

A cikk megjelenését a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium támogatta a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal RRF-2.3.1-21-2022-0009 azonosító számú projektjének keretében. A Megújuló Energiák Nemzeti Laboratóriumot létrehozó intézmények: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Debreceni Egyetem, Energiatudományi Kutatóközpont, Miskolci Egyetem, Neumann János Egyetem, Pannon Egyetem, Pécsi Tudományegyetem, Széchenyi István Egyetem, Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi Kutatóközpont.

Lente Gábor

# Hidrogénközlekedési dilemma a Berlin–Reykjavík tengely mentén

**L**apunk és a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratórium közötti együttműködés részeként az idén már több korábbi írás rámutatott arra, hogy jelenleg ugyan az akkumulátorral működő elektromotoros autók terjedése a gyorsabb, néhány éven belül a hidrogénüzemű járművek minden bizonnyal komoly versenytárrá válnak a szén-dioxid-kibocsátástól mentes közlekedési eszközök piacán. Több különböző technológia együttélése általában is javít egy rendszer egészének teljesítőképességén, de ebben az esetben a hidrogénalapú meghajtások egymagukban is sokkal változatosabbak lehetnek, így a különböző felhasználások egyedi igényeihez is várhatóan jobban tudnak alkalmazkodni.

Jelenleg a hidrogénnel üzemelő és az akkumulátoros autók közül az utóbbiaknak van jelentős piaci előnye annak ellenére is, hogy igazából gyártásuk és működtetésük is drágább. Ezt a furcsa különbséget az okozza, hogy egy elektromos töltőállomást sokkal olcsóbban lehet megépíteni, mint a hidrogénes megfelelőjét. Ha az évtizedek alatt, hatalmas befektetéssel létrehozott benzinkút-hálózat értékének csupán néhány százalékát elérő hidrogéninfrastruktúra lenne a Földön, akkor egészen más lenne a versenyhelyzet az akkumulátoros és a hidrogénes autók között.

Talán épp az elektromos autók jelenlegi terjedése miatt alakult ki a hidrogénmeghajtás esetében is olyan általános várakozás, hogy ezek a járművek tüzelőanyag-elemes elven működnek majd, vagyis a hidrogénből elektrokémiai cellákban áramot állítanak elő, amely aztán elektromotort hajt meg. Azonban van egy másik, ma nem túl nagy nyilvánosságot élvező, de 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 (1752–1828) már 1807-ben szabadalmat kapott rá, és egy évvel később már jármű hajtására is használta.

Az Amerikai Energiaügyi Minisztérium (US Department of Energy) Hidrogén- és Tüzelőanyag-elem-technológiai részlege (Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office) 2023 tavaszán tartott egy érdekes, sajtónyilvános webináriumot a témában (<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/february-h2iq-hour-overview-hydrogen-internal-combustion-engine-h2ice-technologies>): a hidrogénüzemű belső égésű motorok és tüzelőanyag-elemek tulajdonságainak összehasonlításáról ott elhangzottakat foglalja össze röviden az **1. táblázat**. A szempontok sorrendje nagyjából a jelenleg nekik tulajdonított fontosságot tükrözi.

A belső égésű motorok hőerőgépek, vagyis alapvető termodi-

namikai 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. A teljesítmény növelése viszont komoly gondot jelent: nagy teherautókban, kamionokban, traktorokban vagy földmunkagépekben az elektromotoros meghajtás egyelőre nem tűnik valós jövőbeli lehetőségnek.

Az **1. táblázat** szerint optimális esetben gyakorlatilag nulla szennyezőanyag-kibocsátás a másik olyan szempont, amelynél a tüzelőanyag-elemes megoldás előnye kétségtelen. Szén-dioxidot

Tulajdonság	Belső égésű motor	Tüzelőanyag-elem
Hatékonyság	Jó a közepes és nagy teljesítményeknél	<b>Kitűnő a kicsi és közepes teljesítményeknél</b>
Hűtésigény	<b>Közepes</b>	Nagy, álló vagy lassan mozgó járműveken kritikus
Szennyezőanyag-kibocsátás	Nitrogén-oxidok, utókezeléssel csökkenthető	<b>Nincsen</b>
Tartósság	<b>Jó</b>	Fejlődik
Érzékenység a külső hatásokra	<b>Csekély</b>	Rezgésérzékenységi problémák
Nemesfémigény	<b>Kicsi vagy közepes (utóbbi a kipufogógáz utókezelésekor)</b>	Nagy
Üzemanyag-tisztasági igény	<b>Nem korlátozó tényező</b>	Nagy tisztaságú hidrogén szükséges
Üzemanyagváltás lehetősége	<b>Dízel vagy földgáz könnyen megoldható</b>	Nehezen megoldható, csökkenti a hatékonyságot
Befektetési igény	<b>Csekély</b>	Jelentős
Hidegindítás	<b>Nem korlátozó tényező</b>	<b>Hőmérséklet-szabályozásra szükség lehet</b>

**1. táblázat. A hidrogénalapú belső égésű motort és tüzelőanyag-elemmel kombinált elektromotort használó hajtási megoldások sajátosságainak összehasonlítása**



1.

3. 4.

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. Látható, hogy a tüzelőanyag-elemes megoldás előnye ebben a két területben ki is merül, viszont mindkettő a legfontosabb három közé tartozik.

A többi szempont együttes hatása miatt ma jelentős ipari erőfeszítéseket fektetnek a belső égésű hidrogénmotorok tömeggyártásába is. Ezek egyik legmeglepőbb előnye a tüzelőanyag-elemekkel szemben a sokkal kisebb hűtésigény. A hőerőgépek működési elvéhez a hatalmas hőmérséklet-különbség elérése eleve hozzátartozik, valójában a hatékonyság növelésekor kívánatos is, hogy ez minél nagyobb legyen. Így a hőerőgépek hűtésének egyfajta másodlagos szerepe van: elsősorban azért kell, hogy a motor szerkezeti anyagai, illetve a segédanyagok (például kenőolaj) ne károsodjanak. Ezen a téren a levegő- vagy vízhűtés 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.

A többi szempont némelyike is nagyon fontos lehet egyes típusú felhasználók számára. A kamion- és teherautó-üzemeltetők érdekeit tekintve azonban az elektromos meghajtás teljesítménykorlátain kívül 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, hidrogén tüzelőanyag-elemes verzióban kétszeres az ár, akkumulátoros-elektromotoros kiépítésben pedig a kétszereset is jelentősen meghaladja majd. Így a kedvezőbb hatékonyság gazdasági előnyei csak sokéves 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, míg a belső égésű motorok számára sokkal 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 szerepet játszhatnak: nagy teljesítményű dízelmotorokat építenek olyan járművekbe (pl. hajókba) is, amelyeket utána sok-sok évtizedig üzemeltetnek. Ilyen esetekben technológiailag az is megoldható

1. Tüzelőanyag-elemes, Mercedes gyártmányú, hidrogénüzemű busz Reykjavíkban

2. Belső égésű motorral felszerelt, MAN gyártmányú, hidrogénüzemű autóbuszok flottája Berlinben

3. A BMW hidrogénes autója, amelyben belső égésű motor van

4. A Toyota kereskedelemben is már kapható Mirai modellje, amely hidrogénnel üzemel tüzelőanyag-cellák segítségével

lehet, hogy egy eleve dízelhajtásúnak készített belső égésű motort utólagos módosításokkal hidrogénüzeművé alakítsanak, a versenytárs technológiáknál ez teljességgel lehetetlen.

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

Európában az Ökológiai Városi Közlekedési Rendszer (Ecological City Transportation System, ECTOS) 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 teszterület, mert főváros, mégis viszonylag kicsi, így az autóbuszflotta 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 lejáratá előtt háromra növelték. A buszok összesen mintegy ötezer órát üzemeltek, ez alatt közel százezer kilométert tettek meg velük. Akadtak ugyan műszaki problémák, de ezeket általában gyorsan és könnyen el lehetett hárítani, s a dízelüzemű buszoknál is jobbnak bizonyultak karbantartási szempontból: a teljes idő 90%-ánál nagyobb hányadában voltak teljeskörűen üzemképesek.

Az ECTOS kezdeti sikereire épített a HyFLEET:CUTE (Clean Urban Transportation for Europe, Tiszta Városi Közlekedés Európában) program 2006 és 2009 között. Ez már tíz várost érintett: Amsterdam, 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 nagyon sikeres volt, amit az is mutat, hogy a buszokat az eredetileg tervezettnél jóval hosszabban üzemben tartották, négy közülük még 2015-ben is az utcákon járt. Sajnos a jelek szerint a 2008-as világgazdasági válság megakasztotta a hidrogénes buszok kísérletsorozatát, s azóta sincsen hasonlóan nagy léptékű tesztüzemről információ. Egészen 2021-ig kellett várni arra, hogy Londonban és a skóciai Aberdeen-ben elinduljon az első hidrogénes emeletes busz, amely tüzelőanyag-cellát használ. Budapesten is volt már tesztüzem: 2022 elején egy hónapig Kőbánya-Kispest és Vecsés között jártak Solaris Urbino 12 Electric H2 típusú, hidrogénüzemű tüzelőanyag-cellás autóbuszok.

A hidrogénes személyautók között ma legtöbben a Toyota Mirai nevét ismerik, amely már kereskedelmi forgalomban is kapható. Ennek terjedését elsősorban a hidrogénes üzemanyag-töltő-állomások ritkasága gátolja, Magyarországon például egyetlen ilyen van, és az sem nyilvános (*Magyar Kémikusok Lapja*, 2023, 78, 166–167). Nem ismeretlenek a hidrogénüzemű, belső égésű motort használó személyautók sem, a leglátványosabb erőfeszítéseket ezen a téren a BMW cég tette.

A jelenlegi ismeretek szerint szinte biztosra vehető, hogy a két technológiai hosszú ideig egymás mellett él majd a jövőben. ●●●