a környezeti hatások és a gazdasági megvalósíthatóság bizonytalanságával néz szembe, hiszen az előállítási folyamatok vízfelhasználása és szén-dioxid-kibocsátása igen magas. Illetve a CTL- és GTL-üzemanyagok nem karbonsemlegesek és nem megújuló alapanyagból állíthatók elő.¹⁴

Alapvető szabványok az alternatív tüzelőanyagok nemzetközi minőség- és kompatibilitásbiztosítása érdekében

Ahhoz, hogy a hajtóanyag hivatalosan felhasználható legyen repülőeszközök működtetéséhez, szigorú kritériumrendszernek kell megfelelnie. Ezeket az elengedhetetlen minőségi jellemzőket nemzetközi szabványok és előírások határozzák meg, amelyek hiányában a biztonságos felhasználás nem történhet meg. Ennek megfelelően a nemzeti szinten a petróleumalapú üzemanyagok minőségének biztosítására megalkotott és elfogadott előírások alapját képezi az ASTM (az Egyesült Államok szabványügyi testülete) D1655 Szabvány a repülésben használatos tüzelőanyagok specifikációiról, a *UK MOD Defence Standard 91-91 AVTUR* (az Egyesült Királyság védelmi minisztériumi szabványa), illetve a *MIL-DTL-83133*. Ezek a specifikációk mind nagyon hasonlóak, mivel lényegében ugyanazt az anyagot írják le. Például az ASTM D1655 és a Def Stan 91-91 szinte azonos követelményeket támaszt a Jet A-1-re: a körülbelül harminc vizsgálati kritérium közül csak két kisebb eltérés van a vizsgálati határértékekben (a savasságszint és egy naftalintartalomhoz kapcsolódó kritérium). A tüzelőanyagok megfelelő minőségét

¹³ AIRportal.hu 2024b.

¹⁴ ÓVÁRI–SZEGEDI 2010.

és specifikációit a repülőeszköz és a hajtómű típusstanúsítványa, valamint a helyi előírások határozzák meg, bár a leggyakrabban a fentebb felsorolt szabványokat idézik. Ezt kiegészítendő 2009-ben kiadták az ASTM D7566 Szintetizált szénhidrogéneket tartalmazó repülőgép-üzemanyagokra vonatkozó szabványt. Erre azért volt szükség, mert az alternatív üzemanyagok esetében szigorúbb kritériumokat kellett megállapítani a növényi olajok, a biomassa vagy a szén folyékony üzemanyaggá történő átalakításához szükséges új eljárási technikákkal kapcsolatos tapasztalatok hiánya miatt.

A Magyar Honvédség egyrészt az európai uniós tagság okán, másrészt NATO-tagságából eredően az európai NATO-szabványokat köteles alkalmazni. A gázturbinás légi járművek hajtóanyaga, azaz a Jet A-1 minőségi követelményeit, vizsgálati módszereit a 2012 novemberében kiadott MSZ 10870:2012 magyar szabvány tartalmazza. NATO-kódja: F-35; katonai azonosítója: JP-1A. A katonai repülésben a JP 8 típusú hajtóanyagot használják, ennek NATO-kódja F-34. A kettő annyiban tér el egymástól, hogy a JP 8 több adalékanyagot tartalmaz (jegesedésgátló, korróziógátló, kenőképeség-javító, villamos vezetést javító), ezáltal szélesebb körben, zordabb időjárási viszonyok között is alkalmazható. Az üzemeltetés során használt üzemanyag elsődlegesen az energia forrását jelenti, de biztosítja a berendezések kenését is. Az égőtérben az égés során felszabaduló kémiai energiát a turbina mechanikai munkává, a fűvócső pedig kinetikai energiává alakítja át.¹⁵

A D7566 szabványban közzétett mellékletek a jelenlegi légijármű-üzemeltetési célra elfogadott alternatív tüzelőanyag-féleségeket tartalmazzák, amelyeket az eredeti specifikáció 2009-es kiadása óta időszakosan adtak hozzá (9.1. táblázat). Minden egyes melléklet kibocsátását szigorú tesztelési program előzte meg. Ezek tartalmazzák az előállítási folyamat, a kiindulási alapanyag és az így előállított alternatív üzemanyag összetételének leírását, valamint azokat a követelményeket, amelyeknek meg kell felelniük.

A „paraffin” megnevezés arra utal, hogy ezek a szintetikus repülőgép-üzemanyagok nem tartalmaznak aromás anyagokat, hanem elsősorban telített vegyületeket (alkánokat). Sajnos a feldolgozás egyik részfolyamata során az aromás vegyületeket teljes mértékben kivonják. Ezek hiánya az üzemanyagrendszerben található tömítések elégtelen mértékű térfogatduzzadásához vagy megkeményedéséhez vezet, aminek a következménye üzemanyag-szivárgás lehet. Az ilyen eljárással létrehozott üzemanyagoknak adalékoláson kell átesniük legfeljebb 50%-os arányban hagyományos Jet A-1 üzemanyaggal, hogy a keverék elérje a minimálisan szükséges,

¹⁵ Kovács 2017.

9.1. táblázat. A SAF-ok fajtái és előállítási módjai

Előállítás módja	Alapanyag	Maximális keverési arány	A jóváhagyás dátuma
<i>Fischer–Tropsch-féle szintetikus paraffinos kerozin (FT-SPK)</i>	biomassza (erdészeti maradványok, szilárd városi és mezőgazdasági hulladék), szén, földgáz	50%	2009
<i>Fischer–Tropsch-féle szintetikus aromás kerozin (FT-SPKA)</i>	megújuló biomassza (erdészeti maradványok, energianövények, mezőgazdasági és városi szilárd hulladék), szén, földgáz	50%	2015
<i>Hidrogénezett észterekből és zsírsavakból előállított szintetikus paraffinos kerozin (HEFA-SPK)</i>	növényi olajok (<i>jatropha</i> , <i>camelina</i> , algák), állati zsírok	50%	2011
<i>Hidrogénezett szénhidrogének (HHC-SPK vagy HC-HEFA)</i>	<i>Botryococcus braunii</i> alga	10%	2020
<i>Hidrogénezett fermentált cukorból származó szintetikus izoparaffin (HFS-SIP)</i>	mikrobiális módszerrel szénhidrogénné átalakított cukrok	10%	2014
<i>Alkoholból előállított szintetikus paraffinos kerozin (ATJ-SPK)</i>	mezőgazdasági hulladékokból, melléktermékekből (erdészeti fahulladék, szalma, fű) előállított alkoholok (izobutanol, etanol)	50%	2016
<i>Katalitikus hidrotermolízissel előállított szintetikus kerozin (CH-SK vagy CHJ)</i>	növényi olajok (<i>jatropha</i> , <i>camelina</i> , algák), állati zsírok	10%	2020

Forrás: CABRERA – DE SOUSA 2022

körülbelül 8%-os aromás szintet. A másik lehetőség a jelenleg nagyobb arányban alkalmazott nitril-kaucsuk (N0602) -tömítések jobb minőségű, ilyen összetevőt nem igénylő, fluor-szilikon (L1120) vagy fluorocarbon (V0835) tömítésekre való cseréje, amelyek térfogatváltozása minimális összefüggést mutat az aromás tartalommal. A másik probléma a kénvegyületek hiánya, amelyek a tüzelőanyag-rendszer mozgó alkatrészeinek kenéséhez lennének szükségesek. Emellett a magas paraffintartalom okozta magas dermedéspontjuk miatt szivattyúzhatóságuk és porlaszthatóságuk sem megfelelő, ami szintén további adalékolással oldható meg.¹⁶

Az FT-SPKA ugyanazon a Fischer–Tropsch-szintézisen esik át, de kiegészül könnyű aromás vegyületek, főként benzol alkilezésével. Ennek köszönhetően a

¹⁶ VARGA–ÓVÁRI–FEHÉR 2021.

végtermék tartalmaz aromás vegyületeket, ami növeli a kompatibilitását a jelenlegi hajtóművekkel. Bár ez a típus is – tapasztalatgyűjtés céljából – legfeljebb 50%-os keverési arányban alkalmazható, de nagy esély van rá, hogy a jövőben ez az arány növelhető lesz, és akár 100%-os helyettesítésre is alkalmasnak minősítik majd.¹⁷

Hasonló elővigyázatosság figyelhető meg a CHJ esetében is, hiszen ennek összetétele megegyezik a kőolajból származó Jet A üzemanyaggal, így nincsenek olyan tulajdonsági korlátozások, amelyek miatt szükség lenne kerozinnal való hígításra. Azonban 50%-os maximális keverési határt szabtak meg, hogy lehetőséget adjanak az üzemeltetési tapasztalatok felhalmozódására, mielőtt engedélyeznék az önálló alkalmazást.

Az előzőkkel ellentétben a HFS-SIP egyetlenegy típusú szénhidrogén-vegyületből áll, amelyet farnesánnak (2,6,10-trimetildodekán) neveznek. A kőolajból származó repülőgép-üzemanyagok 8–16 szénatomot tartalmazó szénhidrogének széles skáláját ölelik fel, ezáltal stabil égést biztosítanak különböző működési körülményei között. Ezzel szemben a farnesán kizárólag 15 szénatomos molekulát tartalmaz, ezáltal viszkozitása rendkívül nagy. Tesztek során kiderült, hogy a hagyományos repülőgép-üzemanyaggal 20%-ban kevert HFS-SIP áramlási tulajdonságai problémákat okoztak a segédhajtómű (*Auxiliary Power Unit, APU*) indítása során nagy magasságban, alacsony külső hőmérséklet esetén. Annak érdekében, hogy elkerüljék az üzemanyag túlzott telítettségét egyetlen szénhidrogéntípussal, keverési koncentrációját 10%-ra korlátozták.¹⁸

Logisztikai aspektusok, szállítás és tárolás

A Magyar Honvédségben alkalmazott üzemanyagok nagy részének beszerzése, így a keroziné is a MOL Nyrt.-től történik. Azonban jelenleg az ASTM D7566 szabványnak megfelelő üzemanyagot még nem forgalmaz, ennél fogva a beszállítást más vállalatok segítségével kell megoldani.

Figyelemre méltó alternatíva a Neste, egy finnországi székhelyű, 1948-ban alakult vállalat, amely élen jár a megújuló üzemanyagok és a fenntartható megoldások terén.¹⁹ A Neste jelenlegi éves HEFA-alapanyagú fenntartható repülőgépüzemanyag-kapacitása megközelítőleg évi 1,5 millió tonna. A Neste SAF több nagy repülőtéren is elérhető, beleértve a San Franciscó-i nemzetközi repülőtér, a Heathrow repülőtér

¹⁷ CABRERA – DE SOUSA 2022.

¹⁸ RUMIZEN 2017.

¹⁹ Neste [é. n.].

és a frankfurti repülőtér. Jelenleg számos vezető légitársaság, köztük a KLM, a Lufthansa, a Delta és az American Airlines is ezt az üzemanyagot használja.²⁰

Egy másik globális úttörő az alternatív repülőgép-üzemanyagok szektorában a SkyNRG. Ez az amerikai vállalat több mint 30 légitársaságot lát el fenntartható repülőgép-tüzelőanyaggal több kontinensen. 2021-ben a SkyNRG partneri szerződést kötött a Boeinggel, hogy globálisan növeljék a SAF-ok felhasználását. Érdeemes megemlíteni még a LanzaTech amerikai biotechnológiai vállalatot is, amelynek fő profilja az alkoholból előállított üzemanyagok (*Alcohol-To-Jet, ATJ*) gyártása. Ezzel a technológiával a vállalat képes bioüzemanyagot gyártani a szénelapú hulladékokból, mint például az acélgyártás során keletkező gázokból és más hulladékforrásokból.²¹ Emellett az Uniper energiaszolgáltató, a Siemens Energy, az Airbus repülőgépgyártó és a Sasol ecoFT vegyipari és energetikai vállalat együttműködik a németországi *Green Fuels Hamburg* projekt megvalósításában. A tervek szerint a létesítmény 2026-tól kezdve évi legalább 10 ezer tonna SAF-ot fog előállítani az első fázisban.²² Az említetteken kívül azonban még számos más cég is képviselteti magát ezen a területen, ebből adódóan több lehetőségünk is van az alternatív üzemanyagok ellátási problémájának megoldására.

A kerozin a tárolólétesítményekből vagy közvetlenül, vagy a hetényegyházai MH Anyagellátó Raktárbázis laboratóriumának közvetítésével kerül a felhasználási helyre, azaz Kecskemétre, az MH vitéz Szentgyörgyi Dezső 101. Repülődandárhoz, Szolnokra az MH Kiss József 86. Helikopterandárhoz és Pápára az MH 47 Bázisrepülőtérre. Szolnokra közúton, Pápára vasúton vagy közúton, a kecskeméti bázisra pedig vasúton, közúton, illetve csővezetéken – a vezetőképesség-csökkentő kivételével még adalékanyag-mentesen – érkezik az üzemanyag, amelyet aztán a helyi laboratóriumokban ismét kötelező vizsgálatoknak vetnek alá, amelyek során többek között az üzemanyag vezetőképességét, fajsúlyát és lobbanáspontját mérik. Ebben az állapotában az üzemanyag szavatossági ideje megközelítőleg két év.

A repülőterek alternatív üzemanyaggal való ellátása ugyanezekben a módokban lehetséges, azonban nagy különbséget jelent a hagyományos kerozinnal történő keverés helyszíne. Különböző forrásokból való beszerzés esetén lehetőség van közvetlenül a felhasználás előtt, a repülőtéren végezni. A SAF-ot külön tartályban tárolják a Jet A-1 üzemanyagtól, majd egy harmadik tartályban keverik össze. Ebben az esetben külön erre a célra rendszerbe állított keverőtartályok telepítésére van szükség. Egy másik lehetőség már bekevert állapotban szállítani a

²⁰ DETSIOS et al. 2023.

²¹ BAUEN et al. 2020.

²² DETSIOS et al. 2023.

felhasználási helyre, így a keverés köztes állomáson végzendő (például Hetény-egyházán vagy Pusztavacson). Kisebb üzemanyag-mennyiségek és 100%-ban fenntartható repülőgép-tüzelőanyaggal üzemelő repülőeszköz esetén az általános eljárást megkerülve dedikált üzemanyag-szállító teherautók látják el a repülőgépeket. A leggazdaságosabb megoldás a jelenleg üzemelő kőolaj-finomítók részleges vagy teljes átállítása SAF-előállításra. Ennek megvalósulása a „társfeldolgozás” eljárása, amelynek során a bioalapú nyersanyagokat és a hagyományos repülőgép-üzemanyagot együtt finomítják, így már eleve keverve jelenik meg. Ez jelenleg legfeljebb 5%-os SAF-arányra korlátozódik, de a közeljövőben akár 30%-ra is növekedhet. 5%-os aránynál általában csak katalizátorcsere szükséges, ami viszonylag egyszerűvé teszi a folyamatot, így az említett eljárás egyszerű alternatívát jelent. Nagyobb mértékű átalakításokra is szükség lehet, például a magas exoterm reakciók vagy a korróziós problémák enyhítésére. 2024 első negyedévére az EU-ban működő finomítók többsége már megkezdte az ezzel a módszerrel történő gyártást. Ezek a létesítmények potenciálisan nagyobb rugalmasságot kínálnak az elkövetkező átmeneti években, mivel képesek váltani a társfeldolgozás és a szimpla kőolaj-feldolgozás között a kereslet ingadozásainak kielégítésére.²³

A kerozin felhasználási helyre való eljuttatása után a helyi tárolás föld alatti tartályokban történik, amelyek epoxibevonattal rendelkeznek, amely kiváló korrózióállóságot biztosít, és számos vegyi anyaggal szemben ellenálló. Az eddigi tapasztalatok alapján ez a bevonat sem szállítás, sem tárolás során nem reagált eltérően a különböző SAF-ok esetében, azonban a tartályok előírt 15 évenkénti tisztítását és kalibrálását javasolt süríteni.

Felhasználás

A felhasználás előtt kerül sor a további adalékok, azaz a korróziógátló és jegesedésgátló folyadékok bekeverésére. Ezzel a kerozin szavatossági ideje három hónapra redukálódik. Ezután a repülőeszközök ellátását a föld alatti tartályokból feltöltött ÜTSZFP-35 MAN TGA 33.480, ÜTG-10-RÁBA H-25 és ÜTG-18-MAN HX 32.440 típusú gépjárművek végzik, amelyek a 9.5. ábrán láthatók.

A repülőeszköz tüzelőanyag-rendszerének feltöltése történhet központi, tartálycsoportonként vagy tartályonként elhelyezett feltöltőnyílásokon keresztül. Az utóbbinál általában nyitott feltöltőnyílást és töltőpisztolyt, a központi

²³ PEREZ–NYGAARD–TOPSOE 2024.



9.5. ábra. ÜTG-10-RÁBA H-25 (jobbra), ÜTG-18-MAN HX 32.440 (balra) és ÜTSZFP-35 MAN TGA 33.480 (középen) típusú üzemanyagtöltő és -szállító gépkocsik
Forrás: PAPP 2011

kialakításúnál hermetikusan záródó, túlnyomással működő gyorstöltőt alkalmaznak. Esetenként a kis és közepes szállítógépek fedélzeti áramforrásaik energiájával speciális fedélzeti szivattyút működtetnek, amely szűrést is megvalósítva irányváltó- és zárócsapok segítségével külső tárolókból (hordó, kannák, ciszterna stb.) a tüzelőanyagot a tartályba továbbítja. A tartályokból a tüzelőanyag hajtóművekhez történő továbbítása merev és hajlékony csővezetékek segítségével valósul meg. A merev csővezetékek anyagául durál, esetenként acél (nagy hőterhelésű helyeken) vagy réz (rezgécscillapításra) szolgálhat.²⁴ A fel nem használt, lejárt szavatosságú vagy légi járműből leengedett kerozint, amely már nem alkalmas repülési célokra, ipari kazánokban égetik el, más üzemanyagokkal együtt. Bár a repülőgépek tüzelőanyag-rendszerében alkalmazott fémkomponensek korróziós viselkedése az alternatív tüzelőanyagok hatására nem változik, a nitril-kaucsuk tömítések (O-gyűrűk) itt is jelen vannak, különösen a régebbi technikáknál.

Eddigi tapasztalatok

Napjainkban már több országban is folynak tesztrepülések SAF felhasználásával, aminek az egyik remek példája a Lufthansa kísérlete, amelynek során fél éven

²⁴ ÓVÁRI 2013.



9.6. ábra. Biokerozinnak kitett hőcserélő elszíneződése

Forrás: ZSCHOCKE 2018

keresztül üzemeltettek egy Airbus A321 típusú repülőgépet, amelyet 48,6%-os HEFA-keverékkel tankoltak. Az értékelés során a repülőgépet és a hajtóművet folyamatosan monitorozták, az adatokat összehasonlították egy referencia-hajtómű teljesítményével. Az üzemanyag minőségét többször tesztelték, és a kritikus paramétereket folyamatosan figyelemmel kísérték. A tárolás során nem történt sem sűrűségkülönbségből adódó szétválás, sem mikrobiális kontamináció. Azonban megemelkedett vezetőképesség volt megfigyelhető, mivel fémleválás történt a nem megfelelő belső borítással rendelkező tárolótartály faláról. A légi jármű hajtóművében nem észleltek rendellenességet, azonban a tüzelőanyag-rendszer biokerozinnak kitett részein szokatlan, sárga elszíneződés volt látható a magasabb kéntartalom következtében, de ez nincs hatással az alkatrészek működésére (9.6. ábra). Ezekről a rendellenességektől eltekintve a biokerozin legalább olyan jól teljesített a teszt során, mint a hagyományos.

A Lufthansa eredményeit azonban nem szabad automatikusan kivetíteni minden más SAF-előállítási eljárásra, ennél fogva minden új, ASTM-tanúsítvánnyal rendelkező alternatív üzemanyag-típus hasonló értékelése javasolt. Ugyanakkor mára megállapítható, hogy lehetséges olyan *drop-in* biokerozint előállítani, amely ugyanolyan biztonsággal és működési feltételek mellett használható, mint a hagyományos fosszilis Jet A-1.²⁵

²⁵ ZSCHOCKE 2018.

Összegzés

A fenntartható repülőgép-tüzelőanyagok gyártása gyors ütemben növekszik. 2023-ban a globális SAF-termelés meghaladta a 600 millió litert. Ugyanebben az évben az Európai Unió a termelés ösztönzése érdekében elfogadta a ReFuelEU Aviation kezdeményezést, amely kötelezi az üzemanyag-szolgáltatókat, hogy 2025-től az EU repülőterein legalább 2%-os arányban biztosítsanak SAF-ot, amely 2030-ra 6%-ra, 2035-re 20%-ra és 2050-re 70%-ra emelkedik (EBACE2024). Annak ellenére, hogy a jelenlegi termelési mennyiség még mindig alacsony, a SAF-gyártás lehetőségei nagyok. A Nemzetközi Energiaügynökség (*International Energy Agency, IEA*) forgatókönyve szerint még jelentős légi közlekedési hatékonyságjavításokkal és a nagy sebességű vasútra történő átváltással is 2060-ra még mindig szükség lesz évi körülbelül 150 millió tonna fenntartható repülőgép-tüzelőanyagra csak a nemzetközi légi közlekedéshez. A CORSIA mechanizmus bevezetésével a következő évtizedben, valamint az egyre több kormányzati törekvés mellett valószínű, hogy a növekedés az elkövetkező években felgyorsul.²⁶

Összességében megállapítható, hogy a SAF-ok logisztikai rendszerbe való beillesztése számos átalakítást igényel. Elsősorban új beszerzési láncot kell kiépíteni, amely magában foglalja az üzemanyaggyártók, -beszállítók és a logisztikai partnerek kiválasztását. Emellett, bár a repülőtereken található tárolók minimális átalakítással alkalmasak SAF befogadására, külön keverőtartályt kell kialakítani, illetve ehhez kapcsolódóan akár a csővezeték-hálózat bővítésére is szükség lehet. Valamint a műszaki eszközök és repülőgépek kompatibilitáshoz szükséges átalakítását is el kell végezni. Mindehhez jelentős kezdeti beruházásra lesz szükség. Az alternatív repülőgép-üzemanyagok bevezetése a Magyar Honvédség logisztikai rendszerébe nemcsak technológiai és infrastrukturális, hanem pénzügyi és szabályozási kihívásokkal is jár. A sikeres átállás érdekében átfogó stratégiai tervezésre és a Magyar Honvédség minden szintjén történő együttműködésre van szükség.

Felhasznált irodalom

Air Transport Action Group (2023): *Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel*. Online: <https://aviationbenefits.org/media/168027/atag-beginners-guide-to-saf-edition-2023.pdf>

²⁶ BAUEN et al. 2020.

- AIRportal.hu (2024a): A világ légiflottájának megkétszereződésére számít a Boeing is. *AIRportal.hu*, 2024. július 22. Online: <https://airportal.hu/a-vilag-legiflottajanak-megketsze-rezodesere-szamit-a-boeing-is/>
- AIRportal.hu (2024b): Több mint duplájára nő 2043-ra a világ légiflottája az Airbus szerint. *AIRportal.hu*, 2024. július 15. Online: <https://airportal.hu/tobb-mint-duplajara-no-2043-ra-a-vilag-legiflot-taja-az-airbus-szerint/>
- BAUEN, Ausilio et al. (2020): Sustainable Aviation Fuels: Status, Challenges and Prospects of Drop-In Liquid Fuels, Hydrogen and Electrification in Aviation. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(3), 263–278. Online: <https://doi.org/10.1595/205651320X15816756012040>
- BÉKÉSI Bertold – SÁRI János (2021): A kriogenika felhasználhatósága a modern repülésben. *Repülés-tudományi Közlemények*, 33(1), 137–156. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.11>
- BOICHENKO, Sergei – VOVK, Oksana – YAKOVLEVA, Anna (2013): Overview of Innovative Technologies for Aviation Fuels Production. *Chemistry and Chemical Technology*, 7(3), 305–312. Online: <http://doi.org/10.23939/chcht07.03.305>
- CABRERA, Eduardo – DE SOUSA, João M. Melo (2022): Use of Sustainable Fuels in Aviation: A Review. *Energies*, 15(7), 2440. Online: <https://doi.org/10.3390/en15072440>
- CHOWDHURY, Harun – LOGANATHAN, Bavin (2019): Third-Generation Biofuels from Microalgae: A Review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 20, 39–44. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.09.003>
- DETSIOS, Nikolaos et al. (2023): Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review. *Energies*, 16(4), 1904. Online: <https://doi.org/10.3390/en16041904>
- EBACE2024 (2024): *Experts Say SAF Supply, Demand Rising; Production Expected to Increase*. Online: <https://ebace.aero/2024/newsroom/ebace2024-experts-say-saf-supply-demand-rising-production-expected-to-increase/>
- FEHÉR Krisztina – ÓVÁRI Gyula (2017): A mikroalgák felhasználási lehetőségei a biodízel üzemanyagok előállításában. *Repüléstudományi Közlemények*, 29(2), 119–136. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4329/3537>
- H2Stations [é. n.]: *H2 Stations Map*. Online: www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.139384&lng=11.190114&zoom=2
- KOVÁCS Gábor (2017): *A légiközlekedésben meglévő és új tüzelőanyagokra vonatkozó szabványok, alkalmazásuk feltételei*. Referátum (GINOP-2.3.2-15-2016-00007). Kecskemét: [k. n.]
- MARKSEL, Maršenka et al. (2020): Adaptation of Airport Infrastructure for Operation of ICE-Hybrid and Fuel-Cell Aircraft. In *19th International Conference on Transport Science. Maritime, Transport and Logistics Science. Conference proceedings*. Ljubljana: Slovene Association of Transport Sciences – University of Ljubljana, Faculty of Maritime Studies and Transport – University of Split, Faculty of Maritime Studies. Online: https://mahepa.eu/wp-content/uploads/2020/09/ICTS_2020_paper_32_Marksel-et-al-final.pdf
- NAIK, Satya Narayan et al. (2010): Production of First and Second Generation Biofuels: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597. Online: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Neste [é. n.]: *Who We Are*. Online: www.neste.com/about-neste/who-we-are
- ÓVÁRI Gyula (2013): *Repülőszközök tüzelőanyag-rendszerei*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszék.
- ÓVÁRI Gyula – FEHÉR Krisztina (2020): Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségsszerűség kompromisszumokkal. I. rész. *Haditechnika*, 54(6), 5–10. Online: <http://doi.org/10.23713/HT.54.6.02>

- ÓVÁRI Gyula – SZEGEDI Péter (2010): Alternatív üzemanyagok alkalmazásának lehetőségei a repülésben. *Repüléstudományi Közlemények*, 22(Ksz.), 548–576. Online: <https://demo.repozitorium.uni-nke.hu/xmlui/handle/123456789/1172?show=full>
- PAPP Mihály (2011): *A Magyar Honvédség főbb haditechnikai eszközei*. Székesfehérvár: Magyar Honvédség Összhaderőnemi Parancsnokság.
- PECHSTEIN, Jan – ZSCHOCKE, Alexander (2018): Blending of Synthetic Kerosene and Conventional Kerosene. In KALTSCHMITT, Martin – NEULING, Ulf (szerk.): *Biokerosene*. Berlin: Springer, 665–686. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_25
- PÉREZ, Maria J. L. – NYGAARD, Gitte Thomsen – TOPSOE, Sylvain Verdier (2024): SAF Production via Co-Processing in the Kerosene Hydrotreater. *DigitalRefining*, 2024. május. Online: www.digitalrefining.com/article/1003094/saf-production-via-co-processing-in-the-kerosene-hydrotreater
- RUMIZEN, Mark (2017): Aviation Biofuel Standards and Airworthiness Approval. In KALTSCHMITT, Martin – NEULING, Ulf (szerk.): *Biokerosene*. Berlin: Springer, 639–663. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_24
- SAMIMI, Amir (2012): Normal Paraffin Production Process of Kerosene in Oil Refinery Company. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 1(2), 171–177.
- Sections (2023). In HOESUNG, Lee – ROMERO, Jose (szerk.): *Climate Change 2023. Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 35–115. Online: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- SZEGEDI Péter – ÓVÁRI Gyula (2010): Hagyományos repülőgép-üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai. *Hadmérnök*, 5(4), 16–37. Online: http://hadmernok.hu/2010_4_ovari_szegedi.pdf
- VARGA Béla – ÓVÁRI Gyula – FEHÉR Krisztina (2021): SPK tüzelőanyagok és tüzelőanyag-keverékek hatása a repülőgép-tüzelőanyag rendszerek nemfémes anyagaira. In BÉKÉSI Bertold (szerk.): *Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2021 konferencia. Környezet- és földtudományok, műszaki hidrológia és repüléstudomány szekció. Előadások kiadványa*. Debrecen: MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága, 87–91.
- ZSCHOCKE, Alexander (2018): Lufthansa Experiences Using Biokerosene. In KALTSCHMITT, Martin – NEULING, Ulf (szerk.): *Biokerosene*. Berlin: Springer, 725–740. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_28

