

Dr. Óvári Gyula\* – Fehér Krisztina\*\*

# Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségyszerűség kompromisszumokkal

IV. rész

A folyamatosan csökkenő mennyiségű hagyományos, fosszilis eredetű energiahordozók környezetkímélő kiváltására a légi közlekedésben jelenleg döntően az elektromos meghajtású repülőeszközök jöhetnek számításba. A tanulmány korábbi részeiben a szerzők áttekintették repülőeszközök működtetéséhez alkalmazott energiahordozók fajtáit, a környezetszennyezés csökkentése érdekében szóba jöhető alternatív energiahordozók kiválasztásának szempontjait, majd a repülés környezeti hatásait. Felvetették a dinamikusan növekvő légi forgalom és a környezetvédelmi szabályozás ellentmondásait, elemezték az alternatív-energia-bevezetés kényszerű lassulásának okait, valamint aggályokat fogalmaztak meg a 2050-ig tartó fejlődés lehetőségeiről. A tanulmány bemutatta a katonai repülés és a környezetszennyezés arányait, majd a nemzetközi társadalmi, politikai, katonai válságok, illetve a koronavírus-járvány hatásait vizsgálta a repülőiparra és a légi közlekedésre. Ezt követően önálló rész foglalkozott az elektromos meghajtású repülőeszközök gyors bevezetésének kényszerhelyzetével, valamint az azzal járó kompromisszumokkal. A sorozat IV. része előbb az akkumulátoros energiatárolás, majd a villamos meghajtás legfőbb nehézségeit mutatja be. A szerzők az UAV-k különböző típusain az adott eszközök elő-

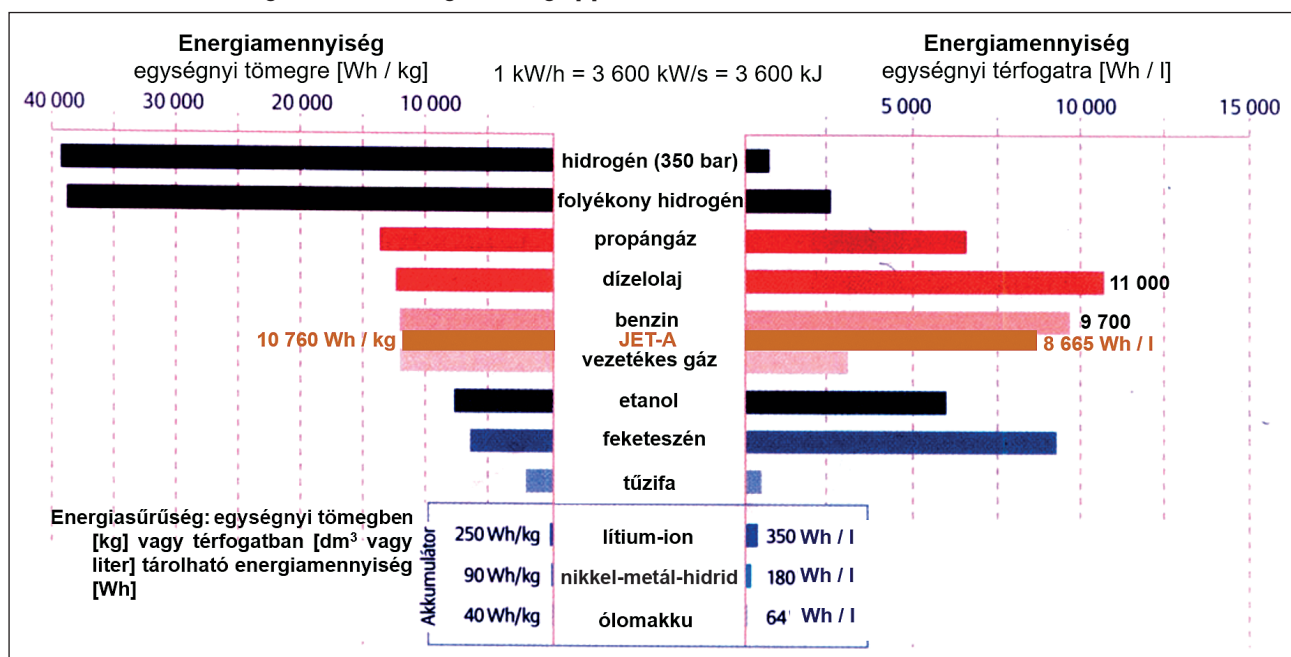
nyeit és hátrányait emelik ki. Ezt követően az érdeklődők a napelemes légi utántöltéssel, az új típusú akkumulátorokkal, valamint az üzemanyagcellák alkalmazásának egyes változataival ismerkedhetnek meg.

## AZ AKKUMULÁTOROS ENERGIATÁROLÁS NEHÉZSÉGEI

Több mint egy évszázada ismert, hogy a legmagasabb hatásfokú elektromos meghajtás neuralgikus eleme a meghajtáshoz szükséges energia tárolására szolgáló akkumulátorok számos – napjainkig megoldatlan – kedvezőtlen sajátossága. Ezek közül a jelentősebbek:

- alacsony *energiasűrűség* (28. ábra). (Összevetésként: a benzin, gázolaj 1 dl-ében kb. akkora energiamennyiség található, amennyit egy 20 kg-os ólomakkumulátor tárolni képes);
- hosszú feltöltési idő. A gyorsított alkalmazása azonban nagymértékben lerövidíti az akkumulátor üzemidejét (a garantált feltöltésszámát akár 50-70%-kal!);
- a normál feltöltések számával is arányosan csökken az energiatároló kapacitásuk, így élettartamuk (üzemidejük) is csökken. (Ennek költsége magas, elektromos

28. ábra. Különböző energiahordozók energiasűrűsége [1]



\* Egyetemi tanár, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék. ORCID: 0000-0002-9876-6760

\*\* Tanársegéd, NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék. ORCID: 0000-0002-5057-733X





29. ábra. DJI AGRAS T-16 UAV 2020. 03. 16-án fertőtlenít az KFK rákospalotai telephelyén (Fotó: Szalkai István)

személygépkocsi esetében is milliós nagyságrendű kiadás, de pl. egy 12 személyes elektromos meghajtású repülőgépnél (többek között az Eviation Aircraft által gyártott Alice repülőgép esetében), ~75 millió Ft 3000 repült óránként);

- a folyékony üzemanyagoktól eltérően, repülés közben nem csökken a tömegük;
- a legjobb hatásfokú lítium-ion akkumulátor is tűz- és robbanásveszélyes.

Napjainkban egy kizárólag – akár a legkorszerűbb – akkumulátorral táplált elektromosan meghajtott repülőgéppel folyamatosan legfeljebb 15-30 percet lehet repülni.

Ezt jól érzékeltetik pl. egy hazánkban is mezőgazdasági célra fejlesztett, de a COVID-19 világjárvány idején nagyvárosi üzemi fertőtlenítésre is eredményesen alkalmazott, (29. ábra) korszerű, ~40 kg felszállótömegű (ebből maximum 15 kg hasznos terhelhetőségű), listaáron 5 000 000 Ft értékű, kínai gyártmányú DJI AGRAS T-16 UAV (30. ábra) akkumulátorának műszaki adatai.



30. ábra. DJI AGRAS T-16 UAV [2]

A Li-Po akkumulátor (a 31. ábrán, a jobb oldalon) töltését egy 2600 W teljesítményű intelligens rendszer vezérli (31. ábra)

31. ábra. 2600 W-os intelligens akkumulátortöltő rendszer [2]



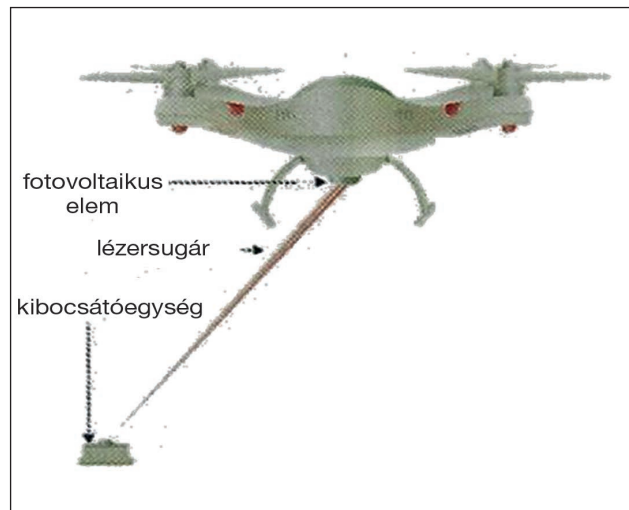
bal oldal), amely folyamatosan figyeli az egyes kockázati tényezőket, és segít az akkumulátort ideális állapotban tartani. Egyszerre 4 db akkumulátor töltésére képes, de ha egycsatornás módban használják, a töltési idő 20 percre csökken.

A 14 cellából álló, 17 500 mAh kapacitású, 51,8 V feszültséget biztosító, új áron a kereskedelemből ~400 000 Ft-ért beszerezhető IP54<sup>3</sup> besorolású, intelligens repülőgép-akkumulátorblokkot fémháza építették, az előző generációhoz képest 140%-kal megnövelt hőelvezetési kapacitással. Akár 400 normál töltési ciklus is elérhető vele – ez mindössze 120-200 repült óra! –, (gyorstöltéssel azonban ennek alig harmada lehetséges).

### A VILLAMOS MEGHAJTÁS ALKALMAZÁSÁNAK LEGFŐBB NEHÉZSÉGE

Mivel a napjainkban ismert akkumulátorokkal nem várható a 15–40 perces repülési időtartam érdemi növekedése, a szakemberek a jelenleg is zajló fejlesztési kutatások gyakorlatban is megbízhatóan alkalmazható eredményeinek megjelenéséig törekednek a drónok gyors, repülés közben történő utántöltési eljárásainak kimunkálására. Ezek lényege, hogy az UAV-k egy olyan elektromágneses térbe repülnek be és maradnak abban a szükséges ideig, ahol annak energiájából, azt átalakítva, képesek feltölteni saját akkumulátoraikat elektromos árammal.

### FELTÖLTÉS LÉZERSUGÁR SEGÍTSÉGÉVEL (FEJLESZTŐ: EPFL/LAKEDIAMOND, US ARMY)



32. ábra. Drón akkumulátorainak feltöltése lézersugár alkalmazásával, repülés közben [3]

A svájci lausanne-i műszaki egyetemen (EPFL<sup>4</sup>) kidolgozott rendszer lényege (32. ábra), hogy az emberre nem veszélyes lézersugárral megvilágítják a drónokra szerelt napelemeket, így repülés közben is lehetséges az utántöltés, de ideális esetben akár az akkumulátor nélküli haladás is. Az elképzelés szerint egy adott útvonalon és/vagy területen kiépített toronyhálózat folyamatos repülést tehet lehetővé.

*Előny:* nagy távolságból is működik, repülés közben, leszállás nélkül alkalmazható.

*Hátrány:* a sugár útjában nem lehet akadály, s így a köd, a szmog, vagy más légköri jelenség számottevően rontja a rendszer hatásfokát.



33. ábra. Dróntöltő indukciós hexaéderrács (szerzői montázs gyári videók és a [3] alapján)

**INDUKCIÓ A LEVEGŐBEN (FEJLESZTŐ: GLOBAL ENERGY TRANSMISSION)**

Az orosz háttérű Global Energy Transmission (GET) szabályos hexaéder kialakítású dróthálózata elektromágneses teret hoz létre, (33 a) ábra) amit a drón vevője az akkumulátor töltéséhez megfelelő árammá alakít át. A gyártó közlése szerint néhány perc alatt újabb félórás működéshez szükséges energiával tölthető fel a drón, sőt egyszerre akár több eszköz is.

Az ilyen töltőállomások kialakítása ugyan helyhez kötött, de – megoldott egyszerű telepíthetőségük is – megfelelő sűrűségű elhelyezésükkel hosszabb útvonal és/vagy nagyobb terület is lefedhető az UAV-k hosszabb idejű repüléséhez (33 b) ábra).

*Előny:* leszállás nélkül, egyszerre több UAV is tölthető.

*Hátrány:* óvni kell a töltési zónát.

**INDUKCIÓ A FÖLDÖN (FEJLESZTŐ: WiBOTIC<sup>5</sup>)**

Az UAV földfelszínén telepített, kis platformokra száll le (34. ábra), ahol a létrehozott elektromágneses térből (a mobiltelefonokhoz hasonlóan) fejlesztnek áramot.

*Előny:* magas töltési hatékonyság.

*Hátrány:* le kell szállni a töltés idejére.

Az ilyen töltőállomások kialakítása is helyhez kötött, de megfelelő sűrűségű telepítésükkel hosszabb útvonal és/vagy nagyobb terület is lefedhető az UAV-k hosszabb idejű



34. ábra. Dróntöltő indukciós platform (szerzői montázs a [4] alapján)

repüléséhez (tömege és mérete) egyszerű mobilizálhatóságot is biztosít.

Megjegyzendő, hogy a „vezeték nélküli” töltési eljárások mindegyike igen rossz hatásfokkal bír, tehát ha a szükséges töltőáram nem zöld forrásból származik, akkor az alkalmazásuk környezetvédelmi szempontból nem előnyös.

**LÍTIUMION-AKKUMULÁTOR HATÉKONYSÁGNÖVELÉSE ASZIMMETRIKUS HŐMÉRSÉKLETŰ TÖLTÉS-FOGYASZTÁSSAL**

A lítiumion-technológia onnan kapta a nevét, hogy a töltést lítium ionok tárolják, amelyek töltéskor a negatív – kezdetben szénalapú, jelenleg már biztonságosabb, többrétegű, lítium-kobalt-oxid (LiCoO<sub>2</sub>) vagy lítium-vas-foszfát (LiFePO<sub>4</sub>) esetleg néhány más, rokon vegyület anyagú – elektródához (2. táblázat), kisütéskor pedig a pozitív fém-oxid- elektródához vándorolnak.

2. táblázat. Lítiumion-akkumulátor katódjának néhány anyaga és elektromos jellemzője

Anyaga	Átlagos feszültség	Fajlagos kapacitás
LiCoO <sub>2</sub>	3,7 V	140 mAh/g
LiMnO <sub>2</sub>	4,0 V	100 mAh/g
LiFePO <sub>4</sub>	3,3 V	170 mAh/g
Li <sub>2</sub> FePO <sub>4</sub> F	3,6 V	115 mAh/g

Az anódot és a katódot elválasztó elektrolit lítiumhexafluorofoszfát (LiPF<sub>6</sub>) vagy újabban a kevésbé korrodáló lítium-tetrafluoroborát (LiBF<sub>4</sub>), általában folyékony, szerves oldatok.

Ezeknél az akkumulátoroknál a gyorsöltés (XFC – eXtreme Fast Charger) alapvető kedvezőtlen sajátossága, hogy az jelentősen csökkenti élettartamukat (garantált töltési-kisütési ciklusszámukat), mivel felmelegednek és fokozódik anódjukon a lítiumlerakódás, amely járulékosan tűz- és robbanásveszéllyel is párosul.

Kutatásokon alapuló tapasztalatok szerint ez utóbbi hiányosság megszüntethető aszimmetrikus hőmérsékletű töltéssel és fogyasztással. Pontosán meghatározott hőmérsékletű (60 °C-os!) és időtartamú (nem több mint 10 perc!) töltés esetén (35 a) ábra) kevesebb lítiumlemezlerakódás jön létre, mivel a rövid időtartammal elkerülhető az akkumulátoron más káros képződmény, az úgynevezett szilárd-elektrolit-interfázis (SEI) növekedése. Ennek következtében megmarad az eredeti normál töltésnél garantált 1700 töltési ciklus is. Ugyanakkor a fűtés nélküli, ugyanilyen intenzitású gyorsöltésnél, mindössze 60 ciklus után már számottevően romlik az energiatároló képesség. (35 b) ábra.)

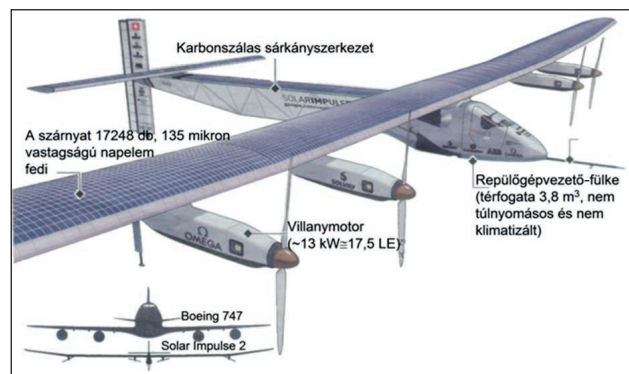
Az aszimmetrikus hőmérsékletű gyorsöltés és a kisütés módszere új lehetőséget nyújt az elektromos szállítás hatékonyságának javítására. A 35. ábrán bemutatott 9,5 Ah-ás 170 Wh/kg-os cella, 1700 XFC töltési ciklust követően (60 °C-os töltési hőmérséklet mellett pontosan 10 perc

alatt) 80%-os töltöttségi állapotba hozva, névleges kapacitásának mindössze 20%-át veszítette el.

További kedvező tapasztalat, hogy a megemelt töltési hőmérséklet lényegesen csökkenti az akkumulátor hűtési igényét. (Ugyanakkor ne feledkezzünk meg arról, hogy a hűtésnek is jelentős az energiaigénye, tehát a teljes töltőberendezést vizsgálva itt is jelentősen romlik a hatékonyság)

**ELEKTROMOS TÁROLÓKAPACITÁS NÖVELÉSE NAPELEMES LÉGI UTÁNTÖLTÉSSSEL**

Merev szárnyú repülőgépeken – a napelemekkel beborítható, megfelelően nagy sárkány (törzs, szárny és vezérsík) felületek miatt – potenciálisan megoldható az akkumulátorok környezetbarát utántöltése, amely az ezredfordulóra demonstrációs jelleggel meg is valósult.

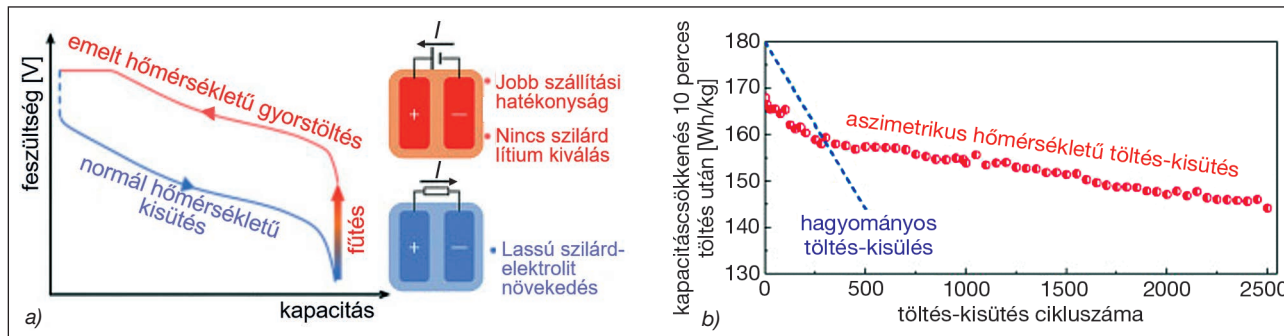


36. ábra. Solar Impulse 2 kísérleti napelemes repülőgép [6]

Az e célra épült Boeing 747-est meghaladó, 71,9 m-re növelt szárnyfesztávolságú, egyszemélyes, 2300 kg tömegű Solar Impulse 2 repülőgép (36. ábra) hőszigetelt konténerekben elhelyezett 633 kg tömegű lítium-polimer akkumulátorát 17 248 db, 135 mikron vastagságú, összesen 269,5 m<sup>2</sup> felületű napelem táplálta és egyben működtette is a 4 db, egyenként 13,5 kW teljesítményű korszerű, kefék és érzékelők nélküli motorját is. A napelemekből kinyert energia olyan sikeresen kiszámított volt, hogy annyi felesleggel sem rendelkezett az átlagosan 70 km/h repülési sebesség mellett, hogy a világszerte körüli út során akár a legegyszerűbb, csupán értékeltartásra képes robotpilóta beépítését és működtetését lehetővé tette volna.

Természetesen ez a megoldás – nagy szabad (szárny-) felületek hiányában – forgószárnyas légi járműveken egyáltalán nem alkalmazható.

35. ábra. Aszimmetrikus hőmérsékletű töltés-fogyasztás ciklusának karakterisztikája és hatása a garantált működési ciklusszámra [5]



## PSZUDOMŰHOLDOK

Ugyanakkor a napelemes energiaellátás – néhány év eltelével, a technika további fejlődése eredményeként – mégis lehetővé tette egy új repülőeszköz-kategória, a pszeudoműholdak (HAPS, High Altitude Pseudo-Satellites) megjelenését. Ezek olyan, rendszerint felderítő vagy mikrohullámú átjátszó funkciójú, napelemekkel táplált, speciális UAV-k, amelyek a jelenlegi repülőgépek (és drónok) számára túlzottan magas, a műholdak számára túlzottan alacsony, azaz  $H > 20$  km-es repülési magasságú tartományban működnek, folyamatos, leszállás nélküli 15–120 napos repülési idővel.

Már létező kísérleti légi jármű az Airbus Zephyr-S. A 75 kg saját tömegű, 25 m fesztávú drón néhány tíz kilogramm teherrel, 3 hónapon keresztül képes a levegőben maradni  $H \approx 21$  km repülési magasságban. Éjszakai működését a napközben napelemeivel utántöltött akkumulátorok biztosítják. (37. ábra, alsó repülőgép)



37. ábra. Airbus Zephyr-S (a képen alul) és Zephyr-T pszeudoműholdak [7]

A brit védelmi minisztérium állította szolgálatba a továbbfejlesztett, nehezebb Zephyr-T modellt (saját tömege 140 kg, fesztávolsága 33 m), amelynek repülési magassága 21 km és 3 hónapig képes folyamatosan, leszállás nélkül repülni (a 37. ábrán a felső eszköz). Bevethető katasztrófahelyzetekben, kutatásra, pl. olajfolt, erdőtűz terjedésének megfigyelésére, de internetkapcsolatot is biztosíthat egy 125 km<sup>2</sup>-es övezetben és/vagy a közönséges rádiótelefon hatótávolságát 300 km-re növeli. Az eszközzel határszakaszok is ellenőrizhetők, és katonai célokra is alkalmazható. Ezáltal részben kiválthatják a nehézkesebben és költségesebben pályára állítható (és ott tartható) műholdakat, illetve olyan feladatokat is elláthatnak, amelyek jelenleg a gyorsan lemerülő akkumulátorokkal működtetett drónokkal nem valósíthatók meg.

## ELEKTROMOS TÁROLÓKAPACITÁS-NÖVELÉS ÚJ TÍPUSÚ AKKUMULÁTORRAL

Hosszú ideje, több országban is átfogó kutatások folynak az akkumulátorok kapacitásának meg többszörözésére, lehetőség szerint érdemi, nagyságrendekkel történő javítására.

### LÍTIUM-KÉN AKKUMULÁTOR

Az energiatároló képesség (energiasűrűség) javítására jelenleg olyan lítium-kén (Li-S) akkumulátorokat fejlesztettek, amelyek *tárolókapacitása ötszöröse a mai lítiumion-akkumulátorokénak* úgy, hogy több mint 200 töltési ciklus után is megtartják eredeti kapacitásuk 99%-át. Valójában ennek kimunkálása már korábban megkezdődött, de akkor nem

sikerült azt a problémát megoldani, hogy a kénelektrod – amely a töltési-lemerülési ciklusok során kitér, majd összeszuszorodik és ilyenkor térfogatváltozása akár 78%-os is lehet – a használat során nagyon gyorsan elbomlik (tönkremegy). Ezért a tárolóképeség növelésével járó előnyök a gyakorlatban nem voltak érvényesíthetők a rövid élettartam miatt. Ezt a gondot eredetileg úgy próbálták orvosolni, hogy olyan adalékanyagokat adtak az akkumulátorhoz, amelyek egymáshoz kötötték az elektrod anyagait, megakadályozandó a szükségszerű repedést, majd szétesést. (Hasonló elektrodterefogat-változás egyébként a ma használatos lítium akkumulátorokban is végbemegy.)

Az újabb kutatások eredményeként azonban gyártáskor nagyobb helyet biztosítottak a szabad tágulásra az elektrodnak, így csökkentve a szerkezeti feszültséget. Az elektrod részecskéinek rögzítéséhez pedig sokkal lazább, cellulózpolimer-szálakat használtak, megőrizve ezzel a szerkezet integritását.

A fejlesztők szerint a lítium-kén elemek elterjedésével drasztikusan zuhanhat a járművekben használatos akkumulátorok ára, mivel ezeknél azonos kapacitáshoz kisebb tömeg beépítése is elegendő, valamint a kén lényegesen gyakoribb és olcsóbb, mint a most használatos ritkaföldfémek. Ritkaföldfémeket a Li-ion akkumulátorok katódjában alkalmaznak, ez az elektrod a jövőben kénből készülne. A Li-S akkumulátorok gyártástechnológiája még nem elég kiforrott, és a nagyobb energiasűrűség miatt a robbanásveszélyessége is nagyobb a manapság általánosan használt akkumulátorokhoz képest, amely késlelteti piaci megjelenését és elterjedését.

### NÁTRIUM-ION AKKUMULÁTOR

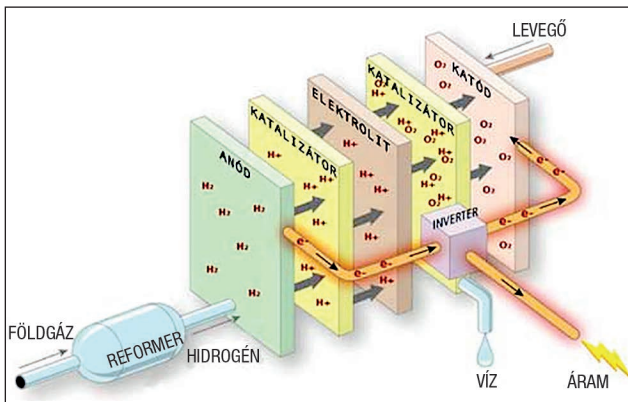
A jelenleg még fejlesztés stádiumában lévő nátriumion-akkumulátor hatékonysága ugyan közel azonos a lítiumionéval, de nem igényli az ahhoz szükséges, nehezen beszerezhető anyagok többségét (pl. kobalt). A nátrium, mint alapanyag sokkal olcsóbbá és egyszerűbbé teszi gyárthatóságát is. Ezenkívül mentes a – lítium-ion és lítium polimer akkumulátoroknál magas feszültség vagy hő hatására létrejövő – tűz- és robbanásveszélytől is.

Az eddigi fejlesztés legfontosabb feladata az volt, hogy kiküszöböljék a katódként használható alapanyagok felületén kialakuló olyan inaktív nátrium-kristályréteg létrejöttét, amely károsíthatja az eszközt és gátolhatja a kémiai reakciót. Ennek érdekében létrehoztak egy rétegelt fénoxid katódot, és kifejlesztettek egy folyékony elektrolitot, amely extra nátriumionot tartalmaz. Így az akkumulátorba egy só-sabb keverék kerül, a katód hatékonyabbá válik, és nem csapódik ki kristály. Az ellenőrző kísérletek során 1000 ciklus után csak a névleges kapacitásának 20%-át veszítette el. Ez a technológia ugyan még további fejlesztést igényel, de így is jelentős lépés a tényleges gyakorlati használhatósága felé.

### ÜZEMANYAGCELLA ALKALMAZÁSA

A repülőeszközök villamos meghajtása, az elektromos energia, a jelenlegi akkumulátoroknál lényegesen kisebb szerkezeti tömegű és magasabb hatásfokú energiasűrűségű tárolását, illetve át- (oda-vissza) alakítását feltételezi. Ennek egyik lehetséges és ígéretes megoldása pl. a *hidrogénnel működő HPEM* (Hidrogen proton-exchange membrane – hidrogén proton áteresztő membrán) üzemanyagcella (38. ábra).





38. ábra. Földgázból létrehozott hidrogénnel működő HPEM-üzemanyagcella [8]

Ez a megoldás rendszerint két elektródából (anódból és katódból), valamint a köztük lévő elektrolit és katalizátor rétegekből áll. A folyamat során – amely a villamos árammal történő vízbontás fordítottja – a katalizátor (általában platina) segítségével a hidrogénmolekulák protonokra és elektronokra szakadnak szét. Ennek fázisai:

- az anódon hidrogén, a katódon pedig oxigén halad át;
- katalizátor segítségével a hidrogénmolekulák protonokra és elektronokra bomlanak;
- a protonok keresztáramlanak az elektroliton és mielőtt az elektronok áramlása elérné a katódot, felhasználhatóvá válik az elektromos fogyasztók számára;
- a katódra érkező elektronok a katalizátor segítségével egyesülnek a protonokkal és az oxigénmolekulákkal, így iható minőségű vizet hoznak létre. A folyamatban semmilyen környezetkárosító anyag, hatás nem jön létre;
- energiatárolóként az akkumulátorok hatásfoka meghaladja a 90%-ot, a PEM-celláknál jelenleg ugyanez ~70%;
- inverter segítségével váltóáram is kinyerhető (természetesen veszteség mellett).

Az üzemanyag-átalakító (reformer) képessé teszi a rendszert, hogy az bármilyen szénhidrogén alapú üzemanyaggal működjön. A hidrogén helyett felhasználható alkohol is, ekkor az áram mellett víz és szén-dioxid keletkezik. Utóbbi miatt, környezetvédelmi, valamint nyersanyag-utánpótlási megfontolásból a hidrogéngáz alkalmazhatóságát preferálják.

Kedvező, hogy az üzemanyagcellákban – a hagyományos akkumulátorokhoz viszonyítva – azonos térfogatban kisebb szerkezeti tömeg mellett, lényegesen több energia tárolható. További előnyük a belső égésű motorokhoz képest, hogy hatásfokukat elméleti termodinamikai határok nem korlátozzák, míg a belső égésű motoroknál ezt a Carnot-ciklus<sup>6</sup> által meghatározott termodinamikai határok szabják meg.

Természetesen a hidrogéngáz egységnyi térfogatra vonatkoztatott alacsony energiasűrűsége okozta tárolási nehézséget az üzemanyagcella működtetésénél is meg kell oldani (vö. 28. ábra). Ez abból adódik, hogy a hidrogén egységnyi tömegének energiatartalma (égéshője 119,324 kJ/kg) lényegesen magasabb, mint a keroziné (42,915 kJ/kg) vagy a benziné. Sűrűsége azonban (0 °C-on és normál környezeti nyomáson 101,3 kPa) rendkívül kicsi  $\rho_{H_2} = 0,0899 \text{ kg/m}^3$ . Így szobahőmérsékleten és normál nyomáson, 1 kg  $H_2$  gáz tárolásához 12 m<sup>3</sup>-es tartályra lenne szükség.

Ebből adódóan energetikai célú felhasználása vagy cseppfolyósítva (kriogén formában, LH – Liquid Hydrogen) ami [(-253)÷(-262) °C] hőmérséklet-tartományba hűtve, vagy magas nyomású gázként (Gas Hydrogen – GH, a

bevezetendő szabványnak ajánlott 700 baron), esetleg e kettő kombinációjában cseppfolyósítva pl. 350 baron célserű. A cella működése szempontjából közömbös, hogy cseppfolyósított vagy gáz halmazállapotú hidrogénnel táplálják, mert a hidrogént tároló tartály és a PEM-cella között minden esetben elhelyezkedik egy nyomásszabályozó. (Amely a cellaműködés szempontjából optimális, 6 bar körüli értékre állítja be a hidrogén nyomását.)

A kriogén változathoz 1 m<sup>3</sup> tartálytérfogatban ~70 kg, 700 barra sűrítve, gázhalmazállapotban 40÷50 kg tömegű hidrogén tárolható.

Ebből adódóan hiába a hidrogén kerozinénál magasabb égéshője, rendkívül kis sűrűsége miatt a kerozinnal azonos energiamentiségű akár cseppfolyósítva, akár megnövelt nyomáson is csak 3,8–4,2-szeres tartálytérfogatban helyezhető el. Ráadásul kriogén alkalmazás esetén a tartályok aktív hűtése, magasnyomású gázként pedig – szilárdsági megfontolásból – a tárolótérfogat kizárólag hengeres és/vagy gömb kialakítása (39. ábra) nehezítené az optimális szerkezeti kialakítást. Utóbbi miatt pl. nem is lehetséges a szárnyban gázt tárolni.

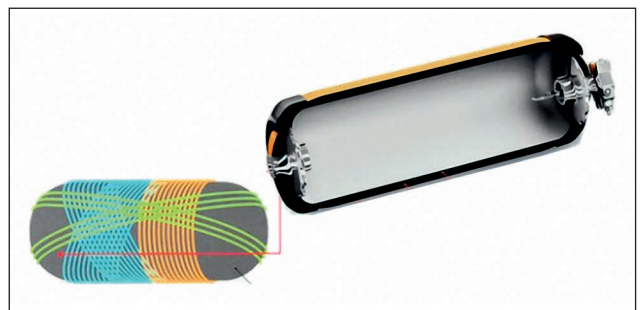
A kriogén üzemanyagtartály vastag passzív és folyamatos energiaigényű aktív hőszigetelést igényel. Állóhelyen a repülőgép feltöltve hosszabb ideig nem tárolható. A cseppfolyósított gázokkal üzemelő légi járművek tüzelőanyag-gal történő feltöltése (leszívása) különbözik a benzines és kerozinos rendszerektől és bonyolultabb is. A töltő-leszívó berendezés hermetikusan és hőszigetelten csatlakozik a repülőgép csatlakozójához. Az összekapcsolás előtt célszerű semleges gázrendszerből héliummal átfúvatni az összekötő csöveket és csatlakozókat annak érdekében, hogy a repülőgép tüzelőanyag-rendszerébe ne kerüljön levegő (O<sub>2</sub>!). (Az üres tartályok feltöltése ugyan csak a teljes rendszer héliummal történő átfúvatásával kezdődik).

Amennyiben a légi jármű hosszabb ideig tartózkodik az állóhelyen, a cseppfolyós  $H_2$  halmazállapot-változásának megakadályozására vákuumszivattyúval a gázneművé vált, felmelegedett hidrogént elszívják, és helyére a tartályok folyadék feletti terébe hűtött LH-t vezetnek, vagy a tüzelőanyag-rendszer biztosító szelepe teszi lehetővé a felmelegedett, gáz-halmazállapotúvá vált  $H_2$  távozását a szabadba. Ez a megoldás akár töltéskor, akár katasztrófa esetén kevésbé tűz- és robbanásveszélyes, de mindenképpen költséges. Zárt térben történő alkalmazása tilos.

Az üzemanyagcella táplálására használatos nagynyomású (350 és 700 bar), sűrített hidrogéngáz tartálytérfogatát biztonsági megfontolásból rendszerint több kisebb tartályból alakítják ki. A gázok fizikai sajátossága miatt ennek 6-9%-a nem is nyerhető ki.

A nagy belső nyomásból adódó szilárdsági követelmények miatt, a szénszálak kompozitból készült nagy falvastagságú tartály félgömbökben végződő hengeres szerkeze-

39. ábra. 700 bar üzemi nyomású hidrogéngáztartály [9]



ti kialakítású, amelynek belső falára külön tömítő réteget hordanak fel, kívülről pedig üvegszál-erősítésű bevonat hivatott a pontszerű becsapódásoktól (pl. lövedék) megóvni (39. ábra). Egy 5 kg, 500 bar nyomású H<sub>2</sub> befogadására alkalmas ilyen tartály üres tömege 87,5 kg. (Pl. ezek a műszaki jellemzői a Toyota legújabb hidrogén-üzemanyagcellás, Mirai elnevezésű autójának).

**Megjegyzés**

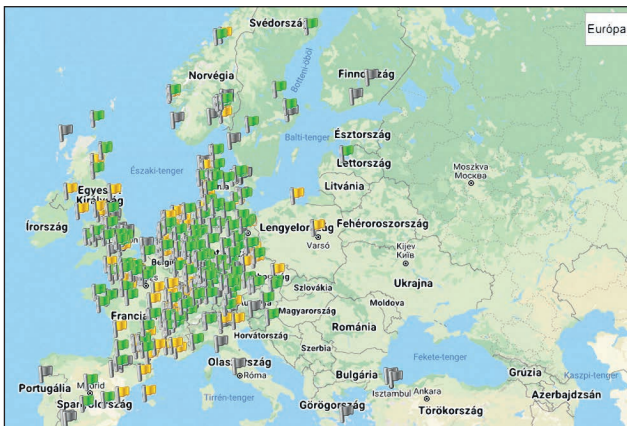
- a teszteken a tartályok a 80 km/h ütközést, a 150 tonna terhelést és (a nem részletezett paraméterekkel bíró) lövedékek becsapódását sérülésmentesen elviselték;
- ütközéskor a tartályokból a kivezetés azonnal zárul;
- a tartálycsoport a térfogattól függően ~10 perc alatt töltőkocsiról, palackból bárhol teljesen feltölthető;
- kis tömegű hidrogén akár helyben is előállítható viszonylag egyszerű, könnyen mobilizálható berendezéssel is (40 a) ábra). Gazdaságossági szempontból lényeges, hogy ilyenkor ~10 euró önköltséggel számítható 1 kg hidrogéngáz létrehozása. Természetesen ezt az összeget a rárakódó közterhek számottevően megnövelhetik;
- Nyugat-Európában már több mint 100 helyen léteznek 350 és 700 báros szabványos hidrogén-töltőkutak a közúti és városi közlekedésben (40 b) ábra), sőt hozzájuk standard töltőpisztolyt és csatlakozót is rendszeresítettek (40 c) ábra). A vízbontással működő kút esetén 1 kg hidrogén 14,4 liter vízből állítható elő, a 350 bar nyomású változathoz 46,8 kWh, 700 barhoz 68,4 kWh villamos áram szükséges (Ivys Simple Fuel töltő kút). A legkorszerűbb ipari vízbontók 35-40 bar nyomású H<sub>2</sub>-t hoznak létre;



40. ábra. Hidrogénfejlesztő és -töltő berendezések [9]

- a hazai fejlesztés és alkalmazás nem elhanyagolható logisztikai hiányossága, hogy ilyenekből nálunk, sőt egész Közép- és Kelet-Európában jelenleg még egyetlen darab sincs, bár 2021-re kettő telepítésére van ígéret (41. ábra).

41. ábra. Hidrogén-üzemanyag-töltő kutak elhelyezkedése Európában (2021-es adatok szerint) [10]



- hidrogén üzemanyag alkalmazására vonatkozó NATO STO-<sup>7</sup> és EDA<sup>8</sup>-kutatások jelenleg is zajlanak. Körvonalazódik egy európai együttműködés a hidrogénnel történő ellátás infrastruktúrájának polgári és katonai kiépítésére, amelynek hazai megvalósítása is elkerülhetetlen mindkét változatban.<sup>9</sup>

A leggyakoribb hidrogén-előállítási eljárás legfontosabb része az elektrolízis, a vízből a hidrogén kinyerése. Ehhez ugyanis több áramot kell felhasználni, mint amennyi később, a hidrogén „elégetésekor” keletkezik. A valóságban jóval több áramot kell a rendszerbe juttatni, mint amennyi kinyerhető belőle. Ennek arányát további kutatásokkal próbálják csökkenteni. Környezetvédelmi szempontból lényeges, hogy az elektrolízishez használt áram honnan származik. A hidrogén előállításának költségei azonban lényegesen csökkenthetők, az így létrejövő elektromos áram „tisztává tehető”, ha a nyaranta – a hazánkban is támogatott és intenzíven fejlesztett tiszta, alternatív energiát szolgáltató – naperóművek energiafeleslegét hidrogénné alakítva tárolják tetszőleges ideig, majd amikor szükséges, feltöltik a járművek üzemanyag-celláiba. Természetesen ennek tagadhatatlan árnyoldala a több lépcsőben történő energiaátalakítás akkumulálódó vesztesége. Amennyiben nem megújuló forrásból állítanak elő hidrogént – pl. hőerőműből nyert villamosárammal –, akkor a jármű csak lokálisan tekinthető környezetbarátnak, a károsanyag-kibocsátást csak „kiszervezi” az áramot előállító erőműbe. Jelenlegi elsődleges cél a karbonmentes (szennyezésmentes) előállítási, felhasználási ciklus megteremtése.

Mivel a hidrogén egységnyi tömegéből nyerhető égéshője 2,7-szerese a kerozinénak és igen kedvező az égési karakterisztikája is (lángterjedési sebesség, hőmérséklet-megoszlás), valamint egyetlen gáz, amelynek elégetésekor égéstermékéből hiányoznak a szénhidrogének (3. táblázat), már az 1990-es évektől vizsgálták alkalmazási lehetőségét belsőégésű hajtóművek üzemanyagaként.

3. táblázat. Kerozin és cseppfolyósított hidrogén égési melléktermékei

Égéstermék	Kerozin	LH <sub>2</sub>
Elsődleges égéstermék	CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Égési melléktermék és az atmoszférával való reakciók termékei	HC → O <sub>3</sub> NO <sub>x</sub> → O <sub>3</sub> CO → O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O NO <sub>x</sub> → O <sub>3</sub>

1 kg kerozin elégetésekor 3,16 kg szén-dioxid (CO<sub>2</sub>) és 1,25 víz (H<sub>2</sub>O) keletkezik. 1 kg hidrogén elégetésekor 9 kg H<sub>2</sub>O jön létre. 0,36 kg hidrogén 1 kg kerozinak megfelelő energia-tartalommal rendelkezik, ennyi hidrogén elégetése 3,21 kg vizet eredményez. A cseppfolyós hidrogén elégetése sem üvegházhatású CO<sub>2</sub>-t, sem a kerozin elégetésekor keletkező más mérgező melléktermékeket nem hoz létre, kivéve a nitrogén-oxidokat. A hidrogénből azonban 2,6-szor több víz keletkezik, ami nagy magasságokban szintén kedvezőtlenül befolyásolja az üvegházhatást.

**KIS MÉRETŰ eVTOL DRÓN MŰKÖDTETÉSE HIDROGÉNCÉLLÁVAL**

A jelenleg beszerezhető legkorszerűbb akkumulátorok által biztosított rövid repülési időtartam, hatótávolság és ma-



gasság érdemi javítására a 20-40 kg felszálló tömegű drónok piacán is megjelent a hidrogén üzemanyagcellán alapuló elektromos táplálás. Az 5 perc alatt feltölthető, 5-6 literes, rendszerint ~300 baros gáztartály (42. ábra) az 5 kg hasznos terhet (pl. kamera) szállító repülőeszköz, a 140-160 perces folyamatos repülést is lehetővé teszi.



42. ábra. Rachel hidrogéncellával működtetett eVTOL oktokofter drón [11]

### TERVEK UGRÁSRA KÉSZEN

Az Airbus – bízva az elektromos energia megfelelő energiasűrűségű tárolásának, gyors utántöltésének intenzív fejlődésében –, 2017-től megkezdte egy teljesen elektromosan meghajtott, városi közlekedésre (pl. repülőtér és belváros közötti relációba) szánt pilóta nélküli, robotüzemű eVTOL légi taxi terveinek kimunkálását úgy, hogy 2020-ra teszt-példányát is meg kívánták építeni. A CityAirbus 2019. 05. 03-án repült először (43. ábra).



43. ábra. Airbus vezetõ nélküli, eVTOL légi taxi (szerzõ montázs a [12] alapján)

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légiközlekedés-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A tanulmány, a fenti projekt „AVIATION\_FUEL” nevű kiemelt kutatási területéhez kapcsolódóan valósult meg.



(Folytatjuk)

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Különböző energiahordozók energiasűrűsége. *Haszon magazin* 2017/10. 24. o.;
- [2] <https://www.hobbycity.hu/dji-agras-mg-t16-mezogazdasagi-permetezo-dron>;
- [3] „Fejlesztés alatt álló dróntöltő technológiák” *HVG* 2019.04.04. 35. o.;
- [4] Szerzői montázs az EWATT SPACE gyári videó és a „Fejlesztés alatt álló dróntöltő technológiák” *HVG* 2019.04.04. 35. o. felhasználásával.
- [5] Yang, Xiao-Guang, Teng Liu, Yue Gao, Shanhai Ge, Yongjun Leng, Donghai Wang, és Chao-Yang Wang. „Asymmetric Temperature Modulation for Extreme Fast Charging of Lithium-Ion Batteries”. *Joule* 3, sz. 12 (2019. december): 3002–19. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.021>;
- [6] <https://www.gettyimages.com/>;
- [7] Balogh Csaba, „Sok mindent megváltoztathat az Airbus új robotrepülője, amely 120 napig is a levegőben marad”. *HVG.hu*, 2018. július 25. [https://hvg.hu/tudomany/20180725\\_airbus\\_zephyr\\_napelemes\\_repulo\\_dron\\_robotrepulogep\\_muhold](https://hvg.hu/tudomany/20180725_airbus_zephyr_napelemes_repulo_dron_robotrepulogep_muhold).
- [8] [www.newmango.com](http://www.newmango.com;);
- [9] [https://totalcar.hu/galeria/totalcar/technika/2015/10/20/technika\\_toyota\\_mirai/13](https://totalcar.hu/galeria/totalcar/technika/2015/10/20/technika_toyota_mirai/13);
- [10] <https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.763948&lng=12.582221&zoom=4&Continent=EU&StationID=-1>;
- [11] <https://www.rotorandwing.com/2019/01/09/hydrogen-cells-best-batteries-hour-long-drone-test-flight/>;
- [12] <https://www.motor.com.co/actualidad/tecnologia/airbus-perfecciona-taxi-autonomo-volador/27573>.

### JEGYZETEK

- 3 Az IP-védettség: International Protection Marking vagy Ingress Protection Code – nemzetközi védettségjelölés. A műszaki berendezések tokozásának környezeti behatások elleni védettségét jelzi. Magyarországon az MSZ EN 60529:2015 „*Villamos gyártmányok burkolatai által nyújtott védettségi fokozatok*”, a nemzetközi besorolásban az IEC 60529:1989 szabvány írja le.
- 4 École Polytechnique Fédérale de Lausanne – Svájci Szövetségi Technológiai Intézet, Lausanne
- 5 [www.wibotic.com](http://www.wibotic.com) – Wireless Power Solutions for Robotic Systems
- 6 A Carnot-ciklus (N. L. Sadi Carnot 1796–1832 francia fizikus, mérnök) egy speciális termodinamikai körfolyamat, amely két izoterm, valamint két adiabatikus szakaszból áll.
- 7 NATO Science and Technology Organization – a NATO Tudományos és Technológiai Szervezete.
- 8 European Defence Agency – Európai Védelmi Ügynökség.
- 9 A NATO-n belüli kutatásokat nehezíti a „Single Fuel Conception”, aminek értelmében műveleti területre logisztikai megfontolások alapján kizárólag kerozint szállítanak. Az EDA fogja össze a RESHUB (Resilience HUB) projektet, amelynek résztvevői: Szlovénia (vezető nemzet), Ausztria, Németország, Belgium és Magyarország. A megvalósíthatósági tanulmányok elkészítésére már rendelkezésre áll a támogatási összeg az EU strukturális alapjából, de a koronavírus-járvány miatt csúszik a végrehajtás. Ha a tényleges kivitelezésre is sikerül EU-s forrást bevonni, akkor 2023-ban 5 honvédségi objektumban lehet majd hidrogént (is) tankolni.