

## **Van-e alternatívája az elektromos autónak? Hidrogén a múltban, a jelenben és a jövőben**

**Lente Gábor**

vegyész, egyetemi tanár, Pécsi Tudományegyetem

### **Összefoglaló:**

Ma hazánkban az a fő vélekedés, hogy a közlekedésben eltolódás lesz az akkumulátorokat használó elektromos meghajtás felé. Ugyanakkor a világban ennek alternatívájaként a hidrogén felhasználási lehetőségeit is széles körben vizsgálják, s hosszú távon is életképes technológiákat dolgoztak ki. Az utóbbi időben az valószínűvé vált, hogy a hidrogén energiatárolási lehetőség mellett elsődleges energiaforrássá is válik.

**Kulcsszavak:** tüzelőanyag-elem, hidrogénbányászat, lítiumion-akkumulátor, megújuló energiaforrás, elektromobilitás

### **Energia-kilátások a múltból**

*Volt rá energiánk, lesz rá energiánk?* Ezt a kérdést sokan és sokat feltették, például Riedel Miklós is egy 1985-ben a Gondolat zsebkönyvek sorozatban megjelent könyv címében. A probléma és a tanult emberek ebből táplálkozó aggodalma nem a 20. század műve. A neves francia tudományos-fantasztikus író, Jules Verne *A rejtelmes sziget* című regényében, amely 1874-75-ben jelent meg először, a léghajótörött szereplők az unalmas és hosszú téli estéket érdekes beszélgetésekkel töltik. Az egyik témája éppen az energiagazdálkodás jövőképe (Verne J. 1980):

„Egy napon Gedeon Spilett így szólt a mérnökhöz:

- Ugyan kedves Cyrus, mondja csak, végül is nem áll-e fenn az a veszély, hogy az ipar és a kereskedelem haladását (amelynek ön szakadatlan fejlődést jövendő) előbb vagy utóbb egyszer csak teljességgel megakasztja valami?

- Megakasztja? Micsoda?

- A szénhiány; hiszen a szenet teljes joggal nevezhetjük a legértékesebb ásványnak!

- Igen, valóban, a legértékesebb - felelte a mérnök -, úgy tetszik, mintha a természet maga is azt akarta volna igazolni; amikor megalkotta a legtisztább kristályos szerkezetű szenet, a gyémántot.

- Csak nem azt akarja mondani ezzel, Cyrus úr - szólt közbe Pencroff -, hogy szén híján gyémánttal tüzelnek majd a kohókban és a kazánokban?
- Nem, barátom - felelte Cyrus Smith.
- Még mindig nem kaptam választ a kérdéseimre - makacskodott Gedeon Spilett.
- Ön talán kétségbe vonja, hogy a föld szénkészlete előbb-utóbb teljesen kifogy?
- Ó, a kőszéntelepekben még tekintélyes mennyiség vár kiaknázásra, bár jelenleg százezer bányász dolgozik a tárnák mélyén, és évente százmillió *quintal* szenet fejt-ki onnan, még ebben az iramban sem merítik ki jó sokáig a föld ölében rejlő kőszénmennyiséget.
- Csakhogy a fogyasztás növekedésének arányában nem gyarapodik-e előreláthatóan százezerről kétszázezerre a bányászok száma, és nem kétszereződik-e meg a kitermelt szénmennyiség is?
- Kétségkívül így lesz; de ha Európa bányái végleg kimerülnek (ami könnyen megtörténhetik, hiszen a gépek idővel lényegesen gyorsabb kiaknázásukat teszik majd lehetővé), Amerika és Ausztrália bányái még akkor is hosszú ideig elegendő szénrel látják el az ipart.
- Mennyi ideig? - kérdezte az újságíró.
- Legalább kétszázötven-háromszáz évig...
- Ez megnyugtató - kottyant közbe Pencroff -, már ami bennünket magunkat illet, ükunokáinkra nézvést azonban annál nyugtalanítóbb a helyzet!
- Majd találnak addigra más fűtőanyagot - jegyezte meg Harbert.
- Reméljük - felelte Gedeon Spilett -, mert végtére is szén nélkül nincs gép, gép nélkül nincs vasút, nincs gőzhajó, nincs gyár, nincs semmi, ami hozzátartozik a modern élethez!
- De vajon milyen fűtőanyagot találnak ki majd szén helyett? - tudakolta Pencroff.
- Van-e róla fogalma, Cyrus úr?
- Hát nagyjából-egészéből igen, barátom.
- No és mivel tüzelnek majd utódaink, ha kifogy a szenük?
- Vízzel - válaszolta Cyrus Smith.
- Vízzel? - kiáltott föl Pencroff. - Vízzel fűtik a gőzhajókat és mozdonyokat, vízzel forralják föl a vizet?
- Úgy bizony, méghozzá alkotóelemeire bontott vízzel - felelte Cyrus Smith -, s a víz fölbontását kétségkívül elektromosság végzi majd el, amely addigra hatalmas, de mindazonáltal könnyen kezelhető erővé válik; a nagy találmányok ugyanis (és ez szinte megmagyarázhatatlan törvényszerűség) többnyire azonos korszakban születnek, és kiegészítik egymást. Igen, barátaim, szentül hiszem, hogy a vizet egy szép napon még tüzelőanyagként fogják fölhasználni, és alkotóelemei, a hidrogén és az oxigén, egymástól elkülönítve; de együttesen alkalmazva, kimeríthetetlen hő- és fényforrást jelentenek majd, hatásfokuk pedig akkora lesz, amekkora szénrel soha el nem érhető. Egyszer még eljön az idő, amikor a gőzösök kamráit és a mozdonyok szerkocsiját szén helyett sűrített gázzal töltik meg, amely sohasem

sejtett hatásfokú hőmennyiséget termel majd a kazánokban. Nincs tehát mitől félnünk. A föld, amíg csak lakott lesz, ki is elégíti lakói szükségleteit, s az emberiség sohasem szenved majd hiányt sem fényben, sem melegben, mint ahogy nem nélkülözi majd a növényvilág, az ásványvilág vagy az állatvilág termékeit sem. Hiszem tehát, hogy ha a szénbányák egyszer csakugyan kimerülnek, az emberiség vízzel fűti a gépek kazánját s a lakások tűzhelyét. A víz a jövő szene.”

A mű ma leggyakrabban használatos fordítását Majtényi Zoltán készítette 1980-ban. Ő fordítói megjegyzésként a következő lábjegyzetet írta az idézett sorok végéhez (Verne, 1980): „Vegyületek – többek közt a víz is – az ún. elektrolízis útján valóban elemekre bonthatók; a tudomány azonban a vízből nyerhető hidrogénnél sokkal alkalmasabb energiaforrásokat talált: magát a – részben vízi erővel előállított elektromosságot, a kőolajat, a földgázt, a benzint és nem utolsósorban az atomenergiát.”

A fordító itt az 1980-as viszonyoknak megfelelő tényeket rögzített, de mondanivalóját ugyanolyan energiaoptimizmus hatja át, mint Verne 100 évvel korábban leírt szövegét. A 2020-as évekre azonban a Föld népességének, gazdaságának és a társadalmak átlagos életszínvonalának növekedése gyökeresen átalakították a helyzetet, s a jövőt illetően optimizmusra már jóval nehezebb okot találni. Gelencsér András 2023-ban napvilágot látott könyvének címe már *Ábrándok bűvöletében*. A pálfordulás oka nem az, hogy az elmúlt évtizedekben a világ közelebb került az energiahordozók már Vernét is aggasztó kimerüléséhez. Sokkal inkább az van a háttérben, hogy egyre nyilvánvalóbbá váltak az összefüggések a Föld globális folyamataival, illetve az energiabiztonság eléréséhez szükséges feltételek egyre sokrétűbbekké váltak, egyre többet vesznek igénybe bolygónk természeti erőforrásaiból.

### **Szén-dioxid: a fenyegető valóság**

A leginkább egyértelmű és manapság legfenyegetőbbnek leírt hatás a légkör szén-dioxid-tartalmának növekedése, ami a növekedő üvegházhatáson keresztül már most is észlelhető módon hat az időjárási viszonyokra. Ennek egyébként alapvetően nem az emberi léptékkal viszonylag lassú melegedés a fő problémája, hanem a korábban extrémnek számító jelenségek gyakoriságának mára látványos növekedése.

Súlyos hiba egy ilyen komplex problémarendszert egyetlen konkrét, és viszonylag könnyen kommunikálható részterületre egyszerűsíteni, de napjaink társadalma erre sajnos hajlamos, így természetesen a politikai vezetők is. Ennek tudható be az, hogy az Európai Parlament 2023 februárjában olyan állásfoglalást fogadott el (P9\_TA(2023)0039), amely 2035 elejétől megtiltja, hogy az Európai Unióban benzin- vagy dízelüzemű autót adjanak el (Lente G. 2023). Ez az intézkedés, ellentétben a szén-dioxid-kibocsátásra nemzetközi egyezményekben korábban tett hangzatos, de valójában tartalmatlan és ellenőrizhetetlen emisszió-csökkentési vállalásokkal, konkrét és könnyen betartatható.

A kőolajból készülő termékek a globális szén-dioxid-kibocsátás nagyjából egynegyedét okozzák, ennek döntő része a járművek üzemanyagából származik, így valóban remélhető, hogy egy ilyen intézkedés észrevehető hatást fejt ki (persze csak akkor, ha életbe lép és be is tartják). Ugyanakkor az elhatározása egyoldalú, így a globális járműpiac egészére semmiképpen nem vonatkozik. A politikai döntéshozók ezt minden bizonnyal úgy fogják fel, hogy Európa utat mutat a világ többi része számára. Az EU az új autóeladások terén az USA-hoz hasonló méretű piac, amelynél jelenleg csak a kínai számít nagyobbak. Ha a gyártást, és nem az értékesítést tekintjük, akkor Európa globális súlya még nagyobb. Ugyanakkor nem várható, hogy 2035-ben is hasonló lesz a helyzet: a jelenlegi folyamatok iránya India és Indonézia fokozatos térnyerése felé mutat. Abban természetesen lehet reménykedni, hogy a tilalom várható bevezetéséig elteltő bő évtizedben az autóiparban olyan technológiai változások történnek majd, amelyek automatikusan húzzák magukkal a világ többi részét is, de az elmúlt hónapok fejleményei inkább mutatnak arra, hogy Európa sem fogja feltétlenül teljes szigorral bevezetni a már elhatározott tiltást.

Magyarországon elterjedt az a vélekedés, hogy az idézett európai állásfoglalás gyakorlatilag az elektromos autók használatát teszi majd kötelezővé. Ennek fő oka az, hogy hazánk iparfejlesztési politikája jelenleg ezen a feltételezésen nyugszik. Az alternatíváról, a már Verne által is megálmódott hidrogéngazdaságról jóval kevesebb szó esik. Ez a cikk elsősorban a hidrogén energetikájával foglalkozik, de az elektromos autózás sokak által vizionált térhódításához is szeretne adalékot adni. A szén-dioxid-kibocsátás csökkentéséhez ugyanis alapvető kérdés, hogy a közlekedésben felhasznált elektromos áram előállításánál se keletkezzen üvegházhatású gáz. Ez az autók előállításánál jóval összetettebb és természetesen egyúttal drágább kérdés.

### **Erőforrások a megújuló energiagazdasághoz**

Az elektromos energiatermelés megújuló erőforrásokra átállásához várhatóan szükséges szerkezeti anyagok mennyiségéről a közelmúltban jelent meg alapos tudományos elemzés (Wang, S. *et al*, 2023). A szerkezeti anyag definíciója itt nem teljesen a hagyományos: minden beleszámít, ami az energiatermelési infrastruktúra létrehozásához szükséges. A tanulmány adatait akár megnyugtatónak is lehet nevezni. A teljes átállás esetében várható 2050-ig várható globális igény egyedül a tellúr esetében haladja meg a jelenleg ismert, gazdaságosan kiaknázzható készleteket, illetve még két esetben, a napelemkészítésre alkalmas minőségű szilícium és a diszprózium esetében lenne szükség arra, hogy a jelenlegi gyártási kapacitásokat jelentősen bővítsék.

Az idézett tanulmány elemzésében nem kaptak szerepet a lítiumigényre és -készletekre vonatkozó adatok. Ennek oka az, hogy az elektromos energia megújuló forrásokból történő előállítását vizsgálták és nem a tárolását. Az elektromos

autók esetében ezt ma mindenki nagy (és egyébként energetikailag borzasztó kedvezőtlenül nehéz) akkumulátorokkal képzelel el. A széles körű elterjedés feltételeit ilyen szempontból egy, másik 2021-ben megjelent munkában vizsgálták meg (Klimenko, V. *et al*, 2021), ahol egy szűk évszázados időtávlatú előrejelzéseket is készítettek. Fontos leszögezni, hogy a jelenlegi lítiumion-akkumulátorok felépítéséből adódóan nemcsak a 3-as rendszámú elem, hanem a kobalt hozzáférhetősége is aggodalomra adhat okot.

A Föld országainak lítiumtermelése a legutóbbi évtizedben négyszeresére növekedett, 2021-ben mintegy évi 106.000 tonnát tett ki. A Föld teljes, jelenleg ismert, hozzáférhető készletét lítiumból 16, kobaltból 7 millió tonnára becsülik. Az előjelek szerint a lítium és a kobalt készleteinek korlátozottsága a 21. század évszázad közepére az akkumulátorokat használó energia-elképzelések fő gátja lesz. Még a legoptimistább gondolkodásmód is feltételezi, hogy néhány évtizeden belül a jelenleg ismert globális kobalt- és lítiumkészletek több mint felét kellene majd gazdaságilag hasznosítani egyidejűleg.

Természetesen a várakozások új lendületet adtak a Föld erőforrásainak további kutatásához. Ezek nem is teljesen eredménytelenek: az utóbbi évtizedekben megtalált legnagyobb új lítiumlelőhelyről 2023 második felében adtak hírt (Benson, Th. *et al*, 2023).

Az Amerikai Egyesült Államokban Nevada állam északi határán található a mintegy  $40 \times 30$  kilométeres, kulcslyukra emlékeztető alakú, a középső miocénben keletkezett McDermitt-kaldera, amelynek déli szélén, a Thacker-hágón már mintegy húsz éve folynak intenzív geológiai kutatások. A világ többi részén az ércnek tekintett kőzetekben a hármas rendszámú elem koncentrációja ritkán haladja meg a 0,4 tömegszázalékot, az új lelőhelyen ezek az értékek tipikusan 1,3 és 2,4 között változnak. A fő ásvány az illit nevű filloszilikát, amelynek kémiai képletét  $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$  formában szokás megadni, vagyis a kereskedelmileg jelentős mennyiségű lítiumot nem is jelölik benne!

A területre a Lithium Americas cég már jó ideje bányát tervezett, ehhez az állami engedélyeket 2022 tavaszára meg is kapta. Az egyedi geológiai környezet olyan technológia kidolgozását teszi szükségessé, amelyre eddig még nincs példa a világon. A már elkészült tervek szerint a folyamatban a kénsavnak nagy szerepe lesz, ezért a részletesen kidolgozott tervek szerint ezt a helyszínen épülő külön gyár állítja majd elő.

Az új lelőhely olyan szempontból is példaértékű, hogy a világ hozzá hasonló geológiájú területein is elképzelhető a lítium ilyen mértékű felhalmozódása. Sajnos ilyen vidékből kimondottan kevés van a Földön. Nevadában a Clayton-völgygel, Mexikóban a Sonora nevű területtel fedezhetők fel jelentős párhuzamok. A harmadik és utolsó hasonló vidék Magyarország határaihoz közel, Szerbiában, Belgrádtól délnyugatra, a bosznia-hercegovinai határ szomszédságában fekvő Jadar térségben található A Rio Tinto nemzetközi bányacég itt már egyszer

elkezdte a kutatásokat, területeket is megvásárolt, s az itt kinyerhető lítium mennyiségét mintegy 700.000 tonnára becsülte. A beruházást a helyi lakosság tiltakozására hátráltatta, ennek ellenére 2024 nyarán a magyar sajtót is bejárta a hír, hogy elindultak a munkálatok.

### **Hidrogénteknológia a jelenben**

A globális képen azonban még az sem változtatna, ha további, hasonló méretű lítiumlelőhelyeket fedeznének fel. Az adatok ismeretében eléggé valószínűtlennek látszik, hogy 2035-ben a benzin- és gázolajüzemű autóparkot döntően elektromos flotta fogja felváltani az európai országokban. Ezért a jelenleg egyetlen, technikailag is megvalósíthatónak tűnő alternatíva, a hidrogénhajtású autók fejlesztése és a hidrogéninfrastruktúra kiépülése minden bizonnyal új lendületet vesz addig. Ehhez semmilyen új tudományos és technológiai felfedezésre nincs szükség, évtizedek óta ismeretes minden megoldás.

Hidrogénüzemű autókat több cég is gyárt manapság (közülük a legnevezetesebb a Toyota Mirai, amelynek USA-beli listaára mintegy 50.000 dollár vagyis nagyjából 17 millió forint), ezek terjedésének gátja jelenleg a kellően széles körű töltőhálózat létrehozásának hatalmas beruházási igénye.

Az USA Kalifornia államának példáját érdemes tanulmányozni, mert ott már 2022 szeptemberében is 53 nyilvános hidrogéntöltő állomás működött, így ésszerű lehetőség a hidrogénüzemű autó vásárlása. Ezekben nagy, 70 MPa nyomáson tárolják a gázt, amely a légköri nyomás nagyjából 700-szorosa. Korábban létezett felekkora nyomásra épülő technológia is, de ez mára lényegében elavult (Lente G. 2023).

A hidrogén egyik fő problémája energetikai szempontból az, hogy légköri nyomáson kicsi a sűrűsége, így nagy térfogatú (de egyébként könnyű) tartályokban lehetne szállítani. Erre volt is példa a technikatörténetben: a német Zeppelin léghajók töltéséhez hidrogént használtak, bár itt a gáz nem üzemanyag volt, hanem az emelőerőt biztosította. 70 MPa nyomáson és szobahőmérsékleten a hidrogén sűrűsége  $39 \text{ kg/m}^3$ ; ez még mindig alig egy huszonötöde a vízének, de energetikailag már nem használhatatlanul kicsi. Egy második generációs Toyota Mirai három hidrogéntankjának összesített térfogata 141 liter, vagyis feltöltve kb. 5,5 kg  $\text{H}_2$  van benne. Ez elég csekély hányada a 100 kilogrammot is megközelítő teljes tanktömegnek, de még mindig jóval kevesebb holt súlyt jelent, mint amennyit egy tipikus elektromos autó akkumulátora (egy hasonló hatótávolságú Teslában ez fél tonnánál is nehezebb). Normál használatban ennyi hidrogénnel mintegy 600 kilométert lehet vezetni, de optimális körülmények között jelentősen csökkenthető a fogyasztás: a rekordot 2021 augusztusában állították fel, amikor egy ilyen autó 1360 kilométert tett meg újratöltés nélkül.

A hidrogéninfrastruktúra kiépítése Európában is elindult. Az Európai Parlament és a Tanács 2023. szeptember 13-án kiadott, 2023/1804 számú rendelete a

tagállamokat kötelezi arra, hogy a területükön 2030. december 31-ig létesüljön egy minimális számú hidrogéntöltő állomás. Ennek sarokpontja, hogy eddig a dátumig az európai közúti törzshálózat (TEN-T) mentén, egymástól legfeljebb 200 km távolságra, illetve minden városi csomópontban legalább 700 bar nyomású adagolóval felszerelt nyilvános hidrogéntöltő állomásokat kell kiépíteni. Magyarország ezen a téren sajnos máris jelentős lemaradásban van, vélhetően azért, mert a kormányzat az elektromobilitásra helyezte a fejlesztési hangsúlyt az utóbbi időkben.

Hazánkban az első hidrogéntöltő állomását a Linde cég 2021. április 29-én avatta fel budapesti telephelyén, a IX. kerületi Illatos úton. A bemutatót mind a sajtó, mind a politika élénk figyelemmel kísérte, de néhány fontos részlet mégis elsikkadt a beszámolókból. Az egyik ilyen az, hogy a Linde telephelye nincs nyitva a vásárlók előtt. A másik fontos részlet az, hogy az állomás akkor 35 MPa nyomással működött, s az átalakítást 70 MPa-osra csak jóval később kezdték el. A Magyarországhoz legközelebbi közüzemű hidrogéntöltő állomás jelenleg Bécsben van. A budapesti tömegközlekedésben megvolt az első törpelépés: 2022. február 11-től március 6-ig Kőbánya-Kispest és Vecsés között a Volánbusz Solaris Urbino 12 Electric H2 típusú autóbusszokkal szállított utasokat, a híradások szerint ez volt Magyarországon a legelső hidrogén-üzemanyagcellás busz a közösségi közlekedésben. A lengyel Solaris cég egyébként gyárt elektromos és hibrid hajtású buszokat is, a minél kisebb károsanyag-kibocsátás az egyik legfőbb stratégiájuk.

2022 végén jelent meg az 1544/2022. (XI. 16.) Kormányhatározat, amely egy részben a Tatabánya Óváros M1 autópálya-lehajtó parkoló helyszínén létesítendő, nyilvános, kamionok és haszonjárművek töltésére alkalmas hidrogéntöltő állomás kiépítése céljából benyújtott európai uniós pályázathoz adott adminisztratív támogatást. Egy év alatt látszólag nem sok előrelépés volt, mert a következő, 1469/2023. (X. 31.) kormányhatározat még mindig csak az ötödik körös európai pályázat benyújtásáról szól. Mindkét rendeletben az szerepel, hogy a pályázatot kormánytámogatással a Ral Elektro Kft. cég adta be. Ennek a cégnek saját weboldala szerint fő profilja az elektromos kivitelezői tevékenység, szolgáltatásai között épületvillamossági kivitelezés, ipari világítástechnika, épületfelügyeleti rendszerek, gyengeáramú rendszerek és karbantartás szerepel. Furcsa módon korábbi tevékenységei között sehol nem szerepel ipari gázok forgalmazása, noha hidrogéntöltő állomásokat tipikusan ezen terület ipari óriási tartanak fenn: a Magyarországon is aktív Linde-n kívül az Air Liquide és az Air Products is nevezetesek ilyen fejlesztéseikről. Az előrehaladás ütemét tekintve egyelőre nehéz látni, hogy a töltőhálózat kiépítésére az Európai Unió által elvárt 2030 végi határidőt hazánk hogyan teljesíti majd.

### **A hidrogénmotor-dilemma**

A hidrogénmeghajtás esetében – talán épp az elektromos autók jelenlegi terjedése miatt – olyan általános várakozás alakult ki, hogy ezek a járművek tüzelőanyag-elemes elven működnek majd, vagyis elektrokémiai cellákban a hidrogénből áramot állítanak elő, amely aztán elektromotort hajt meg. Azonban van egy másik, ma nem túl nagy nyilvánosságot kapó, de a szakemberek körében régóta ismert, még hosszú távon is gazdaságilag életképesnek gondolt lehetőség is: a hidrogénüzemű belső égésű motor. Ez igencsak régi találmány: a francia-svájci François Isaac de Rivaz már 1807-ben szabadalmat kapott rá, és egy évvel később már jármű hajtására is használta.

A belső égésű motorok hőerőgépek, vagyis alapvető termodinamikai összefüggések korlátozzák a hatékonyságukat, ami az 50%-ot csak egészen kivételes esetben haladhatja meg. Ugyanilyen elvi korlát sem a tüzelőanyag-elemek, sem az elektromos motorok esetében nincsen, így ezek, nem túl nagy abszolút teljesítmények esetében jóval hatékonyabbak lehetnek annak ellenére is, hogy lényegesen több elemből állnak. Emellett az optimális esetben gyakorlatilag nulla szennyezőanyag-kibocsátás a másik olyan szempont, amelynél a tüzelőanyag-elemes megoldás előnye kétségtelen. Szén-dioxidot vagy szén-monoxidot természetesen a hidrogénüzemű belső égésű motorok sem bocsátanak ki, de a szikra és az égést tápláló közegként használt levegő miatt nitrogén-oxidok keletkeznek. Ezen két, valóban kiemelkedően fontos szemponttal azonban az előnyök listája ki is merül (Lente G. 2023).

A teljesítmény növelése komoly gondot jelent: nagy teherautókban, kamionokban, traktorokban vagy földmunkagépekben az elektromotoros meghajtás egyelőre nem látszik valós jövőbeli lehetőségnek, így a tüzelőanyag-elemes hidrogénes megoldás sem versenyképes. A belső égésű hidrogénmotorok egyik legmeglepőbb előnye a sokkal kisebb hűtésigény. A hőerőgépek működési elvéhez a hatalmas hőmérsékletkülönbség elérése eleve hozzátartozik, valójában a hatékonyság növelésekor kívánatos is, hogy ez minél nagyobb legyen. Így a hőerőgépek hűtésének másodlagos szerepe van: elsősorban azért kell, hogy a motor szerkezeti anyagai, illetve a segédanyagok (például kenőolaj) ne károsodjanak. Ezen a téren a levegő- vagy vízhűtéses technológiákban a más üzemanyaggal működő motorok esetében már kiterjedt korábbi tapasztalatok vannak. A tüzelőanyag-elemeknél a fejlődő hő viszont kétségtelenül hulladék, amely egyébként, ha a kívánatosnál jobban növeli a hőmérsékletet, a termodinamikai összefüggések miatt még csökkenti is a hatékonyságot.

További szempontok is fontosak lehetnek a felhasználók számára. A kamion- és teherautó-üzemeltetők érdekeit tekintve azonban az elektromos meghajtás teljesítménykorlátai mellett is komoly érvek szólhatnak a belső égésű motorok mellett. Az első ilyen a befektetésigény: a mai előrejelzések szerint 2027-ben egy hidrogénüzemű belső égésű motort használó kamion ára mintegy 50%-kal lesz



nagyobb, mint egy ugyanolyan méretű és teljesítményű dízelmotorosé; hidrogénes tüzelőanyag-elemes verzióban kétszeres az ár, akkumulátoros-elektromotoros kiépítésben pedig a kétszeresét is jelentősen meghaladja majd. Így a kedvezőbb hatékonyság gazdasági előnyei csak sok éves üzemelés után kezdik kompenzálni a nagyobb kezdeti költséget, ez akár egy kamion élettartamának fele-kétharmada is lehet. Az is jelentős észrevétel, hogy az idő múltával az öregedés és elhasználódás miatt egy belső égésű motor hatékonysága alig-alig változik, a tüzelőanyag-elemeknél viszont idővel jelentős romlás várható. Szintén fontos szempont, hogy a tüzelőanyag-elemes technológia jóval tisztább hidrogént igényel, a belső égésű motorok számára kisebb probléma, ha az üzemanyagban szennyezések vannak. Ez nem pusztán gazdasági érv, a környezetterheléshez is jelentősen hozzáadhatnak a tisztítási műveletek. További mérlegelendő szempont, hogy a létező cégek karbantartó szakemberei dízelmotorokhoz értenek, a tiszta technológiák közül számukra a hidrogénüzemű belső égésű motorra váltás jelenti a legkisebb kihívást.

Van még egy egészen sajátos, de elég nagy tömegű felhasználás, ahol a hidrogénüzemű belső égésű motorok vezető szerephez juthatnak: nagy teljesítményű dízelmotorokat építenek olyan járművekbe (pl. hajókba) is, amelyeket utána sok-sok évtizedig üzemeltetnek. Ilyen esetekben technológiailag (legalábbis elvileg) az is megoldható lehet, hogy egy eleve dízelhajtásúnak készített belső égésű motort utólagos módosításokkal hidrogénüzeművé alakítsanak, a versenytárs technológiáknál ez teljességgel lehetetlen.

Míndezek alapján talán nem meglepő, hogy az egyéni és tömegközlekedésben sem egyértelmű a tüzelőanyag-elemes technológia elsőbbsége a hidrogénüzemű járműveknél. Az eddigi nagyszabású kísérletek is tükrözik ezt a ténytet.

Európában az ECTOS működése 2001-ben indult el, ennek támogatásával Izlandon már 2003-ban megnyílt az első hidrogéntöltő állomás, és a fővárosban, Reykjavíkban hidrogénüzemű buszok jártak. Ez a város azért volt ideális tesztterület, mert főváros, mégis viszonylag kicsi, így az autóbusszflottának az utasok számára is érzékelhetően jelentős részét lehetett hidrogénüzemű buszokkal helyettesíteni. Ezek Mercedes gyártmányú, tüzelőanyag-elemes járművek voltak. A kísérlet annyira sikeresnek bizonyult, hogy az eredeti kétéves futamidőt még a lejárat előtt háromra növelték. A HyFLEET:CUTE program 2006 és 2009 között már tíz várost érintett: Amszterdam, Barcelona, Berlin, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Peking, Perth és Reykjavík. Ezek közül Berlin vált kivételessé olyan szempontból, hogy itt 14, MAN gyártmányú buszból álló hidrogénes flottát üzemeltet be; ezek belső égésű motorokkal működtek. A teszt itt is sikerre vezetett, de a 2008-as világgazdasági válság megakasztotta a hidrogénes buszok kísérletsorozatát.

A hidrogénes személyautók között a már említett Toyota Mirai nevét ismerik a legtöbben, ebben tüzelőanyag-elemes elektromotor van. Nem ismeretlenek azonban a hidrogénüzemű, belső égésű motort használó személyautók sem, a leglátványosabb erőfeszítéseket ezen a téren a BMW cég tette.

### A hidrogén mint a föld ajándéka

A hidrogénes hajtások elterjedéséhez nagy lökést adhat az elmúlt másfél évben felismert tény, hogy a gáz energiatárolási forma helyett elsődleges energiaforrás is lehet. Míg korábban csak arról lehetett szó, hogy a hidrogén valamilyen más, elsődleges folyamat (például nap- vagy atomenergia) által előállított energia más lehetőségeknél kedvezőbb tárolását valósítja meg, ezen a téren 2023-ban a korábbi ismeretek fényében meglepő fordulat történt: egyre inkább lendületet kezdett venni a nagy hidrogéntartalmú földgázlelőhelyek kutatása (Hand, H. 2023). Az elvi lehetőség már egy bő évszázada ismert: Dmitrij Ivanovics Mengyelejev 1888-ban észlelte, hogy egyes ukrain szénbányákban a levegő viszonylag sok elemi hidrogént tartalmaz, amely a kőzetrétegekből folyamatosan szivárog a légterbe. Az első olyan jel, amely komoly gazdasági hasznosíthatóságra is utalt, egy másik évszázadban, egy másik földrészen tűnt fel.

A nyugat-afrikai Maliban, a fővárostól mintegy hatvan kilométerre, egy Bourakébougou nevű falu mellett 1987-ben kutat akartak fűrni. A környék száraz vidék a Szahara déli határán, s még 108 méter mélységben sem bukkantak hasznosítható vízre. Fel is adták a kutatást, a lyukból viszont folyamatosan furcsa szél fűjt. Egy munkás egy nap égő cigarettával a szájában akart a nyílásba benézni: ennek a következménye zajos robbanás lett komoly égési sérülésekkel kísérve, s a földből előtörő gáz attól kezdve éjjel-nappal égett. De ilyen tüzet még egyetlen helybeli sem látott. A lángnak alig látható, nappal kékes árnyalatú színe volt és egyáltalán nem kormozott. Éjjel inkább aranyszínűnek látszott az égő kút, s a fűrást végző cégnek hetekig tartott az oltás, majd a nyílás biztonságos lezárása. Így is maradt minden 2012-ig, amikor a terület bányászati jogait birtokló Petroma nevű, kőolaj- és földgázkitermeléssel foglalkozó cég egy mobillaboratóriumban meghatározta az előtörő földgáz összetételét: 98%-ban elemi hidrogén volt. Nem ismertek még korábbi ipari példát ilyesmire, de elszánták magukat arra, hogy ezt a kivételes adottságot nem hagyják kiaknázatlanul. Először egy, a Ford által gyártott belső égésű motort alakítottak át hidrogénüzeművé, és ezzel az elektromosságot korábban csak hírből ismerő Bourakébougou harminc kilowatt teljesítményű áramforrást kapott. Ennek az áldásos hatását a közösség minden lakója megtapasztalhatta. A Petroma tulajdonosa meglátta a jelenségben a komoly üzleti lehetőséget, s cégét át is keresztelte Hydroma névre.

A Maliban tett megfigyeléseket 2018-ban publikálták (Prinzhofer A. *et al*, 2018), és azóta sok befektető és kutató figyelme fordult a jelenség felé. 2019-ben az USA Nebraska államában is találtak hasonló földgázt, 2022 októberében pedig a Geological Society of America által szervezett tudományos ülésen részletes földtani modellt is bemutattak már, amely szerint a hidrogén olyan sebességgel keletkezik az ilyen helyeken, hogy akár megújuló energiaforrásnak is nyugodtan lehet nevezni. A legtöbb befektető Ausztráliában kezdett üzleti tevékenységet.

Vajon hogyan lehet az, hogy az ilyen, hidrogént gazdaságilag is számottevő mértékben tartalmazó földgázok pusztán létezése is ennyire sokáig elkerülte a tudomány és az ipar figyelmét? A válasz erre a kérdésre összetett, de nagyon is logikus. Nagyarányú bányaiipari földtani kutatások eddig elsősorban a fosszilis energiaforrások, vagyis a földgáz, kőolaj és szénlelőhelyek feltérképezését célozták meg. Az ezek keletkezését értelmező elméletekben nincs is hely a hidrogén számára. Valóban: a mára megismert hidrogéntartalmú földgázok lelőhelyeinek földtani sajátosságai eltérnek azoktól a főként üledékes jellegű helyektől, amelyeket eddig kutatásra érdemesnek tartottak. Az elterjedt elméletek azt is világosan jóslják, hogy ha keletkezne is hidrogén, akkor azt a kőzetek nem tartanák meg, vagyis nem halmozódhatna fel sehol. Komoly probléma az is, hogy a gázok összetételének elemzése során még nagy mennyiségű hidrogén is elveszhet a mérési hibában akkor, ha nem keresik céltudatosan a jelenlétét.

A mai hidrogénbányászati helyzet meglehetősen hasonlít a kőolajiparban a 19. század közepén uralkodó állapothoz. Néhány szerény hozamú olajkút Kaliforniában és Irakban már ismeretes volt, de a nagy hozamú, föld alatti lelőhelyek létezése egészen addig rejtve maradt, amíg 1857. augusztus 27-én Edwin Drake bányavállalkozó a pennsylvaniai Titusville közelében, 21 méter mélyen rá nem talált az első jelentős olajmezőre (Hand, E. 2023).

Ausztráliában már létezik Gold Hydrogen nevű cég, amelynek tevékenysége erre a területre koncentrál. A kontinens déli partjainál fekvő Kenguru-szigeten, s ennek a közelében, a Yorke-félszigeten már 1921-ben készült feljegyzések is beszámoltak arról, hogy kőolajkutatás közben 70-80 % hidrogént tartalmazó gáz tört elő a földből. 2021-ben Dél-Ausztrália szövetségi államában a törvényi bányászabályozásokon is változtattak, hogy a hidrogén kitermelését elősegítsék. A Pireneusok spanyol részén lévő hidrogénforrások kinyerésére a nemrég alapított Helios Aragon nevű cég is nagyon várja már a spanyol bányászati törvény módosítását, amely egyelőre a kőolajra kidolgozott szabályokat alkalmazná a hidrogénbányászatra is.

Hasonlóan ígéretes az Albánia északkeleti részén található Bulqizë város közelében feltárt érdekesség (Truche, L. *et al*, 2024). Itt egy jelentős, a világ legnagyobbjai közé tartozó krómbánya található, amely 1942-ben nyitott meg. Azóta mintegy 13 millió tonna fémércet hoztak itt a felszínre, s az ismert, még kitermelhető készletek is millió tonnákra rúgnak. A vágatokban először 1992-ben, 620 méter mélységben tapasztalták gyúlékony gázok keletkezését, ami 2011-ben, 2017-ben és 2023-ban is nagy károkat okozó robbanásokhoz vezetett. Egy föld alatti víztározóban folyamatos buborékképződés is tapasztalható. Itt mutatták ki először, hogy a felszínre törő gáz nem kevesebb, mint 84 térfogatszázaléka elemi hidrogén.

A közelmúltban elvégzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a bánya aknarendszerében kiterjedt területen tapasztalható hidrogénszivárgás, amelynél a legköny-

nyebb elem jellemzően levegővel keveredik. A széles körű felmérés szerint minden emberi beavatkozás nélkül, pusztán a szivárgás révén évi legalább 200 tonna hidrogén kerül a légkörbe. A krómbányászok számára a jelenség elsősorban működésbiztonsági kérdés volt, a szénbányákban előforduló sújtóléghez hasonlóan soha nem gondoltak rá kiaknázzható erőforrásként.

### **Könnyű megoldás nehézségekkel**

Ahogy ez a cikk utalt rá, az emberiség energiaigényének biztosítása olyan probléma, amely már évszázadok óta foglalkoztatja nemcsak a szakembereket, hanem a tudományos-technológiai kérdésekre fogékony közvéleményt is. A hidrogén-gazdaság alapötlete már évtizedekkel ezelőtt megszületett, s elterjedésének akadályai jelenleg sokkal inkább gazdaságiak, mint műszakiak. A jelen közgondolkodásban jól látszik, hogy a társadalmi elvárások szerint a felhasználandó energiának nemcsak környezetkímélőnek kell(ene) lennie, hanem olcsónak is. Az idő múlásával ezt a feltételt várhatóan egyre kevésbé lehet majd teljesíteni. Bármilyen technológia is terjedjen el majd a jövőben az energiaigények biztosítására, két dologban biztosak lehetünk: egyrészt a takarékoság a korábbinál sokkal nagyobb szerepet kap majd benne, másrészt az általa generált legsúlyosabb jövőbeli problémákról ma még sejtelmünk sincs.

### **Köszönetnyilvánítás**

Ezen cikk elkészülését a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium támogatta, amelynek létrehozását a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta az RRF-2.3.1-21-2022-0009 azonosító számú projekt keretében.

### **Felhasznált irodalom**

- Benson, Thomas R. – Coble, Matthew A. – Dilles, John D. (2023): Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Science Advances*, 9, adh8183. DOI: 10.1126/sciadv.adh8183. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh8183>
- Gelencsér András (2023): *Ábrándok bővületében. A fenntartható fejlődés korlátai*. Budapest: Akadémiai Kiadó. ISBN: 978-963-454-899-7
- Hand, Eric (2023): Hidden Hydrogen. *Science* 379, 630–636. DOI: 10.1126/science.adh1460 <https://doi.org/10.1126/science.adh1460>
- Klimenko, V. V. – Ratner, S. V. – A. G. Tereshin (2021): Constraints imposed by key-material resources on renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111011. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111011>
- Lente Gábor (2023) *Magyar Kémikusok Lapja*, 78, 2035: Szén-dioxid-odüsszeia (102-103), Hidrogéntöltő állomások Tatabányán és Kaliforniában (166-168), Hidrogénbányászat (254-255), Hidrogénközlekedési dilemma a Berlin–Reykjavík tengely mentén (318-319), Akkumulátorfejlesztés és -gyártás: az élet, a világmindenség, meg minden (376), Álomszerű lítiumlelőhelyfelfedezés Nevadában (377). ISSN 0025-0163

- Prinzhofer, Alain – Cissé, Cheick Sidy Tahara – Diallo, Aliou Boubacar (2018): Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 19315-19326. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.193. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>
- Riedel Miklós (1985): *Volt rá energiánk, lesz rá energiánk?* Budapest: Gondolat Könyvkiadó. ISBN: 963-281-613-7
- Truche, Laurent – Donzé, Frédéric-Victor – Gskolli, Edmond – Muceku, Bardhyl – Loisy, Corinne – Monnin, Christophe – Dutoit, Hugo – Cerepi, Adrian (2024): A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite. *Science*, 383, 618-621. DOI: 10.1126/science.adk9099. <https://doi.org/10.1126/science.adk9099>
- Verne, Jules (1980): *A rejtelmes sziget 1-2.* (ford. Majtényi Zoltán). Budapest: Móra Könyvkiadó. ISBN: 963-11-2342 1 és 963-11-2344-8
- Wang, Seaver – Hausfather, Zeke – Davis, Steven – Lloyd, Juzel – Olson, Erik B. – Liebermann, Lauren – Núñez-Mujica, Gudío D. – McBride, Jameson (2023): Future demand for electricity generation materials under different climate mitigation scenarios. *Joule*, 7, 309–332. DOI: 10.1016/j.joule.2023.01.001. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.01.001>