

Tudományos cikk

A hidrogéngazdaság szerepe a közlekedési ágazat zöld átállásában – a hidrogén meghajtású járművekkel kapcsolatos kutatások

Beküldve: 2023.01.04.
Elfogadva: 2023.03.27.
Online közzétéve: 2023.12.18.

id **PROF. DR. BOROS ANITA** egyetemi tanár, központvezető, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Körforgásos Gazdaság Elemző Központ, boros.anita@uni-mate.hu

Kivonat: A közlekedési ágazat környezetterhelése és energiaigénye az elmúlt időszakban paradigmaváltásra készítette az ágazat meghatározó gyártóit és fejlesztőit. A kutatások olyan új megoldások kidolgozására irányulnak, amelyek az ágazat negatív környezeti mutatóit, fokozott energia szükségletét hivatottak mérsékelni. A kutatási fókuszterületek egyik kiemelkedő szegmense a hidrogéngazdaság, és a hidrogén meghajtású gépjárművek fejlesztése. A tanulmány az ezzel kapcsolatos legújabb kutatási eredményeket foglalja össze, rávilágítva a technológia piaci térnyerését befolyásoló legfontosabb tényezőkre.

Kulcsszavak: hidrogéngazdaság, hidrogén meghajtású jármű, elektromos jármű, hidrogén üzemanyag cella, hidrogéntermelés

The role of the hydrogen economy in the green transition of the transport sector - research on hydrogen-powered vehicles

Abstract: The environmental burden and energy demand of the transport sector have recently prompted the leading manufacturers and developers of the sector to make a paradigm shift. The research is aimed at developing new solutions that are intended to mitigate the negative environmental indicators of the sector and the increased need for energy. One prominent segment of the research focus areas is the hydrogen economy and the development of hydrogen-powered vehicles. The study summarizes the latest research results in this regard, highlighting the most important factors influencing the market growth of the technology.

Keywords: hydrogen economy, hydrogen powered vehicle, electric vehicle, hydrogen fuel cell, hydrogen production

Bevezetés

Napjainkban a világ energiaigénye rohamosan növekszik, így várhatóan a közeljövőben az energiaforrások nem tudják ezt az igényt kielégíteni. Ennek köszönhetően a megújuló energiaforrások kutatása jelentősen felértékelődött. Az elmúlt időszak különböző válsághelyzetei még inkább ráirányították a figyelmet új megoldások sürgető szükségességére.

Emellett jelentősen változtak az utazási szokások is, elsősorban a pandémia következtében (Anwar et al., 2023). A fejlődő országok közül például Kínában 50,9%-kal (Cui et al., 2021), Indiában 35%-kal (Singh et al., 2020), Finnországban 40-60%-kal (Tiikkaja és Viri, 2021) csökkent a tömegközlekedési eszközök utasainak száma.

A Nemzetközi Energia Ügynökség (a továbbiakban: IEA) szerint 2020-ban a közlekedésből származó szén-dioxid-kibocsátás a globális kibocsátás 24%-át tette ki. Jelenleg a közlekedési ágazat szén-dioxid-kibocsátásának csökkentését különböző szakpolitikai intézkedésekkel igyekeznek elérni az országok (IEA, 2021).

Az autóiipar lényeges energiaigényének kompenzálására az elmúlt időszakban jelentős fejlesztési folyamatok kezdődtek az alternatív energiarendszerek bevezetése érdekében. A kutatások igen szerteágazók, azonban egy meghatározó vonulatként értékelhető a nagy energiahatékonyságú, és alacsony károsanyag-kibocsátású hidrogén üzemanyagcellák közlekedési, illetve autóiipari alkalmazása.

Jelen tanulmányunk röviden összefoglalja a hidrogén meghajtású gépjárművekkel kapcsolatos legfontosabb kutatási eredményeket, hogy betekintést nyújtson a technológia kapcsán felmerülő kihívások rendszerébe.

A hidrogéngazdálkodás zöldgazdasági szerepe

A hidrogéngazdaság kifejezést először John Bockris használta, aki 1972-ben a hidrogént tiszta energiahordozóként nevesítette (Moliner, 2016). A hidrogéngazdaság e kezdeti felfogása során a hidrogént olyan univerzális energiahordozóként képelték el, amelyen keresztül atomenergia és napenergia termelhető gazdaságosan. (Bockris, J. O. M., 1972). Az 1980-as években a hidrogénkutatás több új területre ágazott el, többek között a hidrogén tárolására, valamint napenergiából és más alternatív energiából történő hidrogén előállítására (Bockris, J. N., - Veziroğlu, T. N., 1983).

A Ballard Power Systems 1983-ban fektetett be először üzemanyagcellák fejlesztésébe, később a Daimler Benz és a Chrysler is üzemanyagcellás járművek új generációjának előállításába kezdett (Hystory-Fuell cells Work).

Az elmúlt több mint húsz éves időszakban robbanásszerű növekedés tapasztalható a hidrogéngazdasággal kapcsolatos kutatások területén is. Ezt mutatja, hogy a kétezres évek eleje óta nyolcszorosára emelkedett a témakörben megjelent publikációk száma, mint előtte (Hilbert-Lopez, 2011, Yap - McLellan, 2023).

A modern gazdaságpolitikai szerzők közül a hidrogéngazdaság fogalmát Jeremy Rifkin amerikai futurista vezette be 2002-ben (Rifkin, J., 2002). Az ő értelmezésében a hidrogéngazdálkodás egy új gazdasági rendszerre utal, amely során olaj helyett hidrogént használnak. Mivel a hidrogén korlátlan energiaforrás, ebben a modellben bárki lehet fogyasztó és szállító is (Stephens-Romero, Set al., 2010). A hidrogéntársadalom a termelés, a szállítás, az ellátás és a hasznosítás szakaszaiból áll. A sikeres hidrogéngazdálkodás feltétele, hogy a fejlődés minden szakaszában megvalósuljon a gazdasági egyensúly. A hidrogén-gazdaságban az áru a hidrogén, amelyet az általános gazdasági folyamatoknak megfelelően elő kell állítani, csomagolni, szállítani, tárolni és a végfelhasználóhoz el kell juttatni, ahol tüzelőanyagcellák vagy más átalakító eszközök segítségével villamos energiává alakítható (Khuzou et al., 2019). A hidrogéngazdaság tehát lényegében egy szélesebb körű átmenetnek tekinthető az alacsony szén-dioxid-kibocsátású társadalom felé. A kétezres évek utáni kutatások főként arról szólnak, hogy a hidrogén, mint energiahordozó rugalmas alkalmazkodási készsége révén, hogyan illeszthető be valamely jövőbeli forgatókönyvbe (Murdock et al, 2022.)

A hidrogéngazdasággal kapcsolatos legújabb szakirodalmi források elsődlegesen a hidrogén előállítása (Marusek, 2022, Hwngbo et al 2018, Ardo et al., 2022), tárolása (Miocic et al., 2023, Lesmana, 2023) és felhasználása (Fang, 2023, Gholamian et al. 2023) kapcsán mutatnak jelentős előrelépést (Griffiths et al., 2021). A különböző technológiai feltételek elemzése elsősorban a műszaki gyakorlatokra és a hidrogéntermelés, -tárolás és -elosztás specifikus módszereinek továbbfejlesztésére irányul (Lahnaoui et al., 2021).

Az utóbbi időszakban előtérbe kerültek a hidrogénellátási láncok elemzésével foglalkozó kutatási irányzatok is: ezek egy része a hidrogénellátási láncok teljes egészének vagy egyes szakaszainak optimális konfigurációjának elérésére szolgáló megközelítésekre és modellekre koncentrálnak (Agnolucci és Mcdowall 2013, Li et al. 2019, Dagdougui 2012), míg egy másik irányzat a környezeti hatásvizsgálatokra, ökológiai teljesítmény és CO₂-kibocsátási tényezőkre helyezi a hangsúlyt (Bhandari et al., 2014, Maryam 2017, Balcombe et al., 2018, Griffiths et al., 2021). Bolat és Thiel a hidrogénellátási lánc elemzése kapcsán leírja, hogy a hidrogén hogyan juthat el a gyártás helyéről a végfelhasználóhoz, a hidrogén üzemanyagcellás járművekhez (Bolat, P., - Thiel, C., 2014).

A hidrogén ugyanakkor a jelenlegi energiaipari (Wikramanayake et al., 2021), ipari (Li S. et al., 2021), közlekedési (Chen, Y., et al., 2022), élelmiszeripari és környezettudományi (Jovan -Dolanc, G. 2020) kutatásainak homlokterében álló legattraktívabb energiaforrás (Yue et. al., 2021).

Az energiaipari kutatások igen széles spektrumon mozognak. Wikramanayake és szerzőtársai Texasban vizsgálták a felesleges szél- és napenergia tárolását az elektrolízis által vezérelt hidrogénné való átalakítás révén. Kutatásaik során arra jutottak, hogy ezt a tárolt hidrogént vissza lehetne alakítani elektromos árammá, és energiahiány esetén a hálózatba be lehetne táplálni. A tanulmányukban egy hosszú távú tárolási rendszert jellemeznek egy 2025-ig becsült kapacitásnövekedés alapján, a névleges teljesítmény és a hidrogén elektrolízissel történő előállításának költségeivel számolva. Az előzetes műszaki-gazdasági elemzésük szerint körülbelül 40 GW teljes elektrolizáló kapacitás esetén 16%-kal növelhető a megújuló energiaforrások hozzájárulása a texasi hálózatba.

Az ipar területén is jónéhány előremutató kutatással találkozhatunk: így például az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogén a földgáz helyettesítőjeként használható a vasérc kémiai redukálására az acéliparban. A vas hidrogénnel történő közvetlen redukciója egyes szerzők szerint csökkentené a teljes hőenergia-igényt (Li S. et al, 2021). Különböző forgatókönyveket dolgozott ki Hobohom a finomítók, a Német Cementipari Szövetség a cement, illetve (Ireson et al., 2019) az üvegipar számára.

Érdemes megemlíteni, hogy a repülőgépiparban a hidrogén a kerozin helyettesítő üzemanyagként, kis propeller

típusú repülőgépek üzemanyagcelláiban is használható (Petrescu et al. 2020, Yusaf et al, 2021).

Mindemellett olyan átfogó tanulmányok is születtek már, amelyek a hidrogéngazdaság fejlesztését szolgálják a különböző egyéb iparágak vertikális összekapcsolása révén. Így például Trapp és szerzőtársai tanulmánya tizenkét üzleti modell archetípust azonosít a német hidrogén-járműiparban az ágazatok összekapcsolásával összefüggésben (Trapp et al, 2022).

Napjainkban a hidrogéntermelés 75-100 millió tonna (Mt) és azt főként fosszilis tüzelőanyagokból nyerik, különösen földgázból (48%), nehézelajokból és benzinből (30%), valamint szénből (18%), míg a fennmaradó 4%-ot vízelektrolízissel állítják elő (IEA, 2021).

A hidrogéntermelési technológiákban használt különböző típusú energiaforrások megkülönböztetésére Dawood, Anda és Shafiullah (2020), Newborough és Cooley (2020), valamint Noussan et al. (2020) különböző színű címkék használatát javasolta.

A szénelgázosítással előállított hidrogént barna vagy fekete hidrogénnek nevezik, amely a felhasznált szén típusától függ. Ha a hidrogént a földgáz gőz-metános reformációjával állítják elő, akkor azt sötét hidrogénnek nevezik (Wappler, 2022).

1.táblázat A hidrogén előállításának egyes módszerei

Forrás	Módszer	Szín	Osztályozás	2020 termelési % (IEA, 2021)
Fekete szén	Elgázosítás	Fekete H2	Magas szénlábnyom	19%
Lignit (barnaszén)		Barna H2		
Földgáz	Földgáz reformálás	Sötét H2		59%
Olaj	Részleges oxidáció	Sötét H2		0,6%
Melléktermék	Nafta reformálás	Sötét H2		21%
	Klór-alkáli elektrolízis	Fehér H2	Tiszta	
Földgáz + CCS	Földgáz reformálás	Kék H2		0,7%
Metán	Pirólízis	Türkiz H2		Nincs kereskedelmi léptékű gyártás
Nukleáris energia	Víz elektrolízis	Rózsaszín H2		
Vegyes hálózati villany	Víz elektrolízis	Sárga H2		
Megújuló energia	Víz elektrolízis	Zöld H2	Zöld	0,03%

Forrás: Wappler, 2022.

A hidrogén ipari melléktermékként is előállítható, például marónátron előállítása során vagy klór-alkáli elektrolízissel. Ez a termelési út a fehér színhez kapcsolódik, és alacsony szén-dioxid-kibocsátásúnak tekinthető. A benzin előállítása során melléktermékként szintén hidrogén képződhet a reformálási folyamat eredményeként.

A hidrogént vízelektrolízissel is elő lehet állítani különféle energiaforrások felhasználásával. A megtermelt hidrogént zöldnek nevezzük, ha az elektrolízis során megújuló energiát használnak.

A vízelektrolízis egy jól ismert tiszta és zöld módszer a hidrogén előállítására, amelynek során elektromos áramot vezetnek át a vízben lévő vezető elektroliton, illetve a vízmolekulákat hidrogénre és oxigénre bontják (Martins, 2022). Ennek az eljárásnak a fő hátránya a nagy energiafogyasztás, amely a hidrogénköltség körülbelül 80%-át teszi ki (Puig-Arnau et al., 2010). A zöld hidrogén vízből történő előállításának másik lehetséges módja a termolízis, amely a víz egy lépéses disszociációjából áll (Dincer, 2012). Emellett ismeretes a biomassza elgázosítása is, amely a zöld hidrogén előállításának tisztább, költséghatékony és fenntartható folyamatoként jelenik meg (Moneti et al., 2016).

Szintén egy érdekes eredményt produkál, ha a víz elektrolízisére megújuló energia helyett atomenergiát, vagy vegyes hálózatból származó villamos energiát használunk. Ebben az esetben a hidrogén ugyanis rózsaszín vagy sárga lesz. Emellett metánpirólízissel is előállítható hidrogén, ebben az esetben azt türkizkék hidrogénnek nevezzük. A sötét és a fekete vagy barna hidrogén kivételével az összes többi hidrogénszín gyakran alacsony

széntartalmú hidrogénnek vagy tiszta hidrogénnek tekintik.

A zöld hidrogéntermelés egyik fő hátránya manapság az előállítási költség, amely jelenleg 3-6-szor drágább, mint a szürke és barna hidrogén előállítása (Panchenko, 2022).

A zöld hidrogén mellett a legutóbbi kutatások eredménye a kék hidrogén, amely a szürke hidrogén kiterjesztésének is tekinthető, mivel előállítása szintén földgázon alapul.

Az Európai Bizottság (Európai Bizottság, 2011) megkülönbözteti a fosszilis alapú - amelyet szénből vagy földgázból nyernek -, a tiszta, vagy megújuló - amelyet víz elektrolízisével, megújuló forrásokból származó villamos energiával, biogáz reformálásával vagy biokémiai átalakításával állítanak elő biomasszából- és az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogént - ha elektrolitikus, alacsonyabb kibocsátású vagy fosszilis forrásokból állítják elő utilisation-storage systems (CCUS) rendszerekkel.

Ugyanakkor az egyes hidrogéntípológiákra vonatkozó jól meghatározott szabványok hiánya nagymértékben korlátozza a nemzetközi hidrogénkereskedelmet.

A hidrogénmeghajtású járművekre vonatkozó kutatási irányzatok

A szennyezőanyag-kibocsátás csökkentésének egyik módja az elektromos és hibrid autók közlekedési célú használatának ösztönzése a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagot égető belső égésű motorral szerelt gépjárművek helyett (Rezvani et al., 2015, Li et al., 2017 és Lin és Wu et al., 2017).

Rezvani a fogyasztók elektromos gépjárművekhez kapcsolódó elfogadási magatartásával kapcsolatban kiemelte, hogy a fogyasztói érzelmek fontosnak bizonyultak az autóvásárlások során. Li kutatásai alapján megállapítható, hogy a fiatal, középkorú, jól képzett férfi fogyasztók rendelkeznek erősebb elfogadási hajlandósággal, ha ilyen járművekről van szó. A vásárlás során fontos szempontként jelentek meg a hatótávolság, a töltéssel kapcsolatos problémák és a beszerzési költségek. Liao emellett kiemelte azt is, hogy a pénzügyi, műszaki és infrastrukturális jellemzők is jelentős hatást gyakorolnak az elektromos járművek választására. E szerzők az adócsökkentési politikákat hatékonyak találták, míg más szakpolitikai intézkedések (pl. árképzés) hatását továbbra is ellentmondásosnak tekintik.

Az elektromos energiaforrások, amelyeket az elektromos járművek üzemanyagként használnak, megváltoztathatja az elektromos járművek szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére gyakorolt hatását (Lin - Wu 2021). Lin és Wu kiemeli, hogy mivel a villamosenergia-termelésben felhasznált energiaforrások eltérőek, a hálózati rendszer szénlábnyoma az energiapolitikától, a földrajzi helytől és a napszaktól függően különböző lehet. Ennek köszönhetően, figyelembe véve a jövőbeli elektromos járművek előrejelzéseit is, létfontosságú, hogy a töltési igényeket alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrásokkal elégítsük ki.

A globális elektromos járművek piacának mérete gyorsan nőtt az elmúlt évtizedben, a könnyű és nagy teherbírású elektromos járművek összlétszáma 2020 végére elérte a 10 milliót, illetve az 1 milliót (McKerracher et al., 2021). A BloombergNEF szerint a piaci kilátások szerint 2040-re az elektromos járművek adják majd az újautó-eladások 58%-át. Az elektromos járművek világpiacát Kína, az Egyesült Államok (USA) és Európa uralja (Bigra et al., 2021).

A szakirodalom az elektromos járművek alábbi típusainak elemzésére helyezi a hangsúlyt: a hibrid elektromos járművek (HEV) (Ehsani et al., 2018), a plug-in hibrid elektromos járművek (PHEV) (Mui, 2007), az akkumulátoros elektromos járművek (BEV) (Ehsani et al., 2018; Standage, T. 2021, NationalGrid, 2021), és az üzemanyagcellás elektromos járművek (FCEV) (Dik et al., 2022).

Európában a német elektromos járművek piaci részesedése a legnagyobb, 395 000 új regisztrációval, ezt követi Franciaország (185 000 EV) és az Egyesült Királyság (176 000 EV).

Az Európai Unió (EU) országaiban erőteljesen növekszik az elektromos autók eladásának aránya olyan országokban, mint Norvégia és Hollandia, ahol az újonnan regisztrált autók aránya 75, illetve 25 százalék. Ez valószínűleg tovább fog gyorsulni, mivel ezek közül az országok közül sok fokozatosan megszünteti a benzines és dízelmotoros autók értékesítését, és az elektromos járművek akkumulátortöltő infrastruktúrájának fejlesztését tervezik a következő évtizedben (Pickett et al., (2021).

Egyes országok elektromos járművek piaci helyzete

	Kanada	Kína	Franciaország	Németország	Japán	Egyesült Államok
EV flották [egység]	Összesen: 209 171 BEV: 127 487 PHEV: 81,588 FCEV: 96	Összesen: 4 514 114 BEV: 3 512 477 PHEV: 996 191 FCEV: 5446	Összesen: 416 585 BEV: 281,603 PHEV-k: 134 607 FCEV: 375	Összesen: 634 236 BEV: 330 780 PHEV-k: 302 644 FCEV: 812	Összesen: 297 181 BEV: 136 700 PHEV: 156 381 FCEV: 4100	Összesen: 1 787 221 BEV: 1 138 654 PHEV: 639 432 FCEV: 9135
EV értékesítés Részvény [%]	az új autók 4,2%-a	az új autók 5,7%-a	11,3%-a az újnak autók	13,5%-a az újnak autók	az új autók 0,6%-a	az új autók 2,0%-a

Forrás: Abergel, 2021.

Az FCEV-k egy fedélzeti üzemanyagcellát használnak, amely a hidrogén üzemanyagot közvetlenül elektromos energiává alakítja, és akkumulátorban tárolja az elektromos motor meghajtására, valamint az autó egyéb kiegészítőinek meghajtására. 1966-ban a General Motors elkészítette az első FCEV-t, a GMC Electrovant, 112 km/h maximális sebességgel és 193 km hatótávval. Ezt a járművet azonban nem lehetett tömeggyártásba helyezni a hidrogéntermelés és az üzemanyagcella-köteggel kapcsolatos követelménye miatt (Qin, 2014).

A négy típusú elektromos jármű fő előnyeit és hátrányait a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat Elektromos járművek előnyei és hátrányai

EV típus	HEV-k	PHEV-k	BEV-k	FCEV-k
Strength	Alacsonyabb károsanyag-kibocsátás az ICE járműveknél	Alacsonyabb emisszió, mint a HEV-eknél	Nincs emisszió vagy nagyon alacsony	Nincs emisszió vagy nagyon alacsony
	Magas üzemanyag-hatékonyság	Magas üzemanyag-hatékonyság	Magas energiahatékonyság	Magas hatásfok
	Nincs sok probléma a töltőállomással	Sokféle üzemanyag/Nincs távolsági szorongás	Olajtól független/alacsony motorzaj	Független tőle az elektromosság
Weakness	Összetett technológia/magasabb költség	Komplex technológia	Magas beszerzési és akkumulátorköltség	Magas üzemanyagcella költség
	Az energiaforrások kezelése	Az energiaforrások kezelése	Töltőállomás problémák	Technikai kihívás és költség probléma
	Fosszilis tüzelőanyag/nehezebb kipufogócső-kibocsátás	Nehezebb kipufogócső-kibocsátás	Elemcsere követelmény	H 2 generálás problémái

Forrás: Kebriaei 2015 és Agarwa 2019

Lipman (2018) tanulmánya szerint a hidrogén üzemanyagcellás járműveket a General Motors „Electrovan” 1966-os bemutatása óta fejlesztik. A hivatkozott tanulmány azt is kiemeli, hogy a legújabb hidrogén meghajtású járművek már 4-5 perc alatt képesek tankolni, hatótávolságuk pedig körülbelül 450-580 kilométer, amely azonos a fogyasztók korábbi, a benzin- és dízelmotoros járművekkel szemben támasztott elvárásaival.

A fenti rövidítést használva a FCEV-k kapcsán kiemelendő, hogy azok számos olyan alkatrészt tartalmaznak, mint a BEV-k, például elektromos motorokat és teljesítményvezérlőket vagy invertereket, azonban a legfontosabb különbség a fő energiaforrásban rejlik: amíg ugyanis a BEV-ek az akkumulátorban tárolt energiát használják fel, az FCEV-k üzemanyagcellákat használnak. Az üzemanyagcellák könnyebbek és kisebbek, ráadásul mindaddig képesek áramot termelni, amíg az üzemanyagot szállítják (Pollet et al., 2014). Az üzemanyagcella egy olyan elektrokémiai eszköz, amely a hidrogén kémiai energiáját elektromos energiává és hővé alakítja (Hayes - Goodarzi, 2018). Az üzemanyagcella által termelt energia közvetlenül táplálhatja a jármű vontatómotorját, vagy tárolható akkumulátorban vagy ultrakondenzátorban. Egyes szerzők ugyanakkor kiemelik, hogy az üzemanyagcellák összetett szerkezete és anyagtulajdonságai miatt teljesítményromlásukat könnyen befolyásolják a vezetési körülmények, amelyek magas üzemeltetési költséget eredményeznek (Quan et al., 2021).

A hidrogén meghajtású járművek életciklus-értékelésével (LCA) kapcsolatban Ahmadi és Kjeang (2020) arra a következtetésre jutott, hogy valós vezetési körülmények között az elektrolízisből származó hidrogén akár 72%-kal is csökkentheti az ÜHG-kibocsátást.

Ahmadi és Khoshnevisan (2022) egy nemrégiben közzétett tanulmányában egy hidrogén üzemanyagcellás jármű dinamikus modelljét használta a teljesítmény szimulálására az üzemanyagcella-romlás hatását is vizsgálva. A kutatás arra világított rá, hogy hatezer óra működés után az üzemanyagcella 11,1%-os feszültségesést produkál, ami 14,3%-os üzemanyagfogyasztás-növekedést eredményezett. Az átfogó - mind az üzemanyag-, mind a járműciklusokat figyelembe vevő - életciklus-értékelés rámutatott arra is, hogy a nukleáris energiára épülő termokémiai vízbontás és a napenergiával végzett elektrolízis jelentős CO₂-kibocsátás csökkenést okozott a benzines járművekhez képest. Hasonlóan kedvező eredményeket mutatott a VOC-kibocsátás elemzése is.

A hidrogén meghajtású járművek elterjedésének nehézségei

A hidrogén meghajtású járművek piaci elterjedését még számos tényező hátráltatja: az üzemanyagcellás járművek egyik legnagyobb akadály a közös hálózaton való elosztás hiánya, valamint a gáz- és a cseppfolyósított hidrogén fázis relatíve magas költsége (Grüger et al., 2018). Emellett a piacra jutás feltételeit jelentősen befolyásolja az ilyen gépjárművek működtetéséhez, karbantartásához kapcsolódó infrastrukturális elemek hézagos volta is.

A hidrogénellátás a teljes folyamatot jelenti a hidrogéngáz előállításától a végső vásárló fogyasztásáig. A hidrogén ellátás infrastrukturális elemei pedig a teljes folyamathoz szükséges különféle eszközöket és infrastruktúra-elemeket foglalják magukban.

A hidrogén előállítására már utaltunk, ezért itt az ellátási lánc további elemeit említjük röviden. A hidrogén az állapottól függően gáz, folyékony vagy szilárd halmazállapotban tárolható, azonban a sűrített gázként történő tárolása a legelterjedtebb (Cho, Set al., 2021). Ebben a formában azonban nem alkalmas tömeges hidrogéntárolásra a szivárgási problémák révén, ezért nagy mennyiségű hidrogén tárolásának szükségessége esetén általában a folyékony állapotot részesítik előnyben. A cseppfolyósított hidrogén tárolási sűrűsége négyszer nagyobb, mint a 200 bar nyomásra sűrített hidrogéngázé és biztonságosabb is, azonban ennek kialakításához jelentős infrastrukturális beruházások szükségesek (Yanxing et al., 2019) mint például a tároló, szállító, az igénybevételt támogató rendszerek. A szilárd hidrogént fém-hidridekben tárolják alacsony nyomáson, az ilyen tárolási kapacitás azonban viszonylag alacsony, 0,06 kg/l, és meglehetősen költséges (Tarasov et al., 2021).

A hidrogén tárolása mellett jelentős kihívást jelent annak szállítása is. A hidrogén szállítása többnyire a hidrogéntárolás típusától függ. A hidrogéngáz csővezetéken vagy csőszállító utánfutón szállítható. Mivel a csővezeték-hálózat meglehetősen drága, az ilyen megoldás általában csak akkor gazdaságos, ha nagy mennyiségű hidrogént szállítanak (Dyatkin, B., 2018).

A cseppfolyósított hidrogén folyékony hidrogén tartálykocsival is szállítható, azonban ennél a technológiánál maga a cseppfolyósítás költséges folyamat, és a szállítás során csak kis mennyiség szállítható egyszerre (Staffell et al., 2017).

A megfelelő helyre szállított és tárolt hidrogén töltésére sajátos infrastrukturális elemek szükségesek. A hidrogéntöltő-állomásokat vagy helyileg vagy telephelyen kívülről látják el hidrogénnel. Az előbbi esetében a hidrogéntermelő létesítmény, az utóbbi esetében pedig a hidrogén költséges szállítása jelent gazdasági akadályt

(Kumar et al., 2022). Engel azt is kiemelte, hogy a töltési infrastruktúrákhoz való elégtelen hozzáférés akadályozza a fogyasztók döntését a környezetbarát járművek vásárlásával kapcsolatban (Engel et al., 2018).

Az infrastrukturális fejlesztési szükségletek mellett számos olyan tényező is a jelenleg folyó nemzetközi kutatások központi kérdését képezi, amelyek a hidrogén igénybevételével működő közlekedési eszközök megfelelőségének egyes aspektusait vizsgálják. Ilyen például a Tanc (2020) által kiemelt tartósság és megbízhatóság. A hidrogén alapú gépjármű működtetése kapcsán ugyanis a kimunkált új járművek megbízhatóságának és tartósságának javítása, a hidrogén üzemanyagcellás járművekkel kapcsolatos autóiipari kutatások egyik fontos kérdésköre.

Az ilyen gépjárművek kapcsán számos biztonsági kérdéssel összefüggő kutatás van folyamatban: az egyik jelentős kihívás a hidrogén megfelelő tárolása és szállítása. A gáz halmazállapotú hidrogén kezelésére és szállítására használt anyagok különböző tulajdonságai (hajlékonyság, törés és kifáradás) a hidrogénnek való kitettség következtében lényegesen leromlanak (Marchi et al., 2017).

Mivel a hidrogén gyorsabban szivárog, mint más gázok (Foorginezhad, 2021), és más tüzelőanyagokhoz képest jelentősen széles gyúlékonysági tartománynak köszönhetően sokkal könnyebben meggyullad (Sánchez, 2014), a megfelelő biztonsági előírások elengedhetetlenek a hidrogén távozásának elkerülése érdekében.

A biztonsági faktorok kapcsán számos szerző foglalkozik a hidrogénkibocsátás érzékelésére és felügyeletére szolgáló érzékelők (hidrogéndetektorok) használatával, amelyek a rendszerek automatikus érzékelésére, illetve leállítására, riasztások és szellőzőrendszerek aktiválására, valamint a vészhelyzeti reagálók figyelmeztetésére alkalmazhatók (Rivkin, 2016).

Érdemes utalnunk arra is, hogy a hidrogéntechnológia a közlekedési ágazatban alternatív üzemanyagként való alkalmazását és elterjedését jelentős mértékben meghatározza a hidrogén jelenlegi és jövőbeni költsége, a hidrogén üzemanyagként való felhasználásának technológiai előnyei az üzemanyagcellák használatakor, az üvegházhatású gázok kibocsátásának hosszú távú korlátozásai és a versenyképes technológiák költségei (Khrouz et al., 2020).

Összegzés

Az elmúlt időszakban jelentős előrelépés történt a hidrogén üzemanyagcellás gépjárművek technológiai, infrastrukturális és gazdaságossági feltételeinek hatékonyabbá tétele érdekében. A szakirodalmi kutatások egy meghatározó fókuszterülete a hidrogén közlekedési ágazatba történő integrálása. A hidrogén a legnagyobb mennyiségben előforduló elem. Az energiahozama magas, 120 MJ/kg, ami körülbelül 2,75-ször nagyobb, mint a szénhidrogén üzemanyagoké és körülbelül 2,6-szor több energiát tárol tömegegységként, mint a benzin (Balat, 2005). A hidrogénüzemű járművek hozzájárulhatnak a közúti járművek CO₂ és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez vagy megszüntetéséhez (Ball, 2009). A hidrogén attraktivitása azzal is indokolható, hogy a hidrogén felhasználható üzemanyagként a már kifejlesztett belső égésű motorokban, hiszen működése nem különbözik nagyban a belső égésű motoroknál használt egyéb gáz halmazállapotú üzemanyagoktól.

A kapcsolódó fejlesztések drasztikusan megnövekedtek az elmúlt néhány évben és a fogyasztói érdeklődés is pozitív tendenciákat mutat.

Lipmann (2018) tanulmányában többek között arról is beszámol, hogy az önkéntes vezetőknek milyen tapasztalatai vannak a hidrogén meghajtású járművekkel összefüggésben. A tanulmány szerint a vizsgálatban részt vevő járművezetők 80%-a úgy találta, hogy az üzemanyagcellás jármű teljesítménye „meghaladta” vagy „nagy mértékben meghaladta” az elvárásait, 98%-uk szerint a hidrogén a járművek üzemanyagaként „olyan biztonságos” vagy „biztonságosabb”, mint a benzin. A résztvevők 94%-a „olyan biztonságosnak” vagy „biztonságosabbnak” tartotta a járművek hidrogénnel való feltöltésének folyamatát, mint a benzines üzemanyag esetében. A résztvevők 62%-ának legalább egy utazást le kellett mondania hidrogénüzemanyag hiánya miatt, és bár a résztvevők 75%-a teljesen vagy többnyire megfelelőnek ítélte a jármű hatótávolságát, ha az üzemanyag-infrastruktúra rendelkezésre állása nem jelentene problémát, és az üzemanyag kilométerenkénti költsége egyenlő lenne a benzinnel, a résztvevők 75%-a hajlandó lenne áttérni erre a technológiára.

A technológia ugyanakkor még számos kihívás előtt áll, amelyek megfelelő szabályozással, ösztönző- és támogatáspolitikai eszközökkel, a kapcsolódó kutatás-fejlesztési tevékenység fokozásával hamarosan felszámolhatóvá válhatnak.

Felhasznált irodalom

- Abergel, T.- Bunsen, T.- Gorner, M.- Leduc, P.- Pal, S.; Paoli, L.- Raghavan, S.- Tattini, J.- Teter, J.- Wachche, S.- et al. Global EV Outlook 2020|Entering the Decade of Electric Drive? IEA: Paris, France, 2020.
- Agarwal, O.P.- Jhunjhunwala, A.- Kaur, P.-Yadav, N.-Chakrabarty, S.- Kumar, P.- Pai, M.-Bhatt, A. A Guidance Document on Accelerating Electric Mobility in India; WRI India: Mumbai, India, 2019.
- Agnolucci, P. - McDowall, W. (2013). Designing future hydrogen infrastructure: Insights from analysis at different spatial scales. *International journal of hydrogen energy*, 38(13), 5181-5191.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.042>
- Ahmadi, P. - Khoshnevisan, A. (2022). Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26758-26769.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.215>
- Ahmadi, P.-Torabi, S. H.- Afsaneh, H.-Sadegheih, Y.- Ganjehsarabi, H. - Ashjaee, M. (2020). The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3595-3608.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.165>
- Anwar, Muhammad Azfar - Dhir, Amandeep - Jabeen, Fauzia - Zhang, Qingyu
- Arbis, D.- Rashidi, T.H.- Dixit, V.V.-Vandebona, U. (2016). Analysis and planning of bicycle parking for public transport stations. *Int. J. Sustain. Transport*. 10 (6), 495-504. <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1010668>
- <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1010668>
- Ardo, F. M.- Lim, J. W.- Ramlil, A.- Lam, M. K.- Kiatkittipong, W.- Abdelfattah, E. A.- Sahrin, N. T. (2022). A review in redressing challenges to produce sustainable hydrogen from microalgae for aviation industry. *Fuel*, 330, 125646.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125646>
- Bachand-Marleau, J.- Larsen, J.- El-Geneidy, A.M. (2011). Much-Anticipated Marriage of Cycling and Transit: How Will It Work? *Transp. Res. Rec.* 2247 (1), 109-117.
<https://doi.org/10.3141/2247-13>.
- Balat, M. (2005). Current alternative engine fuels. *Energy sources*, 27(6), 569-577.
<https://doi.org/10.1080/00908310490450458>
- Balcombe, P.- Speirs, J.- Johnson, E.- Martin, J.- Brandon, N. - Hawkes, A. (2018). The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1077-1088.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.089>
- Ball, M. - Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen—opportunities and challenges. *International journal of hydrogen energy*, 34(2), 615-627.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014>
- Barbieri, D.M.- B. Lou, M. - Passavanti, C. - Hui I. - Hoff, D. Antunes Lessa- G. Sikka, et al. (2021). "Impact of COVID-19 Pandemic on Mobility in Ten Countries and Associated Perceived Risk for All Transport Modes." *PLOS ONE* 16 (2): e0245886. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245886>.
- Barrios, J. M. - Hochberg, Y. V. (2020). Risk perception through the lens of politics in the time of the COVID-19 pandemic (No. w27008). National Bureau of Economic Research.
<https://doi.org/10.3386/w27008>.
- Bhandari, R.- Trudewind, C. A. - Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis—a review. *Journal of cleaner production*, 85, 151-163.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>
- Bhaskar, A.- Assadi, M. - Nikpey Somehsaraei, H. (2020). Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen. *Energies*, 13(3), 758.
<https://doi.org/10.3390/en13030758>
- Bigra, E.M.- Connelly, E.- Gorner, M.- Lowans, C.; Paoli, L.- Tattini, J.- Teter, J.- LeCroy, C.-nMacDonnell, O.- Welch, D. et al. Global EV Outlook 2021|Accelerating Ambitions Despite the Pandemic; IEA: Paris, France, 2021.
- Bockris, J. N.- Veziroğlu, T. N. (1983). A solar-hydrogen economy for USA. *International Journal of hydrogen energy*, 8(5), 323-340.
[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(83\)90048-4](https://doi.org/10.1016/0360-3199(83)90048-4)
- Boukhanouf, R. Electric Vehicles: V2G for Rapid, Safe, and Green EV Penetration. *Energies* 2022, 15, 803. <https://doi.org/10.3390/en15030803>
- Buehler, R.- Pucher, J. (2021). COVID-19 Impacts on Cycling, 2019–2020. *Transport Reviews* 41 (4), 393–400. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1914900>.
- Chen, Y.- Lan, L.- Hao, Z. - Fu, P. (2022). Cradle-grave energy consumption, greenhouse gas and acidification emissions in current and future fuel cell vehicles: study based on five hydrogen production methods in China. *Energy Reports*, 8, 7931-7944.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.021>
- Cho, S. M.- Kim, C.- Kim, K. S. - Kim, D. K. (2021). Lightweight hydrogen storage cylinder for fuel cell propulsion systems to be applied in drones. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 194, 104428.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104428>
- Cui, Q.- He, L., Liu, Y.- Zheng, Y.- Wei, W.- Yang, B. - Zhou, M. (2021). The impacts of COVID-19 pandemic on China's transport sectors based on the CGE model coupled with a decomposition analysis approach. *Transport Policy*, 103, 103-115.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.017>
- Dagdougui, H. (2012). Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6), 5318-5327.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.041>
- Dawood, F.- Anda, M. - Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847-3869.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 37(2), 1954-1971.
- Dyatkin, B. (2018). Energy focus: structural water plays key role in hybrid energy-storage device. *MRS Bulletin*, 43(8), 567-568.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- Ehsani, M.- Gao, Y.- Longo, S.- Ebrahimi, K. M. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
https://www.researchgate.net/publication/266672706_Modern_Electric_Hybrid_Electric_and_Fuel_Cell_Vehicles
- Engel, H.- Hensley, R.- Knupfer, S. - Sahdev, S. (2018). Charging ahead: Electric-vehicle infrastructure demand. McKinsey Center for Future Mobility, 8.
- Fang, X.- Wang, Y.- Dong, W.- Yang, Q.- Sun, S. (2023). Optimal energy management of multiple electricity-hydrogen integrated charging stations. *Energy*, 262, 125624.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125624>
- Fiorello, D.- Zani, L. (2015). EU Survey on Issues Related to Transport and Mobility; JRC Science and Policy Report: Seville, Spain.
- Foorginezhad, S.- Mohseni-Dargah, M.- Falahati, Z.- Abbassi, R.- Razmjou, A. - Asadnia, M. (2021). Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 489, 229450.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229450>
- Gholamian, E.- Mehr, A. S.- Yari, M. - Carton, J. G. (2023). Dynamic simulation and techno-economic assessment of hydrogen utilization in dual fuel (Hydrogen/biogas) micro gas turbine systems for a wastewater treatment plant. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 220-237.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.045>
- Griffiths, S.- Sovacool, B. K.- Kim, J.- Bazilian, M. - Uratani, J. M. (2021). Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options. *Energy Research & Social Science*, 80, 102208.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102208>
- Grüger, F.- Dylewski, L.- Robinus, M. - Stolten, D. (2018). Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. *Applied energy*, 228, 1540-1549.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.014>
- Hayes, J. G. - Goodarzi, G. A. (2018). Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles.
 DOI:10.1002/9781119063681
- Hilbert, M.- López, P. (2011). The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. *science*, 332(6025), 60-65.

DOI: 10.1126/science.1200970

Hobohm, J.- der Maur, A. A.- Dambeck, H.- Kemmler, A.- Koziel, S.- Kreidelmeyer, S.- Apfelbacher, A. (2018). „Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende “. Prognos AG.

Hwangbo, S.- Heo, S.- Yoo, C. (2018). Network modeling of future hydrogen production by combining conventional steam methane reforming and a cascade of waste biogas treatment processes under uncertain demand conditions. *Energy Conversion and Management*, 165, 316-333.

DOI:10.1016/j.enconman.2018.03.069

History-Fuel cells Work History—FuelCellsWorks. <https://fuelcellworks.com/knowledge/history/> (A letöltés dátuma: 2023. 01.19.).

IEA. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. Paris, France: IEA.

Inci et al (2022). A choice experiment on preferences for electric and hybrid cars. *Transportation Research Part D*.

Ireson, R.- Fuller, A.- Woods, J.- Simon, R.- Andrews, G.- Bingham, P. (2019). *Alternative Fuel Switching Technologies for the glass sector: Final Report*. Glass. Futures.

Jovan, D. J. - Dolanc, G. (2020). Can green hydrogen production be economically viable under current market conditions. *Energies*, 13(24), 6599.

<https://doi.org/10.3390/en13246599>

Kebriaei, M. - Niasar, A.H.- Asaei, B. (2015). Hybrid electric vehicles: An overview. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Shenzhen, China, 19–23 October 2015.

Khzouz, M.- Gkanas, E. I.- Shao, J.- Sher, F. - Beherskyi, D.- El-Kharouf, A. - Qubeissi, M. A. (2020). Life cycle costing analysis: Tools and applications for determining hydrogen production cost for fuel cell vehicle technology. *Energies*, 13(15), 3783.

<https://doi.org/10.3390/en13153783>

Kurzweil, P.- Garche, J. (2017). Overview of Batteries for Future Automobiles. In *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 27–96.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63700-0.00002-7>

Lahnaoui, A.- Wulf, C. - Dalmazzone, D. (2021). Optimization of hydrogen cost and transport technology in France and Germany for various production and demand scenarios. *Energies*, 14(3), 744.

<https://doi.org/10.3390/en14030744>

Lesmana, L. A.- Aziz, M. (2023). Adoption of triply periodic minimal surface structure for effective metal hydride-based hydrogen storage. *Energy*, 262, 125399.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125399>

Li, L. - Manier, H. - Manier, M. A. (2019). Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 342-360.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.060>

Lin, B.- Wu, W. (2021). The impact of electric vehicle penetration: A recursive dynamic CGE analysis of China. *Energy Econ*. 94, 105086.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105086>

Li, S.- Zhang, H.- Nie, J.- Dewil, R.- Baeyens, J.- Deng, Y. (2021). The direct reduction of iron ore with hydrogen. *Sustainability*, 13(16), 8866.

DOI:10.3390/su13168866

Lipman, TE- Elke, M. - Lidicker, J. (2018). Hidrogén-üzemanyagcellás elektromos járművek teljesítménye és a felhasználói válasz értékelése: Egy kiterjesztett járművezetői vizsgálat eredményei. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (27), 12442-12454.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.172>

Li, W.- Long, R.- Chen, H.- Geng, J. (2017). A review of factors influencing consumer intentions to adopt battery electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 318-328.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.076>

Maroušek, J. (2022). Nanoparticles can change (bio) hydrogen competitiveness. *Fuel*, 328, 125318.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125318>

Martins, A. H.- Rouboa, A. - Monteiro, E. (2022). On the green hydrogen production through gasification processes: A techno-economic approach. *Journal of Cleaner Production*, 135476.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135476>

Maryam, S. (2017). Review of modelling approaches used in the HSC context for the UK. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(39), 24927-24938.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.303>

McKerracher, C.- Izadi-Najafabadi, A.- O'Donovan, A.- Albanese, N.- Soulopoulos, N.- Doherty, D.- Boers, M.- Fisher, R.- Cantor, C.- Frith, J. et al. (2020). *Electric Vehicle Outlook (EVO)*, BloombergNEF (BNEF): London, UK, 2020.

McKerracher, C.- O'Donovan, A.- Albanese, N.- Soulopoulos, N.- Doherty, D.- Boers, M.- Fisher, R.- Cantor, C.- Frith, J.- Mi, S. (2021). *Electric Vehicle Outlook (EVO)*; BloombergNEF (BNEF): London, UK, 2021.

Miocic, J.- Heinemann, N.- Edlmann, K.- Scafidi, J.- Molaei, F.- Alcalde, J. (2023). Underground hydrogen storage: A review. *Geological Society, London, Special Publications*, 528(1), SP528-2022.

<https://doi.org/10.1144/SP528-2022-88>

Mirzaeian, M.- Abbas, Q.- Hunt, M.R.C.- Galejeva, A.- Raza, R. Na-Ion Batteries. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 23, 947–958.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00052-8>

Moliner, R.- Lázaro, MJ- Suelves, I. (2016). A hidrogéngazdaság felé való szakadéék áthidalására szolgáló stratégiák elemzése. *Int. J. Hydrogen Energy*, 41, 19500–19508.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.006>

Moneti, M.- Di Carlo, A.- Bocci, E.- Foscolo, P. U.- Villarini, M. - Carlini, M. (2016). Influence of the main gasifier parameters on a real system for hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 11965-11973.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.171>

Mui, S.- Shelby, M.- Chartier, D.- Ganss, D. (2007). *Plug-In Hybrids: A Scenario Analysis*; US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.

Murdoch, HE - Gibb, D. - Andre, T.- Sawin, JL - Brown, A.- Randalder, L.- Andre, T.- Brown, A.- Collier, U.- Dent, C. et al. (2021). *Renewable energy 2021 – Global Status Report 2021*; In. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf (A letöltés dátuma: 2023. január 21.).

Newborough, M., - Cooley, G. (2020). Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bulletin*, 2020(11), 16-22.

[https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0)

Noussan, M. - Raimondi, P. P.- Scita, R., - Hafner, M. (2020). The role of green and blue hydrogen in the energy transition—A technological and geopolitical perspective. *Sustainability*, 13(1), 298.

<https://doi.org/10.3390/su13010298>

Panchenko, V. A. - Daus, Y. V.- Kovalev, A. A.- Yudaev, I. V. - Litt, Y. V. (2022). Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.084>

Petrescu, R. V. V.- Machin, A.- Fontanez, K.- Arango, J. C.- Marquez, F. M.- Petrescu, F. I. T. (2020). Hydrogen for aircraft power and propulsion. *International journal of hydrogen energy*, 45(41), 20740-20764.

Pickett, L.- Winnet, J.- Carver, D.- Bolton, P. (2021). *Electric Vehicles and Infrastructure*; House of Commons Library: London, UK.

Pollet, B. G.- Staffell, I.- Shang, J. L. - Molkov, V. (2014). Fuel-cell (hydrogen) electric hybrid vehicles. In *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance* (pp. 685-735). Woodhead Publishing.

<https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.685>

Puig-Arnavat, M.- Bruno, J. C. - Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2841-2851.

Rezvani, Z.- Jansson, J.- Bodin, J. (2015). Előrelépések a fogyasztói elektromos járművek bevezetésével kapcsolatos kutatásban: Áttekintés és kutatási menetrend. *Közlekedéskutatás D rész: közlekedés és környezet*, 34, 122-136.

Qin, N.- Raissi, A.- Brooker, P. (2014). *Analysis of Fuel Cell Vehicle Developments*; The Florida Solar Energy Center (FSEC): Cocoa, FL, USA.

<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-CR-1987-14.pdf>

Quan, S.- Wang, Y. X.- Xiao, X.- He, H. - Sun, F. (2021). Real-time energy management for fuel cell electric vehicle using speed prediction-based model predictive control considering performance degradation. *Applied Energy*, 304, 117845.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117845>

Rifkin, J. (2002). *The hydrogen economy: The creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth*. Penguin.

Rivkin, C. H. (2016). Hydrogen Fuel Cell Vehicle Regulations, Codes, and Standards. *Hydrogen Energy and Vehicle Systems*, 2010(2020), 311.

Sato, F.E.K.- Nakata, T. (2020). Energy consumption analysis for vehicle production through a material flow approach. *Energies*, 13, 2396.

<https://doi.org/10.3390/en13092396>

Siddiquei, Ahmad Nabeel (2023): Unconventional green transport innovations in the post-COVID-19 era. A trade-off between green actions and personal health protection, *Journal of Business Research*, 155,

DOI - <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113442>

Singh, V.- Gupta, K.- Agarwal, A. - Chakrabarty, N. (2022). Psychological impacts on the travel behaviour post Covid-19. *Asian Transport Studies*, 8, 100087.

<https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2022.100087>

Standage, T. (2021). The Lost History of the Electric Car—And What It Tells Us about the Future of Transport. 2021. In. <https://www.theguardian.com/technology/2021/aug/03/lost-history-electric-car-future-transport> (A letöltés dátuma: 2023. december 21.).

Stephens-Romero, S. D.- Brown, T. M.- Kang, J. E.- Recker, W. W. - Samuelsen, G. S. (2010). Systematic planning to optimize investments in hydrogen infrastructure deployment. *International journal of hydrogen energy*, 35(10), 4652-4667.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.024>

Tanç, B.- Arat, H. T.- Conker, Ç. - Baltacıoğlu, E. - Aydin, K. (2020). Energy distribution analyses of an additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26344-26356.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.241>

Tiikkaja, H. - Viri, R. (2021). The effects of COVID-19 epidemic on public transport ridership and frequencies. A case study from Tampere, Finland. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100348. DOI100348. 10.1016/j.trip.2021.100348.

<https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100348>

Trapp, C. T. - Kanbach, D. K. - Kraus, S. (2022). Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 1(2), 100014.

Wappler, M.- Unguder, D. - Lu, X.- Ohlmeyer, H. - Teschke, H. - Lueke, W. (2022). Building the green hydrogen market—Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.253>

Wikramanayake, E.- Acharya, P. V. - Kapner, M. - Bahadur, V. (2021). Green hydrogen-based energy storage in Texas for decarbonization of the electric grid. In 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) (pp. 409-415). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00070>

Yap, J. - McLellan, B. (2023). A hidrogéngazdaság kutatásának, fejlesztésének és elvárásainak történeti elemzése, 1972–2020. *Környezet*. 10 (1), 11.

Yue, M.- Lambert, H. - Pahon, E.- Roche, R.- Jemei, S. - Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>

Yusaf, T.- Fernandes, L.- Abu Talib, A. R.- Altarazi, Y. S.- Alrefae, W.- Kadirgama, K. - Laimon, M. (2022). Sustainable aviation—hydrogen is the future. *Sustainability*, 14(1), 548.

DOI:10.3390/su14010548

Zementwerke, V. D. (2020). Dekarbonisierung von Zement und Beton—Minderungspfade und Handlungsstrategien.

Zhang, C.- Wei, Y.L.- Cao, P.F.- Lin, M.C. (2018). Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3091-3106.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.030>