

Csató Péter, Óvári Gyula

A hidrogén felhasználásának jelene és jövője a repülésben

Az elmúlt években rendkívüli mennyiségű üvegházhatású gáz jutott a légkörbe, aminek jelentős része a repüléshez köthető. A jelenleg használt, egyre csökkenő mennyiségben elérhető fosszilis energiahordozók kiváltására az egyik legígéretesebb alternatíva a hidrogén. Hajtóanyagként hagyományos gázturbinás hajtóművekben, belső égésű motorokban és protonáteresztő membrános üzemanyagcellában is felhasználható energiatermelésre. Azonban a hidrogén tárolása, szállítása és a légi járműbe való betöltése sok esetben nehézkes vagy még nem megoldott feladat. Számos terv született azonban e problémák megoldására, amelyek kivitelezése, 2030-as és 2050-es határidők mellett, jelenleg is folyamatban van. E cikk célja, hogy átfogó képet adjon az eddig elért eredményekről, és előrevetítse a hidrogén felhasználásának lehetséges jövőjét.

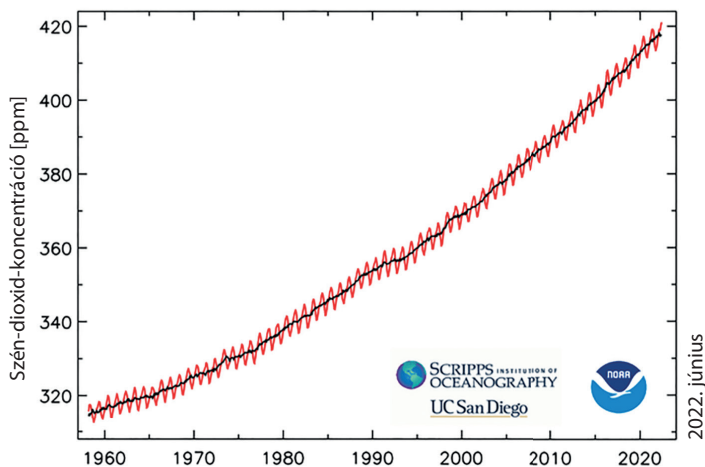
Kulcsszavak: üzemanyagcella, hidrogén, powerpaste, dekarbonizálás, repülés, kriogén

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedek során a repülőeszközök – a kor kívánalmainak megfelelően – rendkívüli ütemben fejlődtek. Azonban hajtóanyagaik továbbra is fosszilis energiahordozók származékai, amelyek kitermelhető mennyisége véges. Emellett jelenleg világviszonylatban az átlagos napi nyersolajszükséglet 93 103 millió hordó. Becslések szerint ilyen mértékű fogyasztás esetén 47 évre elegendő a kitermelhető mennyiség. Azonban nem szabad megfeledkezni a folyamatosan növekvő energiaigényről akár az ipar, akár a közlekedés szempontjából, aminek kielégítése ezt az időtartamot folyamatosan csökkenti. Továbbá a rendelkezésre álló kőolaj kitermelhetőségét, valamint az árak várható alakulását a fogyasztói igények változása mellett számottevően befolyásolhatják egyéb gazdasági, politikai hatások. Ilyen például a jelenlegi nemzetközi konfliktusokban részt vevő felek katonai szükségleteinek jelentős növekedése, nem beszélve a közel-keleti olajtartalékok hovatartozásának kérdéséről. Emellett az ázsiai nagyhatalmak növekvő energiaigénye miatt folyamatosan bővülő kereslet is jelentős árfelhajtó hatást okoz [14].

A megemelkedett kőolaj-felhasználás hatására az elmúlt évtizedekben eddig még nem tapasztalt mennyiségű szén-dioxid jutott a légkörbe. Az emberi tevékenység következtében az éves kibocsátás az Európai Bizottság és a Holland Környezetvédelmi Ügynökség által 2022-ben kiadott EDGAR-adatbázis alapján 37 857 580 000 t [11]. Egyéb, még erősebb üvegházhatású gázok, például a metán, nem szerepelnek ezen adatok között. Ezek a gázok, a szén-dioxiddal

együtt a bolygó felszínéről kisugárzó hőt, amely egyébként az űrbe kerülne, a légkörbe zárják, annak folyamatos felmelegedését okozva, ami különböző szélsőséges időjárási hatásokat eredményez. Az üvegházhatású gázok szennyezése a világ óceánjaira gyakorolt hatásai közé tartozik a tengervíz felszínének emelkedő hőmérséklete, a tengerszint emelkedése, valamint a fokozott szénabszorpció, ami savasabbá teszi a tengervizet, és az óceánok oxigénszintjének csökkenéséhez vezet, ezzel megnehezítve egyes tengeri élőlények túlélését. Az ipari forradalmat megelőzően az emberi civilizáció közel 6000 évében a szén-dioxid szintje folyamatosan 280 ppm körüli érték volt (azaz, a levegő minden egymillió molekulájából 280 szén-dioxid-molekula volt). 2022 májusában ez a mutató elérte a 420 ppm értéket (1. ábra), és fokozatosan közelíti a 450 ppm visszafordíthatatlansági küszöbértéket [4].



1. ábra

A Föld légköre CO₂-koncentrációjának változása (Hawaii, Mauna Loa állomás) [4]

Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport (IPCC) legfrissebb adatai szerint a légi közlekedés (belföldi és nemzetközi) felel az emberi tevékenység által generált szén-dioxid-kibocsátás 2%-áért (840 000 000 t) [8]. A repülés várható növekedési ütemét figyelembe véve azonban a kibocsátott szén-dioxid mennyisége a következő 30 évben, további intézkedések nélkül, meg fog duplázódni. Azonban a repülés környeztkárosító hatása ennél jóval nagyobb arányú, hiszen a repülőgépek általános üzemelési magasságán, a sztratoszféra határán már minimális a függőleges irányú légmozgás, így a hajtóművekből távozó szennyezőanyagok (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, szén-monoxid) évtizedekig megmaradhatnak, akumulálódnak, megkötő közeg hiányában pedig hatásuk sokszorozódik [14].

Ennek megakadályozására 2020 decemberében 195 ország aláírta azt a megújított párizsi megállapodást, amelyben vállalja 2030-ig a karbonsemleges, majd 2050-ig a karbonmentes polgári, illetve katonai légi közlekedést is. Ez azt jelenti, hogy a kibocsátást olyan szintre csökkentik, amelyet a természeti folyamatok meg tudnak kötni. Az Európai Repülésbiztonsági Ügynökség (EASA) által minden EU-tagállam – így Magyarország – számára kiemelt fontossággal előírt

feladat a fenntartható, alternatív hajtóanyagok felhasználására való fokozatos átállás. A fosszilis energiahordozók kiváltására napjainkban is keresik a megoldásokat, ami nem csupán a megfelelő alternatíva megtalálását, hanem az azt szállítani, tárolni, elosztani képes infrastruktúra kiépítését, illetve az ezzel üzemelni képes eszközök kifejlesztését is magában foglalja.

2. Számításba vehető alternatív tüzelőanyagok

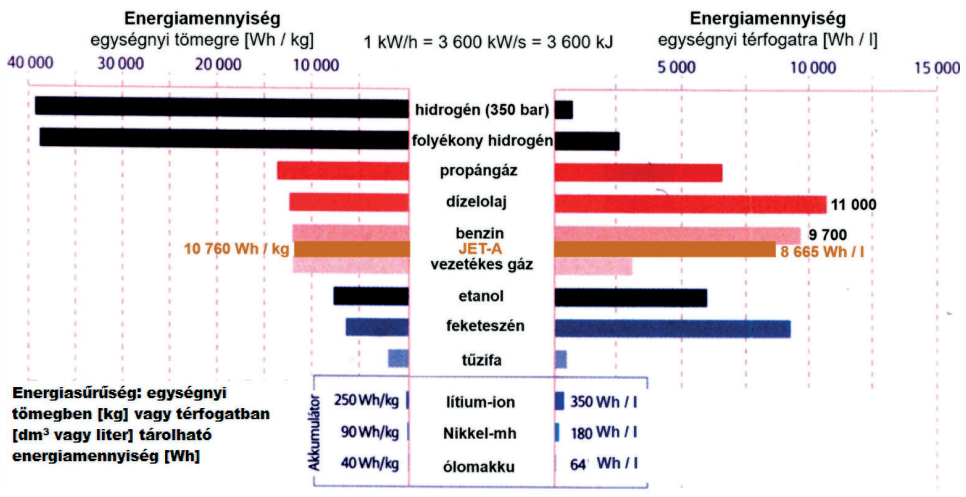
A leírt kihívásokra adott válaszként a légi közlekedés hatásainak csökkentését célzó számos módszer már széles körben vizsgálták a korábbi kutatások. A lehetséges alternatívák között jelenleg a legígéretesebbek az új meghajtási technológiák, például az akkumulátoros, hibrid-elektromos vagy hidrogénmeghajtás, valamint az alternatív üzemanyagok (1. táblázat).

A fenntartható tüzelőanyagok (*sustainable aviation fuels*, SAF), a bioüzemanyagok és a szintetikus üzemanyagok (*synfuels*, más néven PtL, Power-to-Liquids) kerozinszerű „drop-in” üzemanyagok, amelyek kompatibilisek a legtöbb repülőgéptípussal, így alkalmazhatók a repülőgépek szerkezeti és hajtómű kialakításának jelentős megváltoztatása nélkül. A bioüzemanyagok vagy biomasszák, szerves hulladékon alapulnak, és akár 94%-os nettó szén-dioxid-csökkentést is eredményezhetnek, fajlagos energiatartalmuk (MJ/kg) összemérhető a jelenleg használatos repülőgép-üzemanyagokkal (1. táblázat). Hosszú távon a bioüzemanyagok alapanyagainak elérhetősége korlátozott lehet, és potenciálisan versenyhelyezettel járhat a termőföldek más célra való felhasználhatósága miatt. A szintetikus üzemanyagok csak az ipari folyamatokból származó vagy közvetlenül a levegőből kinyert szén-dioxid és hidrogén előállításához és szintéziséhez igényelnek megújuló energiát.

1. táblázat
Folyékony és gáz tüzelőanyagok fizikai jellemzői [7]

Üzemanyag	Égéshő [MJ/kg]	Energiasűrűség [MJ/l]	Sűrűség [kg/m ³]
Hidrogén (cseppfolyós)	143	10,1	71
Hidrogén (sűrített, 700 bar)	143	5,6	42
Hidrogén (környezeti nyomású)	143	0,0107	0,09
Metán (környezeti nyomású)	55,6	0,0378	424
Földgáz (cseppfolyós)	53,6	22,2	428
Földgáz (sűrített, 250 bar)	53,6	9	215
Földgáz (környezeti nyomású)	53,6	0,0364	0,747
LPG propán	49,6	25,3	507
LPG bután	49,1	27,7	584
Benzin	46,4	34,2	744
Etanol	29,8	21,1	788
Biodízel (metilészter)	42,2	33	887
Dízel	45,4	34,6	836
Kerozin JetA	46,4	36,7	790

A megújuló energiával tölthető akkumulátoros elektromos repülőgépek lényeges előnye, hogy repülés közben nincs károsanyag-kibocsátásuk. A vizsgálatok azonban kimutatták, hogy az akkumulátoros elektromos meghajtás a belátható jövőben nem lesz kivitelezhető nagyobb repülőgépekre és hosszabb repülési hatótávolságokra, a jelenleg ismert akkumulátorok alacsony energiasűrűsége miatt (2. ábra).



2. ábra
Különböző energiahordozók és tárolók energiasűrűsége [28]

A légi járművek hidrogénmeghajtása egy másik lehetőség a káros hatások jelentős csökkentésére a légi közlekedésben, zöld hidrogén alkalmazása, amely elnevezését onnan kapta, hogy előállítása során kizárólag megújuló energiaforrásokat használnak fel (3. ábra).



3. ábra
A hidrogén előállításának módszerei [12]

3. Működési elvek

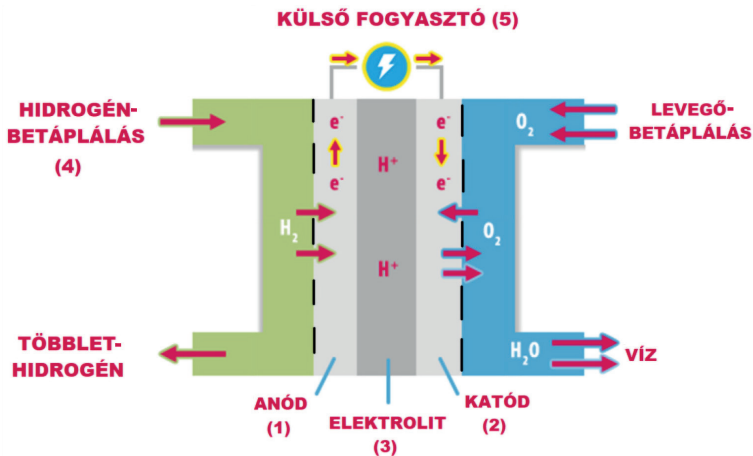
A hidrogén hajtóanyagként való felhasználásának legkézenfekvőbb módja annak belső égésű motorokban való elégetésével történő energiafelszabadulás.

A repülőgépek működtetésére a tárolás gazdaságossága, a hajtóműbe való pontos adagolás szükségessége miatt vagy cseppfolyósított (kriogén) állapotban vagy magas nyomású gáz formájában célszerű alkalmazni. Az egységnyi tömegéből nyerhető égéshője 2,7-szerese a kerozinénak, de más paraffin-szénhidrogének égéshőjét is felülmúlja. 1 kg kerozin elégetésekor 3,16 kg szén-dioxid és 1,25 kg víz jön létre. 1 kg hidrogén elégetésekor 9 kg víz keletkezik (2. táblázat). Tehát 1 kg kerozin energiatartalma 0,36 kg hidrogénének felel meg. A folyékony hidrogén elégetése során sem szén-dioxid, sem a kerozin elégetésekor keletkező más mérgező, illetve üvegházhatású melléktermék nem keletkezik. Azonban a keletkező 2,6-szer több víz, nagy magasságokban szintén kedvezőtlenül befolyásolja az üvegházhatást [15].

2. táblázat
A kerozin és a folyékony hidrogén égéstermékei [28]

Égéstermék	Kerozin	L H ₂
Elsődleges égéstermék	CO ₂ H ₂ O	H ₂ O
Égési melléktermék és az atmoszférával való reakciók termékei	HC → O ₃ NO _x → O ₃ CO → O ₃ SO ₂ → H ₂ SO ₄	H ₂ → H ₂ O NO _x → O ₃

A hidrogén hajtóanyagként való másik felhasználása az üzemanyagcella, amelynek számos típusát különböztetünk meg, azok kémiai összetétele, felhasználási területe és hatásfoka alapján. A járműiparban főként a protonáteresztő membrános üzemanyagcella (PEMFC) használatos (4. ábra), annak számos pozitív tulajdonsága miatt. Az átalakulást nem kíséri hang- vagy fényjelenség. Az üzemi hőmérséklete ~80 °C, gyorsan és könnyen üzembe helyezhető, kompakt, és jóval könnyebb, mint a hasonló, például szilárd oxidos cellatípus. A protonáteresztő membrános cella alkalmazásával 50–60%-os hatásfok érhető el [27].



4. ábra
A protonátesztő membrános üzemanyagcella elvi felépítése [20]

A 4. ábrán látható módon, a külső házon beérkező hidrogén (4) az anódon lévő platina katalizátor (1) hatására megválik az elektronjától. Azonban a protonátesztő membrán elektroliton (3) keresztül csak a pozitív töltésű ionok tudnak a katódhoz áramlani, ezért a negatív töltésű elektronok csak külső terhelésen keresztül (5) juthatnak az anódról (1) a katódra (2), vezetéken keresztül, villamos áramot hozva létre. A katód oldalon lévő katalizátor egyesíti a hidrogéniont elektronnal és az itt beáramló oxigénmolekulákkal. Ennek eredményeként hő és vízgőz képződik. Az anódot és a katódot az áramló közegektől egy porózus szerkezetű, gáz áteresztésére alkalmas anyag választja el. Inverter segítségével váltóáram is létrehozható.

Az üzemanyagcellában végbemenő reakciók:

- anódreakció:



- katódreakció:



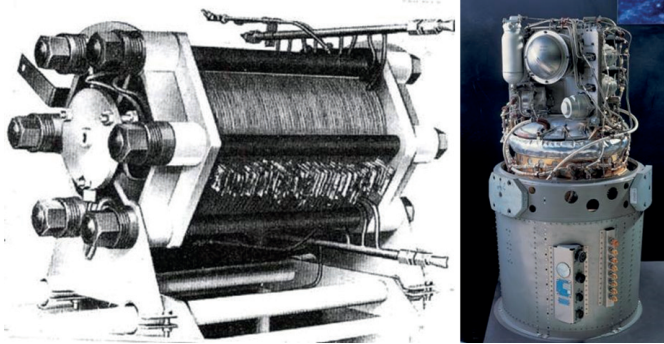
- teljescella-reakció:



A PEM-üzemanyagcella 1,16 V feszültség előállítására képes, amely közel sem elég egy jármű meghajtására, ezért a nagyobb teljesítmény érdekében e cellákat sorosan és/vagy párhuzamosan összekapcsolva cellatelepeket alakítanak ki [27].

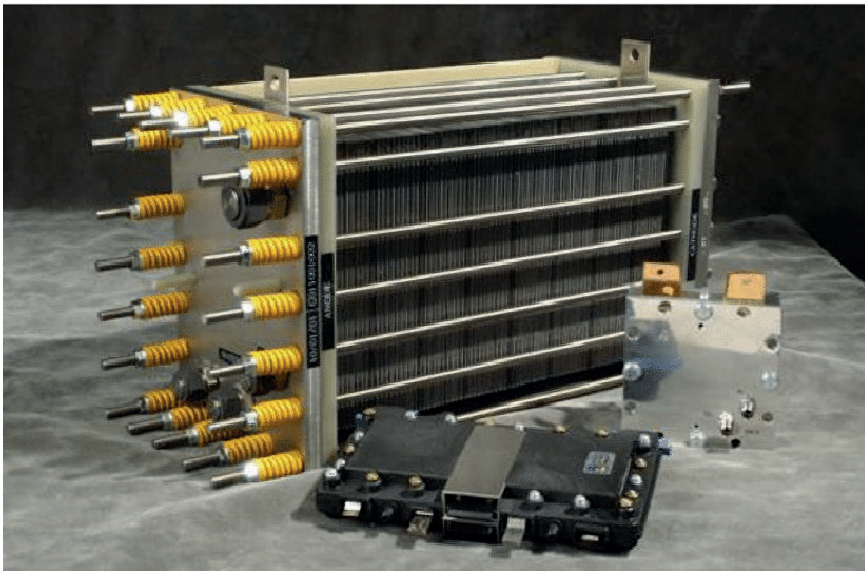
4. Az üzemanyagcella gyakorlati alkalmazása

Az üzemanyagcella megvalósításának alapjait Sir William Grove 1839-ben, elektrolízissel kapcsolatban végzett kísérletei során fektette le, amikor két elektródát alkalmazva, az egyikre hidrogéntartalmú, a másikra oxigéntartalmú oldatot vezetett, és a kettő közti feszültséget mérte. A következő mérföldkő az 1930-ban, Francis Bacon által továbbfejlesztett, majd 1932-ben bemutatott kálium-hidroxid elektrolitos, nikkell elektródás üzemanyagcella volt, amelynek tervei alapján 1959-re már 5–6 kW teljesítményű protoncsere-membrános cellaköteget hoztak létre.



5. ábra

Francis Bacon-féle cellaköteg [21] és Pratt & Whitney Apollo üzemanyagcella [5]



6. ábra

Modern 5 kW (hátul), 30 W (elől) és 25 W (jobbra) teljesítményű üzemanyagcella [23]

Még abban az évben Harry Ihring bemutatta első, ilyen elven működő járművét, egy 15 kW teljesítményű traktort. A hatvanas évek elején a Pratt & Whitney repülőgéphajtómű-gyártó cég megvásárolta az üzemanyagcella licencét, és igyekeztek csökkenteni az üzemelési hőfokot, a gáznyomást és a berendezés tömegét, így a P&W típusú üzemanyagcella felhasználhatóvá vált az Apollo űrprogramban. Ennek továbbfejlesztett változatait a NASA űrsiklóiba a hetvenes évek közepétől egészen napjainkig beépítette. Jelenleg is számos kutatás folyik a hidrogén üzemanyagcella minél hatékonyabb, kompaktabb és gazdaságosabb kialakítására, alkalmazására mind a szárazföldi, mind a légi közlekedésben (például 6. ábra). Napjainkban több repülőgépgyártó cég is mutatott be terveket hidrogénmeghajtású repülőgépről.

Napjainkban az üzemanyagcellák lehetséges alternatívát kínálnak az akkumulátorral hajtott pilóta nélküli légi járművek energiaellátására is, mivel megőrzik a teljesen elektromos rendszer egyszerűségét és előnyeit. Az üzemanyagcellás és akkumulátor alapú rendszerek összehasonlításához fontos ismerni a két technológia alapvető különbségeit (3. táblázat). Az üzemanyagcella annyiban hasonlít az akkumulátorhoz, hogy egyenáramot biztosít. Az akkumulátorral ellentétben azonban az üzemanyagcellában külön tüzelőanyag (hidrogén) és oxidálószer (levegő) áramoltatása történik. Ez az üzemanyagcellás rendszer eleve biztonságosabb az akkumulátortechnológiáknál. Általánosságban elmondható, hogy mivel az oxidálószer a külső levegőből nyerik, és nem tárolják az üzemanyaggal együtt, az üzemanyagrendszer energiatartalma jóval meghaladja a hagyományos akkumulátoros rendszereket.

3. táblázat
Hasonlóságok és különbségek az akkumulátor és az üzemanyagcella között [17]

Hasonlóságok	Különbségek
<ul style="list-style-type: none"> Mindkettő közvetlenül elektrokémiai reakciókon keresztül termel villamos energiát. Mindkettőben elektrolittal érintkező anód és katód található. Mindkettőnél kisméretű egyenáramú cellák vannak sorba kapcsolva, nagyobb feszültség és teljesítmény elérése érdekében. 	<ul style="list-style-type: none"> Az akkumulátor energiát tárol, míg az üzemanyagcella igény szerint energiát termel. Az üzemanyagcellát nem kell újratölteni. Az üzemanyagcellában az anód- és a katódgázok (hidrogén és levegő) szeparálva vannak; míg egy akkumulátorban nem, ami biztonsági problémát jelenthet.

Az akkumulátorral működő UAV üzemelési idejének növelésére további akkumulátorokat építenek be, ami gyors ütemben növeli a rendszer teljes tömegét. Összehasonlításképpen, az üzemanyagcellás rendszerrel hosszabb működési idő elérésére csak egy nagyobb hidrogéntartályt szerelnek be, ami minimális hozzáadott tömeget jelent [17].

A jelenlegi limitált hatótávolságú, repülési idejű és szállítókapasitású drónok teljesítményének javítására már számos, különböző üzemanyagcellás megoldás készült. Ezek átlagosan 2,4 kW teljesítménnyel, 6 l-es, 350 bar-os hidrogéntartállyal, 6–8,5 kg hasznos teher szállítása mellett 120 percet képesek a levegőben maradni (7. ábra) [19].

Azonban már szélesebb körben is folynak a fejlesztések. Például a ZeroAvia cég 2020 végén sikeresen végrehajtott tesztrepülést egy hidrogénüzemanyag-cellás meghajtásra átalakított, hatüléses Piper M típusú repülőgéppel (8a. ábra), megalapozva ezzel az elkövetkező évek kutatási irányát. Ebben a gépben egy 250 kW teljesítményű elektromos rendszert helyeztek el, amellyel ~300 m magasságban, 160 km/h sebességgel repültek. A kutatási-fejlesztési program következő fázisaként egy 19 személyes Dornier 228 típusú repülőgép átalakítása van folyamatban (8b. ábra) [22].



7. ábra
SENSUS 8 típusú UAV [19]



a) b)
8. ábra
A ZeroAvia Piper M és Dornier 228 típusú modifikált repülőgépe [13], [25]

Emellett az Airbus ZEROe kísérleti repülőgépei szintén hidrogénüzemanyag-cellákat használnak a modifikált gázturbinás hajtóművek kiegészítő elektromos energiájának előállítására, ami rendkívül hatékony hibrid-elektromos meghajtási rendszert eredményez.

Az Airbus három hidrogénüzemű szén-dioxid-semleges repülőgép-konceptiót mutatott be (9. ábra). Mindhárom tervezése során a zero kibocsátás elérésének különböző módjait igyekeztek megvalósítani [3].



9. ábra

A három Airbus ZEROe repülőgép-koncepció [16]

Az első lehetőség egy két turbófan hajtóműves repülőgép (9. ábra felül), amely 120–200 utas befogadására alkalmas, és 2000 tengeri mérföld (3700 km) távolságot képes megtenni. Valójában ezt szánják az A320-as típus utódjának. A cseppfolyósított hidrogént tartalmazó tartályok a nyomástartó válaszfal mögötti farokrészben találhatók. A második lehetőség egy legfeljebb 100 utas befogadására alkalmas turbólégcsavaros repülőgép (9. ábra alul), amely több mint 1000 mérföld (1852 km) megtételére képes. A hidrogént itt is gázturbinás hajtóműben égetik el. A harmadik koncepció a „csupaszárny” kialakítás alkalmazása (9. ábra középen), ez a repülőgép legfeljebb 200 utas befogadására képes, és a repülési hatótávolsága meghaladja a 2000 mérföldet. Az ultraszéles törzs használata további lehetőségeket biztosít a hidrogéntartályok elhelyezésére, valamint az utastér kialakítására is. Az első tesztrepülést a tervek szerint 2026-ban fogják végrehajtani [1], [3], [16].

5. Jelenlegi kihívások

A hidrogénüzemű repülőgép-tervezés legnagyobb kihívása a hidrogén tárolásának és szállításának problémája, annak egységnyi térfogatra vonatkoztatott alacsony energiasűrűsége miatt, akár annak elégetéséről, akár üzemanyagcellában való felhasználásáról van szó. Normál légköri nyomáson (101 325 Pa) és 0 °C-on körülbelül 3000 l térfogatra lenne szükség gáz halmazállapotú hidrogén esetében ahhoz, hogy ugyanolyan mennyiségű energia tárolását érjük el, mint ami egy liter kerozin üzemanyag elégetésével kinyerhető. Ennek eredményeként a hidrogén tárolási sűrűségének növelése szükséges ahhoz, hogy repülőeszközökben való felhasználása reálisan és elfogadható gazdaságossággal lehetővé váljon. Számos módszer létezik a nagyobb sűrűségű tárolására. Ezek a megközelítések azonban bizonyos típusú energiabevitelt

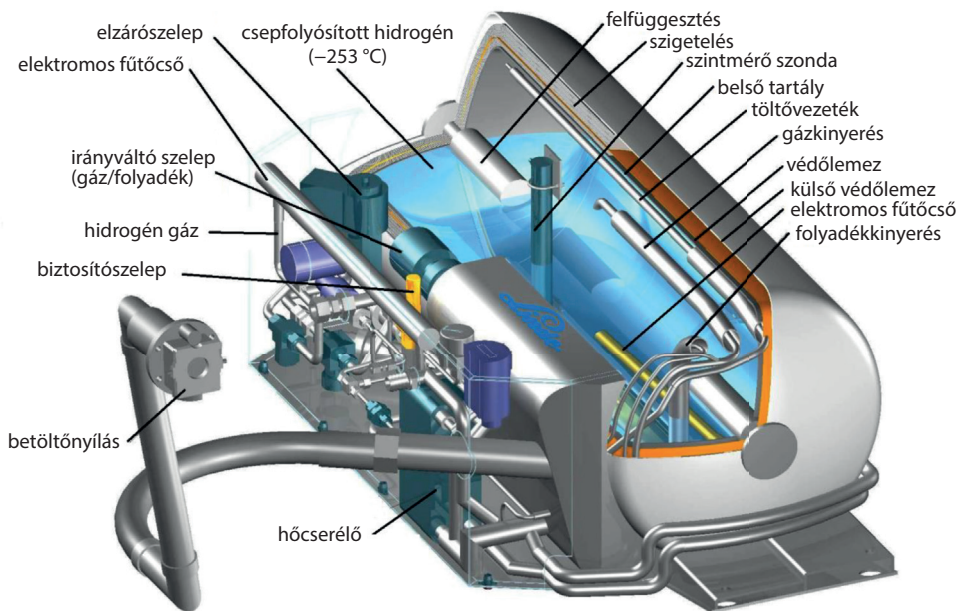
igényelnek, akár munka-, hő- vagy bizonyos esetekben hidrogénmegkötő anyagok formájában. A megfelelő tárolási módot három alapvető elvárás alapján határozhatjuk meg:

- a minél nagyobb gravimetrikus¹ és térfogati hidrogénsűrűség, amely meghatározza az anyag tömegegységre és térfogategységre vonatkoztatott energiataralmát;
- termodinamikai tulajdonságok, amelyek lehetővé teszik a reverzibilis hidrogénfelvételt és -felszabadítást a standard környezeti körülményekhez minél közelebb;
- kémiai reakciók gyors lefolyása, ami biztosítja az üzemanyag folyamatos, szabályozott betáplálását és a feltölthetőséget.

A tárolóanyag és a tárolt hidrogén közötti kölcsönhatás jellege alapján a tárolás típusa lehet fizikai, kémiai tárolás és adszorpció.

5.1. Fizikai tárolás

A fizikai tárolás a hagyományos technikai megoldások közé tartozik, ami történhet hidrogén tiszta formájában kémiailag változatlan, sűrített gázként vagy kriogén (cseppfolyósított) állapotban. Sűrített gáz tárolása, szilárdsági megfontolásokból kizárólag hengeres és/vagy gömb alakú tartályokban történik, legalább 300 bar nyomáson, így energiasűrűsége $\sim 20 \text{ kg/m}^3$.



10. ábra
Folyékonyhidrogén-tartály elvi felépítése [3]

¹ Gravimetria: súlyanalízis, súly szerinti elemzés, tömegmérésen alapuló technika.

A jelenlegi kereskedelmi forgalomban kapható hidrogénüzemű járművekben egyre gyakrabban használnak 700 bar nyomású hidrogént, amelynek sűrűsége $\sim 40 \text{ kg/m}^3$. Előzetes számítások szerint a repülésben 850–900 bar-os tárolókapacitás alkalmazása célszerűbb. A cseppfolyósított hidrogén sűrűsége valamivel kedvezőbb, 71 kg/m^3 [9].

Azonban a hidrogén cseppfolyós halmazállapotának fenntartásához a hőmérséklet folyamatosan $[(-253) - (-262)] \text{ }^\circ\text{C}$ tartományban kell tartani, ami különböző hűtőberendezések és tartályszigetelés beépítését teszi szükségessé, így többlet szerkezeti tömeg is megjelenik (10. ábra). Az egyik lehetőség a tartály szigetelésének javítására és tömegének csökkentésére titánötvezetek alkalmazása, amelyek már széles körben használatosak a repülőgép- és űriparban, számos előnyös tulajdonságuk miatt (például a nagy fajlagos szilárdság, jó korrózióállóság, alacsony hővezető képesség és a kis hőtágulási együttható). Másik megoldás lehet a fejlesztés alatt álló kompozitok alkalmazása. A különböző szálerősített műanyagok (FRP), mint például a szén-, üveg- és kevlárszál-erősítésű polimerek jó rezgéscsillapításuk és alacsony hőtágulási együtthatójuk miatt lehetséges alternatívát nyújthatnak.

5.2. Adszorpció

A hidrogén tárolásának másik módja a hidrogénmolekulák és egy másik anyag felületi molekulái között kialakuló van der Waals-kölcsönhatáson alapul, amelyet adszorpciónak nevezünk. Ilyen anyagok lehetnek a különböző szén nanoszerkezetek, például a grafén, szén-nanocsövek, nanoszálak, fullerének,² zeolitok,³ megfelelő pórusmérettel rendelkező aktivált szén, illetve a fémorganikus térhálók⁴ (*metal-organic framework*, MOF). A hidrogén ezekben az anyagokban állandó jelleggel és reverzibilisen is tárolható, azaz adott anyag hőmérsékletét megfelelő nyomáson megnövelve a hidrogén felszabadul. Bár ennek a folyamatnak a szabályozására általában a hőmérséklet és a nyomás a legalkalmasabb paraméter, a hidrogén megkötése, illetve leadása más módon is megvalósítható, például mechanikai vagy akusztikus energia útján [2].

Mivel ez a kölcsönhatás viszonylag gyenge kötést eredményez a hidrogén és az adszorbeáló anyag felülete között, ezért a legtöbb ilyen szobahőmérsékleten igen alacsony hidrogéntároló kapacitással rendelkezik, és csak $-196 \text{ }^\circ\text{C}$, valamint nagy nyomás ($p \geq 100 \text{ bar}$) mellett ér el elfogadható értéket.

5.3. Kémiai tárolás

A hidrogén azonban nemcsak felületen való megkötés útján léphet kapcsolatba szilárd anyagokkal, bizonyos anyagcsaládokkal nem az előbb felsorolt molekuláris szinten, hanem szilárd anyagban, új kémiai kötések kialakításával, atomi szinten történik kapcsolódás, ami az abszorpció speciális változata, és kemisorpciónak nevezünk.

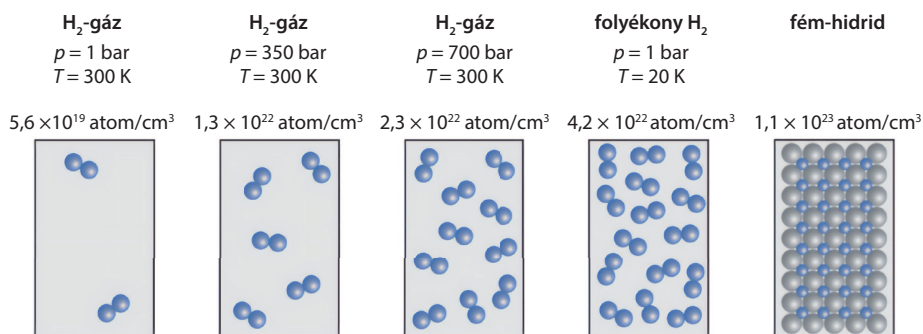
² A fullerén olyan szén-allotróp, amelynek molekulája egyes és kettős kötéssel összekapcsolt szénatomokból áll, így zárt vagy részben zárt hálót alkotnak, öt-hét atomból álló kondenzált gyűrűkkel. A molekula lehet üreges gömb, ellipszoid, cső vagy sok más alakú és méretű.

³ A zeolit csoport tagjai víztartalmú alumoszilikátok, amelyekben a víztartalom jelentős része reverzibilis és alacsony hőmérsékleten eltávolítható.

⁴ MOF: olyan porózus kristályos szerkezetek, amelyekben a fémionokat organikus elemek kötik össze.

A kémiai kötéssel alapuló tárolási technológiák két típusra oszthatók: fém-hidridekre és az úgynevezett kémiai hidridekre. A *fém-hidridekben* a hidrogén vagy közvetlenül, vagy egy komplex ion részeként fématomhoz kötődik. Ahogy az a 11. ábrán látható, fém-hidridekben való tárolással jelentősen növelhető a hidrogénmolekulák átlagos sűrűsége a gáznemű és folyékony hidrogénhez képest. Ezek nagy térfogati kapacitással, kedvező kinetikai és termodinamikai tulajdonságokkal rendelkeznek, emellett reverzibilisek. Azonban a gravimetrikus kapacitásuk a gyakorlatban meglehetősen alacsony (~2 tömegszázalék), és több évtizedes tanulmányozás után jelenleg sincs egyértelmű fejlesztési irányuk [26].

A *kémiai hidridek* teljes egészében nem fémes elemekből, hanem általában szén, nitrogén, bór, oxigén és hidrogén keverékéből állnak. Ha a hidrogén kémiaiilag kapcsolódik a tárolóanyaghoz, akkor jellemzően jelentős mennyiségű energia szükséges hő formájában a felszabadításához. Ezenkívül, a hidrogénfelszabadulás mellett a hidridben a struktúra- és hőmérsékletváltozás hatására új kötések alakulhatnak ki, illetve a folyamat hőfejlődéssel járhat, emellett a felszabaduló hidrogént meg kell tisztítani, ami általában jelentős energiafelhasználást tesz szükségessé.



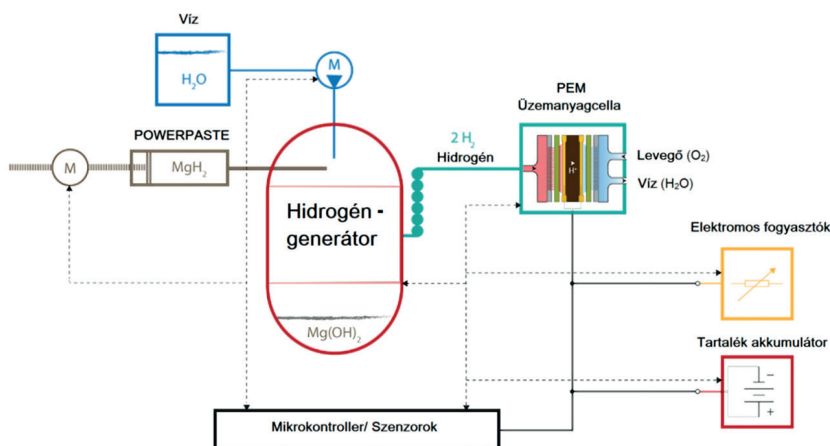
11. ábra

A hidrogénmolekulák átlagos sűrűsége különböző tárolási módszerek esetén [18]

Azonban az elmúlt években a Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology (IFAM) kutatói kifejlesztették a szilárd magnézium-hidrid alapú üzemanyagot, a hidrogén „Powerpaste”-et, amellyel jelenleg kis járműveket, (robozókat és motorkerékpárokat) működtetnek. Ez a paszta szobahőmérsékleten és nyomáson tárolható. Előállítását a magnézium és hidrogén 350 °C-on és 5–6 bar nyomáson való elegyítésével történik, amit visszahűtve krémszerű anyagot kapnak. A Powerpaste-alapú energiaellátás elvi vázlatát a 12. ábrán látható. A jármű tárolóegységéből dugattyú segítségével, a kívánt mennyiségben adagolva a Powerpaste kijuttatható, majd egy másik tartályból víz hozzáadásával olyan reakció megy végbe, amely során annyi hidrogéngáz keletkezik, ami mennyiségben dinamikusan igazodik az üzemanyagcella működési szükségleteihez (4. egyenlet). Ezt a folyamatot bizonyos hozzáadott fém sók és nem mérgező észterek segítségével olyan mértékben dinamikussá tették, hogy a hidrogéntermelés szinte azonnal leállítható vagy folytatható.



Valójában a Powerpaste a keletkező hidrogénnek csak egy részét adja; a maradék a befecskendezett vízből származik, ami megközelítőleg 10 tömegszázaléket jelent. Így energiasűrűsége 1,9 kWh/l, ami körülbelül tízszerese a Li-Ion akkumulátorénak. Ezért – a gyártó állítása szerint – gépjárművek, drónok és repülőgép-segédhajtóművek meghajtására is egyaránt felhasználható lesz.



12. ábra

Powerpaste-alapú energiaellátás általános vázlata [10]

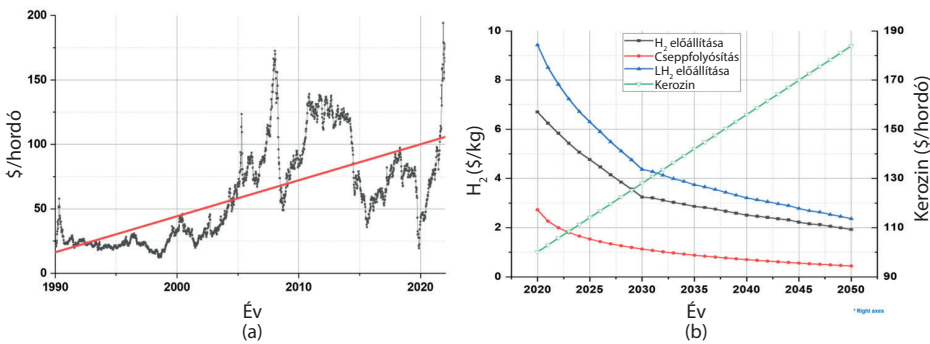
Ez a tárolási mód viszonylag biztonságos, mivel a bomlás megkezdéséhez 250 °C hőmérséklet szükséges. Ezzel a módszerrel a tankoláshoz csak a pasztát tartalmazó tartályt kell kicserélni, a vizes tartályt pedig feltölteni. Nem igényel drága infrastruktúrát, ellentétben a gáznemű vagy kriogén hidrogénnel. A Powerpaste szállítása is olcsó, mivel nincs szükség drága nagy nyomású tartályokra vagy a folyékony hidrogén tárolásához szükséges hűtésre. A Fraunhofer IFAM jelenleg egy olyan Powerpaste gyártó létesítményt épít, amely egyelőre évente négy tonna Powerpaste előállítására lesz képes [10].

6. Predikciók

A következő néhány évben számos hajtóműpróba és tesztrepülés várható világszerte, a hidrogénhajtású drónok tökéletesítése és a kis, közepes és nagy hatótávolságú utasszállító repülőgépek kereskedelmi forgalomba hozatala céljából. Többek között az Airbus ZEROe program keretén belül, a fejlesztés alatt álló három repülőgép első kereskedelmi járatát 2035-re tervezi. A ZeroAvia 2025-re 40–80 fős, 2030-ra 100–200 fős utasszállító repülőgépek üzembe állítását tervezi. Emellett figyelemreméltók a H2Fly GmbH, az AviationNovation LLC, a Pipistrel, a GKN Aerospace vagy az Urban Aeronautics Ltd. ilyen irányú fejlesztései, amelyek szintén a 2030 és 2035 közötti időszakra tervezik a hidrogénhajtású repülőeszközök gyártásának megkezdését.

A repülőipar kerozinról hidrogénre való átállásához, így az IATA Flightpath 2050 előírásainak való megfelelés, 2030-ra 114 Mt-val kevesebb JetA használatát feltételezi, ami

körülbelül 66%-os csökkenést jelent. Jelenleg a Nemzetközi Energiaügynökség adatai szerint a világszerte megtermelt hidrogén mennyisége hozzávetőlegesen 70 millió t, ami a 2021-ben a légi közlekedési ágazatban szükséges 116 millió t-nak csak a 60%-a. Ezen túlmenően számos területen – a légi közlekedésen kívül is – más hidrogénüzemű járművek számára is szükség van hidrogénre. Ezért az Egyesült Államok és Korea hidrogéngazdasági ütemtervet készített a gáz iránti gyorsan növekvő kereslet kielégítésére, a jelenlegi előállítási struktúráról a nagyüzemi gyártási rendszerre való átállással. Figyelembe véve a hidrogénalapú energiaigény növekedését és a termelési költségek csökkenését, várhatóan a repülőipar által igényelt H_2 mennyisége kielégíthető lesz. A kerozin eddigi hordónkénti árának emelkedéséből (13a. ábra) és a hidrogén előállításának költségeiből, ami a jelenlegi kisüzemek bővülése esetén várhatóan 50%-kal is csökkenni fog, előrevetíthető az árak alakulása (13b. ábra) [24].



13. ábra

A kerozin árának változása (a), kerozin és hidrogén árának előrejelzése (b) [24]

Összehasonlítva 2020-ban még a folyékony hidrogén (LH_2) ára 4,7–5,2-szerese volt a JetA üzemanyagénak, de 2030 után várhatóan az előbbi előállításának költsége alacsonyabb lesz, mint a keroziné [24]. Ezért, ha az átállás üteme fokozatos, akkor lehetővé válik a korai szakaszban a magas gyártási költségek miatti gyors költségnövekedés megakadályozása. Ehhez olyan infrastruktúra kiépítése kezdődött el, amely lehetővé teszi a hidrogén gyors, hatékony szállítását az előállítási helytől a felhasználóhoz vagy tárolási bázisra, illetve biztosítja annak egyszerű és biztonságos betöltését a légi járműbe. Azonban a folyamatos fejlesztés mellett az ehhez kapcsolódó működési és biztonsági rendszabályokat is naprakészen kell tartani, és biztosítani, hogy ez gazdaságilag is fenntartható módon történjen.

7. Összegzés

A légi közlekedés az egyik legnehezebben dekarbonizálható ágazat, a repülőeszközök hagyományosan nagy energiaigénye miatt. Az új generációs repülőgépek és hajtóművek tervezési lehetőségei a hagyományos üzemanyag-felhasználás hatékonyságfejlesztésének tekintetében a határaihoz közelednek. Mivel más ágazatok a fenntartható és alternatív energiaforrások felé fordulnak, a légi közlekedés iparágában is meg kell fontolni minden lehetőséget

a károsanyag-kibocsátás csökkentésére, a nemzetközi klímavédelmi egyezményekben elfogadott tervek, előírások megvalósítására. Noha vannak még alkalmazási kihívások, a hidrogén az egyik potenciális megoldás, amelynek felhasználása pozitívan hozzájárulhat az iparág fenntartható növekedéséhez, és nagymértékben csökkentheti a nettó károsanyag-kibocsátást. E gáz felhasználható repülőgépek meghajtására belső égésű motorokban való elégetéssel vagy üzemanyagcellák alkalmazásával elektrokémiai úton. Ezek a meghajtási módszerek merőben új repülőgép-konceptiókat is eredményeznek, mivel szükségessé válik a hidrogéntárolási lehetőség implementálása. Az eltérő rendszerteljesítmény és energiasűrűség miatt a hidrogén-égetés méretezhető közepes és nagy hatótávolságú repülőgépekre, míg az üzemanyagcellával való meghajtás jelenleg leginkább a rövid hatótávolságú repülőgépszegmensre, illetve a nagy hatótávolságú légi járművek alrendszerének táplálására alkalmazható. Repülés közben egyik verzió esetén sem történik szén-dioxid- vagy nitrogén-oxid-kibocsátás, a koromképződés pedig jelentősen csökkenthető az égetésnél, és teljesen kiküszöbölhető az üzemanyagcellás repülőgépekkel. A jelenleg is zajló kutatási és fejlesztési projekteknek köszönhetően a következő évtizedekben 50–90%-kal csökkenthető a repülés globális felmelegedést okozó károsanyag-kibocsátásának hatása. Ezen túlmenően ezek az innovációk nagymértékben hozzájárulhatnak az Európai Bizottság által elfogadott „European Green Deal”-ben a légi közlekedés károsanyag-kibocsátására vonatkozó csökkentési célok teljesítéséhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Hardingham-Gill, T., Airbus to Test Hydrogen-Fueled Engine on A380 Jet. *CNN*, 2022. február 25. Online: <https://edition.cnn.com/travel/article/airbus-test-hydrogen-fueled-engines-on-a380/index.html>
- [2] Balog K., „A hidrogén tárolása és annak korlátai,” *Energiaellátás, Energiatakarékosság Világszerte*, 44. évf. 7. sz. pp. 41–52. 2005.
- [3] Békési B., Sári J., „A kriogenika felhasználhatósága a modern repülésben,” *Repüléstudományi Közlemények*, 33. évf. 1. sz. pp. 137–156. 2021. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.11>
- [4] National Ocean and Atmospheric Administration, *Carbon Dioxide Now More Than 50% Higher than Pre-Industrial Levels*. 2022. június 3. Online: www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels
- [5] National Air and Space Museum, *Fuel Cell, Apollo*. é. n. Online: https://airandspace.si.edu/collection-objects/fuel-cell-apollo/nasm_A19780288000
- [6] Energy Efficiency & Renewable Energy, Alternative Fuels Data Center, *How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?* é. n. Online: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- [7] www.engineeringtoolbox.com
- [8] IPCC, *Sixth Assessment Report*. é. n. Online: www.ipcc.ch/assessment-report/ar6
- [9] Lahmer, K., Bessaih, R., „Thermal Effects of Kinetic Reaction Models on Hydrogen Absorption Modeling in Metal Hydride Tank,” in *Proceedings of CHT-15. 6th International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, 2015. május 25–29. pp. 1082–1091. Online: <https://doi.org/10.1615/ICHMT.2015.IntSympAdvComputHeatTransf.990>
- [10] Röntzsch, L., Vogt, M., *Power Paste for Off-Grid Power Supply*. Dresden, Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials IFAM, Branch Lab Dresden,

2019. február. Online: www.zess.fraunhofer.de/content/dam/ikts/zess/documents/POWERPASTE_WHITE_PAPER_2019.pdf
- [11] Crippa, M. et al., *CO2 Emissions of All World Countries – 2022 Report*. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2022. Online: <https://doi.org/10.2760/56420>
- [12] Goddin, N., *Hydrogen: Grey + Blue ≠ Green*. *Artemis*, 2022. január 12. Online: www.artemisfunds.com/en/gbr/institution/investment-insights/2022/jan/hydrogen-grey-blue-green
- [13] Manthey, N., *Zero Avia Completes Maidenflight with Hydrogen Aircraft*. *Electrive*, 2020. szeptember 30. Online: www.electrive.com/2020/09/30/zeroavia-completes-maidenflight-with-hydrogen-aircraft
- [14] Óvári Gy., Fehér K., „Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségszerűség kompromisszumokkal I. rész,” *Haditechnika*, 54. évf. 6. sz. pp. 5–10. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.54.6.02>
- [15] Óvári Gy., Szegedi P., „Hagyományos repülőgép-üzemanyagok kiváltásának lehetőségei és korlátai,” *Hadmérnök*, 5. évf. 4. sz. pp. 16–37. 2010.
- [16] Airbus удивила прототипами самолетов на водородном топливе. Подробности. *Neftegaz*, 2020. szeptember 25. Online: <https://neftgaz.ru/news/aviatehnika/632380-vodorodnyy-/>
- [17] Osenar, P., Sisco, J., Reid, C., *Advanced Propulsion for Small Unmanned Aerial Vehicles: The Role of Fuel Cell Based Energy Systems for Commercial UAVs*. Ballard, 2017. január. Online: www.unmannedsystemstechnology.com/wp-content/uploads/2017/02/White-Paper-Fuel-Cell-Energy-Systems-for-UAVs.pdf
- [18] Helmolt, R. von, Eberle, U., „Fuel Cell Vehicles: Status 2007.” *Journal of Power Sources*, 165. évf. 2. sz. pp. 833–843. 2007. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.12.073>
- [19] ISS Aerospace, *SENSUS 8 Unmanned Aerial System*. é. n. Online: www.issaerospace.com/sensus-8-hydrogen-uav/
- [20] Heiser, T., *Auxiliary Inverter Solutions for Fuel Cell Vehicle Turbo Compressor Applications*. *KEB*, 2019. január 28. Online: www.kebamerica.com/blog/fuel-cell-vehicle-auxiliary-inverter-solutions/
- [21] Bagotsky, V. S., *Fuel Cells*. ECS, Electrochemistry Encyclopedia, 2009. Online: <https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-f03-fuel-cells.htm>
- [22] Bellamy, W., „ZeroAvia Completes First Phase of Test Flights On Path to Hydrogen-Electric Turboprop.” *Aviation Today*, 2020. július 7. Online: www.aviationtoday.com/2020/07/07/zeroavia-completes-first-flight-path-hydrogen-electric-turboprop/
- [23] Wang, Y. et al., „A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research,” *Applied Energy*, 88. évf. 4. sz. pp. 981–1007. 2011. Online: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.030>
- [24] Choi, Y., Lee, J., „Estimation of Liquid Hydrogen Fuels in Aviation,” *Aerospace*; 9. évf. 10. sz. 564. 2022. Online: <https://doi.org/10.3390/aerospace9100564>
- [25] ZeroAvia Kicks Off US 19-seat Aircraft Testing and Demonstration Program on Path to Worldwide Application of its Powertrain Technology. *ZeroAvia*, 2022. május 6. Online: www.zeroavia.com/dornier-228-in-hollister
- [26] Yang, J. et al., „High Capacity Hydrogen Storage Materials: Attributes for Automotive Applications and Techniques for Materials Discovery,” *Chemical Society Reviews*, 39. évf. 2. sz. pp. 656–675. 2010. Online: <https://doi.org/10.1039/B802882F>

- [27] Békési B., Juhász M., „Pilóta nélküli légitársaságok energia forrásai,” *Economica*, 7. évf. 1. sz. 92–100. 2014. Online: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2014/7/1/4311>
- [28] Óvári Gy., Fehér K., „Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségesség kompromisszumokkal IV. rész,” *Haditechnika*, 55. évf. 3. sz. pp. 17–24. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.55.3.03>

The Present and Future of Hydrogen Use in Aviation

In recent years, an enormous amount of greenhouse gases have entered the atmosphere. A significant part of it is linked to aviation. Hydrogen is one of the most promising alternatives for replacing the currently used fossil energy sources, which are available in decreasing quantities. It can also be used as a propellant for energy production in traditional gas turbine engines, internal combustion engines and proton exchange membrane fuel cells. However, its storage, transportation and loading it into the aircraft is often a difficult or unsolved task. Multiple plans have been created to solve these problems. Their implementation is currently under way, with deadlines of 2030 and 2050. The purpose of this article is to give a comprehensive picture of the results achieved so far and to predict the possible future of the use of hydrogen.

Keywords: *fuel cell, hydrogen, powerpaste, decarbonisation, aviation, cryogenics*

Csató Péter, MSc
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola

csato.peter@stud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

Óvári Gyula, MSc, CSc
egyetemi tanár
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

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

Péter Csató, MSc
PhD student
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer
Training
Doctoral School of Military Engineering

csato.peter@stud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

Gyula Óvári, MSc, CSc
Professor
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

„A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”



AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ
PROGRAM