

ELEKTRIFIKÁCIÓ ÉS HIDROGÉN: TRENDEK A VÁROSI KÖZLEKEDÉSBEN

ELECTRIFICATION AND HYDROGEN: TRENDS IN URBAN TRANSPORT

Kun Krisztián ^{1*}, Kis Dávid István ²

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, H-6000 Kecskemét, Magyarország, <https://orcid.org/0000-0001-7194-3581>

² Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, H-6000 Kecskemét, Magyarország <https://orcid.org/0000-0001-8265-956X>
<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.007>

Kulcsszavak:

elektrifikáció
hidrogénhajtás
alternatív hajtások
dekarbonizáció
városi mobilitás

Keywords:

electrification
hydrogen propulsion
alternative powertrains
decarbonization
urban mobility

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. november 26.
Átdolgozva 2025. december 15.
Elfogadva 2026. február 1.

Összefoglalás

A városi mobilitás dekarbonizációja világszerte felgyorsult: az Európai Unióban 2025 első hét hónapjában az új személyautók közel 16%-a volt tisztán elektromos (BEV). 2024-ben Kínában az elektromos modellek aránya közel 45% volt, miközben a személyautó-piac eladásai tízmillió felett alakultak. Magyarországon 2023 végére közel 41 ezer BEV volt állományban, a nyilvános töltőpontok száma pedig 2024 közepére 2800 felett járt. A tisztán akkumulátoros hajtás személygépjárműveknél a legtöbb felhasználási profilban műszakilag és költségben is preferált megoldás. A hidrogén-üzemanyagcella (FCEV) szerepe ott ígéretes, ahol magas kihasználtság, rövid újratöltési idő, téli hőkomfort és szigorú tömegkorlát együttese szükséges, illetve ahol a megújuló-többlet szezonális tárolása és a hálózati rugalmasság kiemelt követelmény.

Abstract

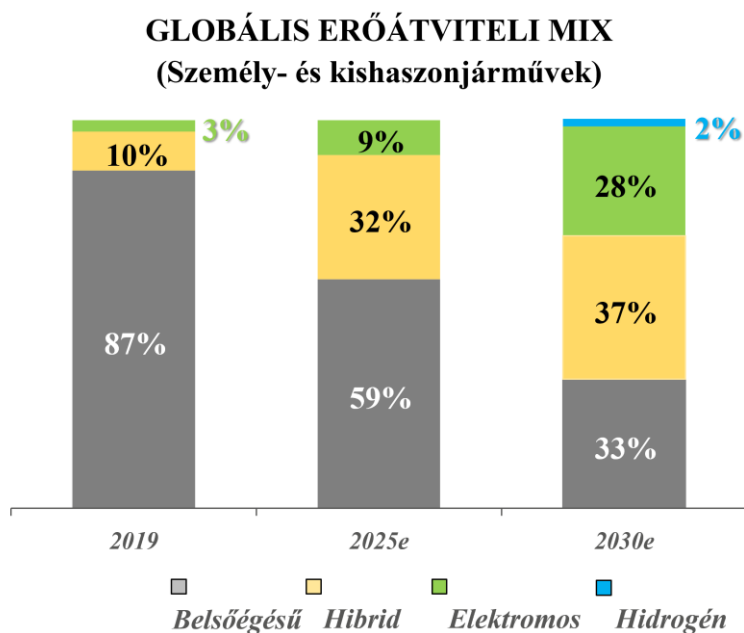
Decarbonizing urban mobility has accelerated worldwide: in the European Union, nearly 16% of new passenger cars registered in the first seven months of 2025 were fully electric (BEVs). In China, new energy vehicles (NEVs) accounted for close to 45% of the market in 2024, while passenger-car sales exceeded ten million units. In Hungary, the BEV fleet reached roughly 41,000 by end-2023, and the number of public charging points surpassed 2,800 by mid-2024. For urban passenger cars, battery-electric powertrains are a technically and economically preferred solution across most use cases. The role of hydrogen fuel cell vehicles (FCEVs) is promising where high utilization, short refueling times, robust winter thermal comfort, and strict mass constraints are required, as well as in systems prioritizing seasonal storage of renewable surpluses and grid flexibility.

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: kun.krisztian@nje.hu

1. Új perspektívák az autóiparban

A közúti közlekedés jövőjét meghatározó trendek között kiemelt szerepet kapnak a fenntartható, alacsony vagy zero kibocsátású hajtásláncok és a járművek intelligens technológiái. A klímaváltozás hatására a szabályozók egyre szigorúbb emissziós előírásokat vezetnek be, így az autógyártóknak gyorsítaniuk kell az elektromos hajtások elterjedését. Az előrejelzések szerint 2030-ra az EU járműparkjának akár 30%-át tisztán elektromos járművek (akkumulátoros *BEV* és üzemanyagcellás *FCEV* meghajtásúak) tehetik ki [1]. Ezt a folyamatot nemcsak a környezetvédelmi előírások, hanem állami ösztönzők is segítik. Emellett jelentős beruházások irányulnak a hidrogéntekológia fejlesztésére az energiatünetlenség és a dekarbonizáció érdekében [1]. Mindez azt eredményezi, hogy az elektromos hajtás (beleértve a hidrogén üzemanyagcellás technológiát is) a következő évtizedben az autóipar legdinamikusabban növekvő szegmense lesz.

A hagyományos belsőégésű motoros (*ICE*) járművek piaci részesedése várhatóan drasztikusan csökken. **1. ábra** szemlélteti a globális hajtáslánc-megoszlás változását: míg 2019-ben a járművek mintegy 87%-a tisztán belsőégésű motorral működött, ez az arány 2030-ra ~33%-ra eshet vissza, miközben az elektromos hajtású (hibrid és akkumulátoros) járművek összesített aránya számottevően nőni fog [2]. A tisztán akkumulátoros elektromos járművek aránya globálisan elérheti a ~28%-ot, az üzemanyagcellás járművek pedig a 2%-ot 2030-ra [3]. Bár a 2% első ránézésre csekélynek tűnik, ez világszinten mintegy 2 millió üzemanyagcellás személyautót jelent, kiegészítve további ~500 ezer darab hidrogénhajtású haszonjárművel [4] – vagyis a hidrogéntekológia is belép a tömeges alkalmazás szakaszába ebben az időtávban. Az átállás üteme 2025 után gyorsulhat fel igazán a szabályozások, a teljes élettartam-költség (*TCO*) csökkenése és az infrastruktúra fejlődése nyomán [5].



1. ábra. A járművek hajtásláncainak globális megoszlása 2019-ben, 2025-ben és 2030-ra.

Az elektromos és hidrogénhajtás térnyerésével párhuzamosan egy másik forradalom is zajlik az autóiparban: a járművek egyre okosabbak és összekapcsoltabbak lesznek. A vezetéstámogató rendszerek (*ADAS*) és a részleges önvezetés terén jelentős fejlesztések folynak. A következő években várhatóan elsősorban a 2-es és 3-as szintű (*Level 2/3*) autópilot megoldások tökéletesítésére fókuszálnak a gyártók, mivel a teljes autonóm járművek bevezetése a vártnál lassabban halad [6]. Emellett a digitalizáció és a konnektivitás is kulcstényezővé vált: 2025-re az új autók 80%-a online kapcsolattal fog rendelkezni, ami alapja az olyan szolgáltatásoknak, mint a valós idejű forgalmi adatok, *over-the-air* frissítések vagy a jármű-fleet menedzsment [7]. A fogyasztói igények megkövetelik az **5G** hálózatok és az okoseszköz-integráció alkalmazását az autókban is. Természetesen mindezzel együtt a megfizethetőség is kiemelt prioritás: a gyártók arra törekednek, hogy az új technológiák bevezetése mellett az autók elérhető árszinten maradjanak [7].

Összességében az autóipar stratégiai irányai napjainkban a következőkben foglalhatók össze: a *zöld mobilitás* terén az ultra-alacsony és zéró emissziójú hajtások fejlesztése, a *vezetéstámogatás* és *autonómia* terén a biztonságot és kényelmet növelő technológiák fejlesztése, valamint az *összekapcsolhatóság* (V2X kommunikáció, infotainment) terén új szolgáltatások bevezetése. Az iparág szereplői ezen területeken versenyeznek a piaci elsőségért és a magas hozzáadott értékű megoldásokért [8,9]. Különösen a *fenntartható mobilitás* részeként a hidrogén üzemanyagcella-technológia került reflektorfénybe a közlekedés dekarbonizációjában. A hidrogén várhatóan elsősorban a nagy kihasználtságú, fix menetrendes tömegközlekedésben és a közép–nehéz áruszállításban kap tartós szerepet, ahol a gyors (3–5 perces) tankolás és a hosszú, terheléstől kevésbé függő hatótáv kulcsérték. A busz- és teherflották üzemeltetése depós jellegű, ezért a hidrogéntöltés néhány stratégiai telephelyre koncentrálható, ami gazdaságosabbá teszi a jelentős beruházási igényű infrastruktúra-kiépítést, mint a szétszórta egyedi állomások. A hidrogén-üzemanyagcella kisebb akkumulátorpakkal is biztosítja a szükséges teljesítményt, így a jármű saját tömege és hasznos teherbírása kedvező marad, különösen téli üzem és klímaterhelés mellett. A zöld hidrogén integrálható a villamosenergia-rendszerbe szezonális energiatárolóként, ezért a közlekedési felhasználás összekapcsolható a megújuló kiegészítéssel és a hálózati rugalmasság növelésével. A technológia skálázása kedvezően befolyásolja a teljes élettartam-költséget, továbbá a lokális zéró emisszió révén a városok levegőminősége is érdemben javulhat. Tehát a hidrogén különösen azokban a relatíve előre jelezhető útvonalú, nagy futásteljesítményű feladatokban erős (városi és elővárosi busz, regionális disztribúció, terminál–raktár közötti fuvar), ahol a töltési állásidő és a tömegkorlát a kritikus szűk keresztmetszet. Ugyanakkor a személygépjármű-mobilitásban is lehet létjogosultsága a hidrogénnek – jelen publikáció ezt a kérdést járja körül –, különösen célzott, nagy kihasználtságú FCEV-flották esetén, ahol a műszaki-üzemeltetési profil indokolja, és a H₂-ellátási lánc szervezeten kapcsolódik az üzemhez.

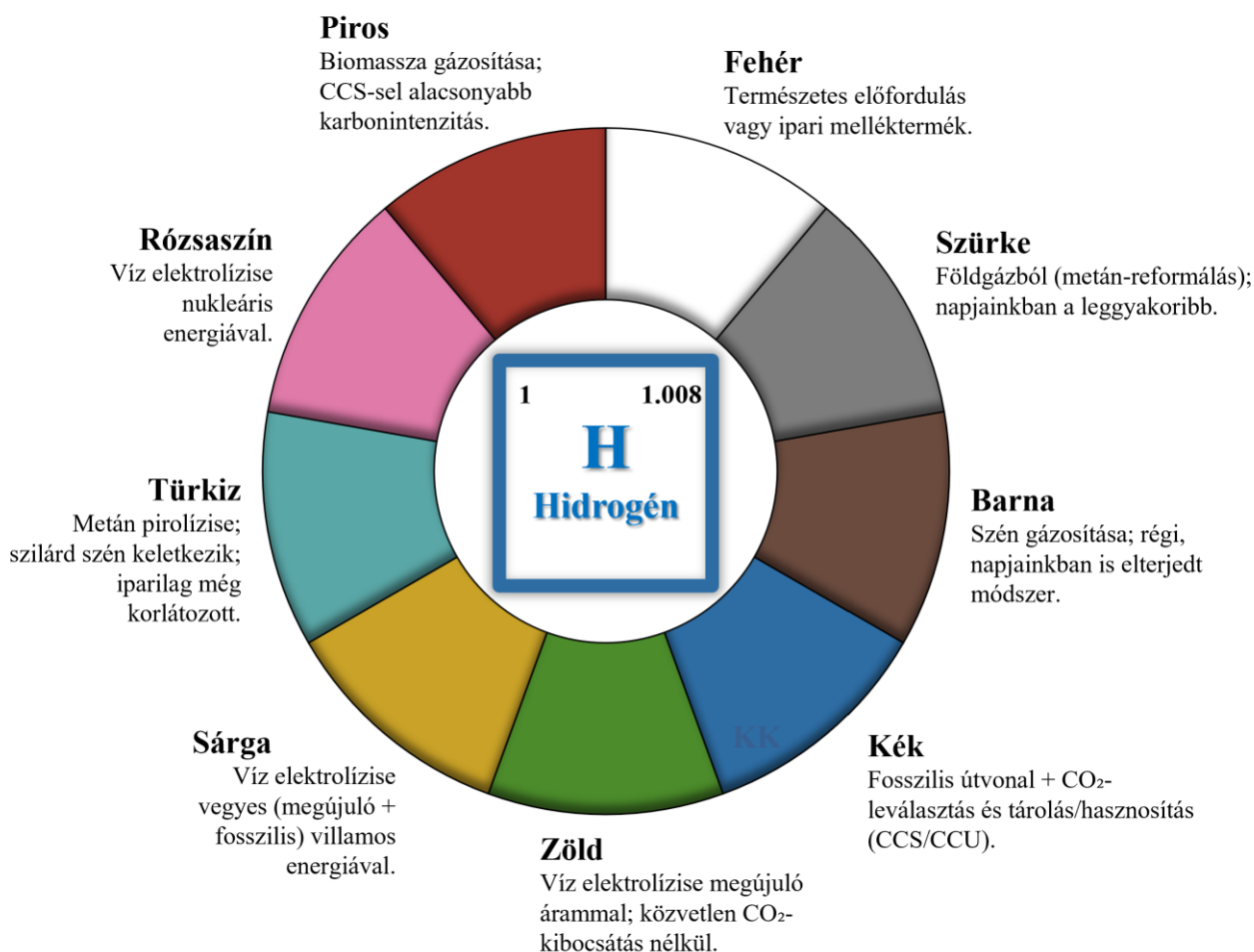
2. A hidrogénmobilitás jövője

A hidrogén, mint energiahordozó, egyre inkább az érdeklődés középpontjába kerül a fenntartható közlekedésben. Számos országban és nagyvállalatnál stratégiát dolgoztak ki a hidrogén infrastruktúra és alkalmazások fejlesztésére – világszerte eddig mintegy 30 ország jelentette be nemzeti hidrogénstratégiáját (köztük Magyarország is 2021-ben) [10]. A hidrogén energialáncba illesztése a meglévő, alternatív energiaforrások mellett hosszú távon lehetővé teheti a fosszilis energiahordozóktól való függetlenedést és az energiaellátás karbonsemlegesítését. 2050-re a hidrogén a világ energiaigényének akár 20%-át is fedezheti a prognózisok szerint [11,12], ami óriási változást jelentene a jelenlegi <1%-os arányhoz képest. E tendencia mögött több tényező áll: egyrészt a hidrogén gyakorlatilag kimeríthetetlenül rendelkezésre álló, számos módszerrel előállítható elem, másrészt felhasználásakor csak víz keletkezik melléktermékként, károsanyag-kibocsátás nélkül [13]. A hidrogén égéshője (felső fűtőértéke) tömegegységre vetítve a legmagasabb az összes tüzelőanyag közül, így energiatartalma kiemelkedő [13]. Mindezek miatt a hidrogén számos területen vonzó: közlekedésben, energiatárolásban, villamosenergia-termelésben és akár háztartási fűtésben is használható megfelelő technológiákkal.

A hidrogénteknológia előretörését az alábbi előnyös tulajdonságai támogatják:

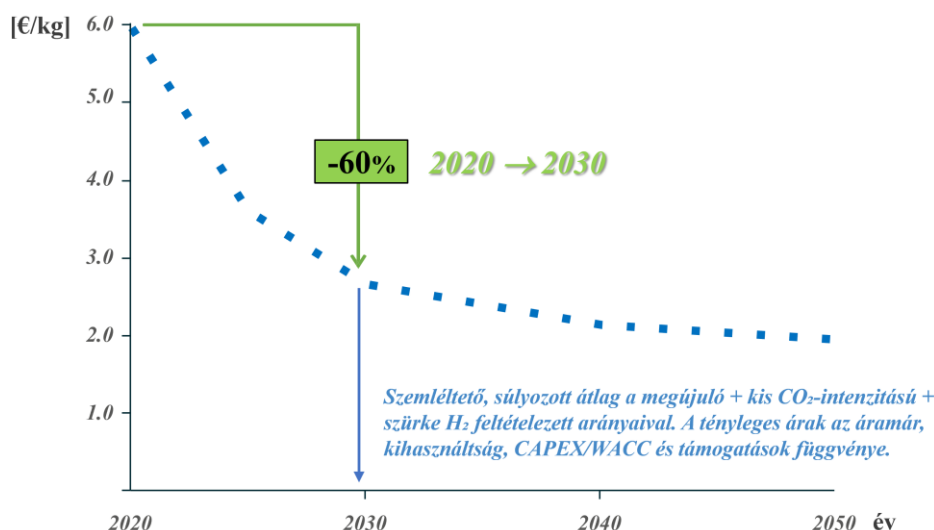
- **Rendkívül magas energiasűrűség és tiszta végtermék:** A hidrogén égéshője (HHV) $\approx 141,8$ MJ/kg, szemben a benzin ~ 46 MJ/kg és a gázolaj ~ 45 MJ/kg értékével; tömegegységre vetítve ez $\sim 3,1\times$ nagyobb energiatartalmat jelent, azaz $\sim +208\text{--}215\%$ többletet a benzinhez és a gázolajhoz képest. (Alsó fűtőértéken – LHV – a hidrogén ~ 120 MJ/kg, ami még mindig $\sim 2,7\text{--}2,8\times$ a benzin/gázolaj $\sim 42\text{--}44$ MJ/kg tartományához képest.) A végfelhasználásnál csupán vízgőz keletkezik, így lokálisan zéró a károsanyag-kibocsátás [13].
- **Megújuló forrásból előállítható:** Víz elektrolízise révén *zöld hidrogén* nyerhető (2. ábra. A hidrogén „színei”), amely az időszakosan termelődő megújuló energia (pl. nap- vagy szélenergia) tárolására is alkalmas. A hidrogén könnyen tárolható nagy mennyiségben, és hosszú ideig veszteség nélkül raktározható, ami megoldást kínál a megújuló kiegészúlyozására és csúcsterhelések levágására [14,15].

- **Sokoldalú felhasználhatóság:** A hidrogén számos ipari folyamatban alapanyag (pl. ammónia, finomítás), de energiahordozóként is bevetethető járművekben üzemanyagcellákban vagy akár belsőégésű motorokban is. Bár jelenleg a közlekedésben a hidrogén felhasználása elenyésző, a nehezen elektrifikálható szegmensek (például távolsági fuvarozás, vasúti és tengeri szállítás, nehézipari gépek) dekarbonizációjához elengedhetetlen alternatíva lehet [16].
- **Csökkentett geopolitikai kitettség:** A hidrogén előállítása kevés kritikus nyersanyagot igényel (szemben pl. a lítium-ion akkumulátorokkal), és gyakorlatilag bárhol termelhető víz és villamos energia felhasználásával. Így a hidrogéngazdaság növeli az energiatermelés szuverenitását, csökkenti a ritka nyersanyagok importjától való függést, ami több államot is nemzeti stratégia kidolgozására ösztönöz [17].



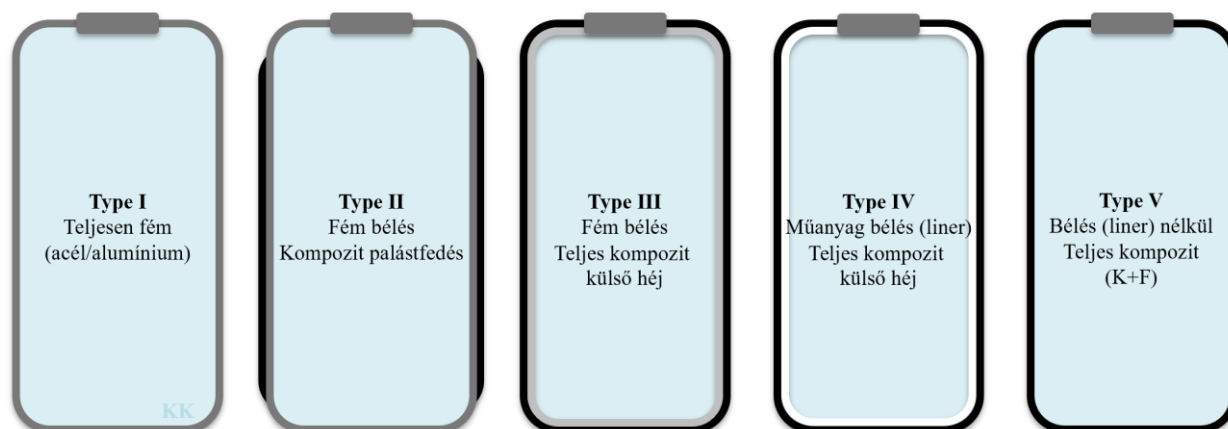
2. ábra. A hidrogén „színei” – előállítási útvonalak

Ahogy a **3. ábrán** is látható, napjainkban világszerte jelentős lendületet kapott a hidrogéntechnológia fejlesztése. Számos nagy volumenű projekt indult el (2021-re 228 bejelentett hidrogénprojektnél tartottunk, melyek negyede a mobilitáshoz kapcsolódik), és a következő években hatalmas tőke áramlik a területre. Európa például 2030-ig összesen ~200 milliárd euró támogatást irányzott elő a hidrogéngazdaság fellendítésére [18]. E befektetések nyomán a *tiszta hidrogén* (azaz alacsony szén-dioxid-kibocsátású, főként zöld hidrogén) költsége várhatóan 60%-kal csökken 2030-ra [19], így a hidrogén ára a töltőállomásokon 2030 körül 2 €/kg szintre eshet vissza Európában [20]. Ez már versenyképesé teheti a hidrogént a gázolajhoz viszonyítva is (összevetésképp jelenleg a hidrogén ára ~6 €/kg, ami még nem versenyképes a fosszilis üzemanyagokkal [21,22]). Várható, hogy 2030-ra Európában évi 10 millió tonna tiszta hidrogén áll majd rendelkezésre a gazdaság különböző ágazatai számára [20], ami óriási léptékű ugrás a jelenlegi ~95 millió tonnás globális hidrogénfogyasztáshoz képest (aminek ma csupán ~4%-a zöld hidrogén) [23,24].



3. ábra. A hidrogénteknológia tendenciái: a hidrogén előállítási költségének várható csökkenése a „Hydrogen Council” adatai szerint.

Természetesen a hidrogénmobilitás előtt még számos kihívás áll, de az iparági várakozások szerint ezek leküzdése gyorsan zajlik majd, és a 2030-tól a hidrogén hajtású járművek száma ugrásszerűen emelkedhet. A legfontosabb feladat a technológia költségeinek drasztikus leszorítása és az élettartam növelése. A cél az, hogy a hidrogén energetikai rendszerek (üzemanyagcellák, tartályok stb.) átlagos költsége ~80%-kal csökkenjen – elsősorban a gyártás felfutásából adódó méretgazdaságosság révén –, ami a hidrogén járművek teljes tulajdonlási költségét (TCO) mintegy 75%-kal mérsékelheti [25,26]. Ekkora csökkenés már lehetővé tenné, hogy a hidrogén versenyképes alternatíva legyen a legtöbb szegmensben, a személyautóktól a haszongépjárművekig. Ugyanakkor a technológiai fejlesztések a *tartósság* javítására is irányulnak: biztosítani kell például, hogy a nagynyomású hidrogéntartályok és az üzemanyagcellák biztonságosan és hatékonyan működjenek a járművek 15-20 éves élettartama során. Ennek érdekében az úgynevezett Type-4 típusú (4. ábra), 700 bar-on is üzemelő hidrogéntartályok alkalmazása mellett kutatások folynak cseppfolyós hidrogén tárolására is, mivel a folyékony hidrogén nagyobb energiasűrűséget kínál (bár extrém hűtést igényel) [27,28].

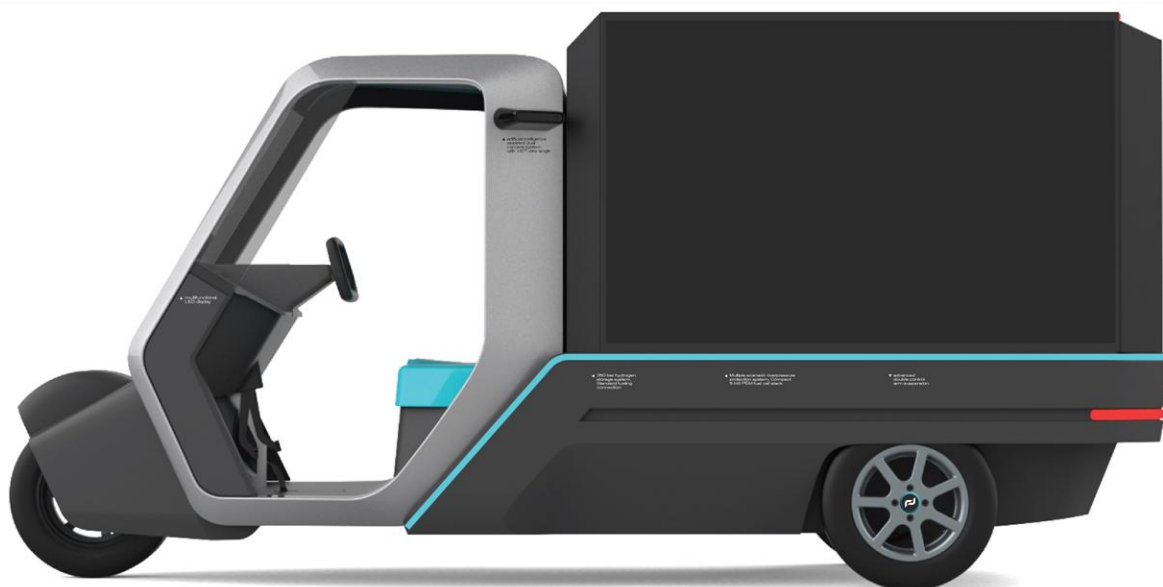


4. ábra. Nagynyomású hidrogén tárolására alkalmas tartálytípusok.

Az infrastruktúra terén is jelentős fejlődés várható: A Clean Hydrogen Observatory 2025. májusi adata szerint 186 HRS üzemelt Európában (főleg Németország 72, Franciaország 30, Hollandia 23), Ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy 2025 második felében több német és osztrák bezárás miatt a szám ~170 körüli csúszhatott vissza. Korai alkalmazók között Európán kívül olyan országok járnak élen, mint Japán, Dél-Korea, Kína. Mindezen erőfeszítések eredményeként a hidrogénmobilitás a 2030-as évekre gyorsuló pályára állhat.

3. Hidrogén stratégia: fejlesztések a Neumann János Egyetemen

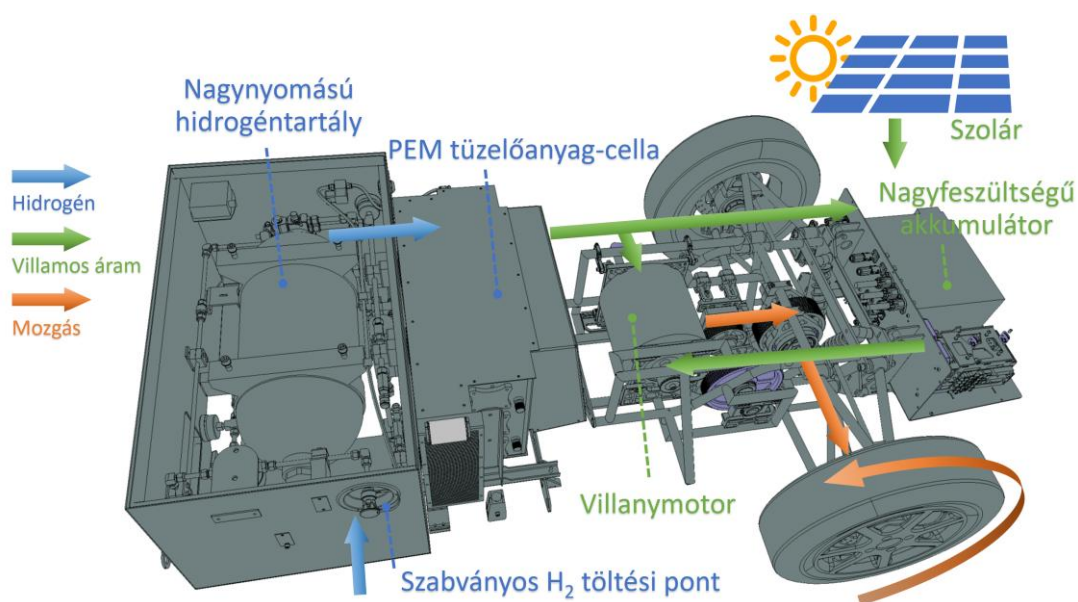
A globális hidrogéntrendekhez illeszkedően a Neumann János Egyetemen (NJE) 2022-ben elindult egy ambiciózus fejlesztési projekt egy hidrogénhajtású jármű prototípusának létrehozására. A projekt célja egy kisméretű, *mopedautó* kategóriájú (L5E-szegmensbe tartozó) jármű kifejlesztése, amely a városi *zöld mobilitást* szolgálja alternatív energialánc alkalmazásával [5]. Jelenleg Kelet-Ázsiában és más fejlődő régiókban is több millió (becslések szerint 8 millió feletti) ilyen kisáruszállító mikroautó üzemel hagyományos belsőégésű motorral [29,30]. Az NJE fejlesztésének küldetése, hogy ezt a bevált járműkonceptiót ötvözze a korunk legmodernebb hajtási technikáival – azaz a villamos hajtással és a hidrogén tüzelőanyagcellával –, mindezt egy futurisztikus, innovatív formatervvel kiegészítve. Az így létrejövő egyedi hidrogénhajtású jármű prototípust *Neumann H2* nevet kapta, digitális modellje a **5. ábrán** látható. A jármű egy háromkerekű, többfunkciós kis haszonjármű, amely 2023-ban a Dubajban rendezett ENSZ Klímacsúcs (COP28) konferencián debütált, a “Road to Zero” kampány keretében. E nemzetközi premier is mutatja, hogy a projekt nem csupán oktatási-fejlesztési célokat szolgál, hanem szélesebb körben demonstrálja a hidrogénteknológia és a megújuló energia ötvöztetésének lehetőségeit a mobilitásban.



5. ábra. A Neumann H2 hidrogénhajtású városi jármű prototípusának digitális modellje.

A Neumann H2 egy demonstrációs *K+F platform*, amely integrált energiatároló rendszereivel szemlélteti a napenergia, az akkumulátoros villanyhajtás és a hidrogén tüzelőanyagcella előnyeinek együttes kihasználását. Az energiaforrások **intelligens vezérlése** biztosítja, hogy mindig a leghatékonyabb vagy éppen elérhető erőforrás hajtja a járművet. A vezérlőrendszer ideális esetben elsőbbséget ad a napelemeknek – ha elegendő napsugárzás áll rendelkezésre, a jármű közvetlenül a napenergiát használja. Amennyiben a napsütés nem biztosít elegendő teljesítményt, a hidrogén üzemanyagcellára vált az energiaellátás. Végül, ha a hidrogéntartály is kimerülően van, a rendszer az akkumulátor tárolt energiájára támaszkodik [5]. Az integrált hajtásrendszer blokkvázlatát a **6. ábra** szemlélteti.

A prototípus műszaki paraméterei a kategóriához és a városi felhasználáshoz igazodnak. A jármű egy 45.6 V-os névleges feszültségű lítium-ion akkumulátorcsomagot használ, amelynek energiatároló képessége 4,1 kWh. Emellett egy 5 kW maximális teljesítményű *PEM* típusú tüzelőanyagcella (*Proton Exchange Membrane*, protoncserélő membrános tüzelőanyagcella) biztosítja a folyamatos teljesítményt az üzem során.



6. ábra. A Neumann H2 prototípus jármű hajtásláncának elvi felépítése (blokkdiagram), melyen a szolár panel, az akkumulátor, a hidrogéntartály, az üzemanyagcella és az elektromos hajtómotor kapcsolata látható.

A hidrogént egy Type III típusú, 350 bar nyomású kompozit tartályban tárolja a rendszer, amely 28 liter térfogatú; ez megközelítőleg 700 g hidrogén tárolását jelenti, ami elegendő mintegy 1,5 óra üzemidőre teljes terhelés mellett. A meghajtást egy villanymotor végzi. A 4 kW névleges hajtási teljesítmény elérése mellett, ~98 Nm nyomatékot és kb. 55 km/h maximális sebességet tesz lehetővé a háromkerekű jármű számára. A prototípus becsült hatótávolsága 250 km egy hidrogén-tankolással (és teljesen feltöltött akkumulátorral), ami városi környezetben kielégítőnek tekinthető egy kisáruszállító feladatkörben. A biztonságtechnikai szempontok elsődlegesek: a tartály és a teljes hidrogén-ellátó rendszer megfelel az illetékes szabványoknak (pl. *UN/ECE R134*), és egy védett, zárt egységet képez a járműben a kockázatok minimalizálása érdekében. A Neumann H2 fejlesztése során nemcsak a hardveres megoldásokra, hanem a vezérlő szoftverekre és a jármű *intelligenciájára* is nagy hangsúlyt fektettek. A jármű energia-menedzsmentjét egy mesterséges intelligencia vezérli egy *megerősítéses tanulás* (*reinforcement learning*) elvén működő algoritmus. Ez a rendszer valós idejű adatok és nagy felbontású információk alapján dönt arról, hogy épp melyik energiaforrást (nap, hidrogén vagy akkumulátor) célszerű használni a leghatékonyabb működéshez. A jármű szenzorrendszerrel is fel van szerelve: több kamera figyeli a környezetet, amelyek adatait egy mesterséges intelligenciára épülő képfeldolgozó modul elemzi. Ennek célja, hogy felismerje és kategorizálja a jármű környezetének objektumait (például közlekedési táblák, gyalogosok, akadályok), és a feldolgozott információt visszajelzések formájában eljuttassa a vezetőhöz vagy az autonóm vezérlőhöz. Az adatrögzítő rendszerek pedig lehetővé teszik a kísérleti jármű üzem közbeni állapotainak naplózását, ami értékes információt nyújt a kutatóknak a hidrogénrendszer állapotáról és az energia-menedzsment algoritmus teljesítményéről.

A projekt közvetett céljai között a hidrogéntechnológiai kompetencia kiépítése és az NJE vezető *K+F* pozíciójának megalapozása szerepel – ideértve a szellemi tulajdon létrehozását (szabadalmak) és a tudományos eredmények publikálását is. A Neumann H2 prototípus jelenleg a tesztelés és finomítás fázisában van. A megépített jármű első verziója – mely a **7. ábrán** látható – igazolta a koncepció életképességét: a jármű képes hidrogénnel üzemelni és a napelemeit használva részben önellátó módon haladni. A gyakorlati próbák során nyert adatok segítenek optimalizálni az energiafelhasználást és a vezérlő algoritmusokat. A projekt következő lépései között szerepelhet a jármű dinamikus tesztelése valós városi környezetben, a biztonsági rendszerek finomhangolása, valamint a hidrogén-utántöltés logisztikájának kidolgozása a városi üzemeltetéshez.

Összességében elmondható, hogy az NJE hidrogénjármű fejlesztése nemcsak egy konkrét prototípus létrehozását eredményezte, hanem hozzájárult ahhoz is, hogy Magyarországon is

bővüljön a hidrogén-technológiai tudásbázis és szakember gárda. A kezdeményezés jól példázza, miként kapcsolódhatnak be egyetemek és startupok a zöld mobilitás innovációs láncolatába, megteremtve a hidrogénalapú közlekedés hazai alapjait a jövőben.



7. ábra. Az elkészült Neumann H2 prototípus jármű.

4. Összefoglalás

A városi közlekedés gyorsuló dekarbonizációját ma két fő technológiai út határozza meg: a tisztán akkumulátoros elektromos hajtás (BEV) és a hidrogén-tüzelőanyagcella (FCEV). Városi személygépjárműveknél a BEV jelenleg a műszaki-gazdasági optimum: magas hajtáslánc-hatásfok, alacsony üzemeltetési költség. A használati profil sajátosságai – rövid utak, gyakori megállások, rekuperáció – tovább erősítik ezt az előnyt. Ugyanakkor a városi mobilitásban a tömegközlekedés mellett szerep juthat a hidrogén számára is: ott, ahol nagyon magas napi kihasználtság, gyors újratöltés, téli hőkomfort együtt érvényesül, illetve ahol a megújuló-többlet szezonális tárolása és a hálózati rugalmasság kiemelt cél. Életciklus-szinten a BEV tipikusan kedvező kibocsátási mérleget ad, de a hidrogénes megoldások karbonintenzitása erősen függ a H₂-előállítás útvonalától; a zöld hidrogén arányának növelése ezért kulcsfontosságú. Infrastruktúrában a közterületi és otthoni töltés kombinációja gyorsan skálázódik, míg a hidrogéntöltő-állomások gazdaságosan zárt flotta-ökoszisztémákban, csomóponti elrendezéssel (logisztika, taxi, közszolgáltatás) térülnek meg. A hajtáslánc-vezérlés és az energiamenedzsment terén a szoftver válik döntővé: prediktív algoritmusokkal csökkenthető a fogyasztás.

A következő években a reális előrehaladás három pilléren állhat: (1) a BEV-ek töltési ökoszisztémájának további sűrítése – különös tekintettel a társasházi és munkahelyi megoldásokra; (2) célzott, nagy kihasználtságú FCEV-flották indítása ott, ahol a műszaki-üzemeltetési profil indokolja, H₂-ellátási láncsal összekapcsolva; (3) integrált energiatervezés, amely a megújuló-többletet rugalmasan köti össze a közlekedéssel (Power-to-X, szezonális tárolás). Ha az akkumulátorok energiasűrűsége, a gyors- és otthoni töltés, valamint a zöld hidrogén és a HRS-hálózat költségei párhuzamosan javulnak, 2030 körül kialakulhat egy stabil megosztás: a BEV marad a városi alapterhelés elsődleges megoldása, míg a hidrogén a nagyterhelésű, időkritikus és rendszerintegrációs előnnyel járó feladatokban hoz valódi hozzáadott értéket.

Rövidítések jegyzéke

- **ICE** – *Internal Combustion Engine* – belsőégésű motor
- **BEV** – *Battery Electric Vehicle* – akkumulátoros elektromos jármű
- **FCEV** – *Fuel Cell Electric Vehicle* – üzemanyagcellás elektromos jármű
- **PHEV** – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – plug-in hibrid elektromos jármű
- **EV** – *Electric Vehicle* – elektromos jármű (gyűjtőfogalom BEV és FCEV típusokra)
- **NEV** – *New Energy Vehicle* – „új energiás járművek” összefoglaló neve Kínában
- **CCU** – *Carbon Capture and Utilization/Use* szén-dioxid-leválasztás és -hasznosítás
- **CCS** – *Carbon Capture and Storage* – szén-dioxid-leválasztás és -tárolás
- **OEM** – *Original Equipment Manufacturer* – járműgyártó vállalat (eredeti gyártó)
- **TCO** – *Total Cost of Ownership* – teljes tulajdonlási költség (élettartamra vetített összköltség)
- **CAPEX** – *Capital Expenditures* – beruházási költség, minden egyszeri tétel, ami a létesítéshez kell
- **WACC** – *Weighted Average Cost of Capital* – súlyozott átlagos tőkeköltség
- **PEM** – *Proton Exchange Membrane* – protoncserélő membrán (üzemanyagcellák egyik típusa)
- **AI** – *Artificial Intelligence* – mesterséges intelligencia (MI)
- **Power-to-X** – villamos energiát – megújuló többletet – más energiahordozóvá alakítunk

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Megújuló Energia Nemzeti Laboratórium (projektazonosító: RRF-2.3.1-21-2022-00009) támogatta, amely a Széchenyi Terv Plusz program keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] J. A. Gómez and D. M. F. Santos, "The Status of On-Board Hydrogen Storage in Fuel Cell Electric Vehicles," *Designs*, vol. 7, no. 97, 2023. <https://doi.org/10.3390/designs7040097>
- [2] I. Pielecha, W. Cieslik, and A. S., "The Use of Electric Drive in Urban Driving Conditions Using a Hydrogen Powered Vehicle – Toyota Mirai," *Combustion Engines*, vol. 172, pp. 51–58, 2018. <https://doi.org/10.19206/CE-2018-106>
- [3] W. Gis, "Ecological and Functional Aspects of Operation of Electric Vehicles With Fuel Cell," *Journal of KONBiN*, vol. 50, pp. 165–176, 2020. <https://doi.org/10.2478/jok-2020-0033>
- [4] O. Castillo Campo, R. Álvarez Fernández, and R. Domingo, "Opportunities and Barriers of Hydrogen–Electric Hybrid Powertrain Vans: A Systematic Literature Review," *Processes*, vol. 8, no. 1261, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8101261>
- [5] K. Kun, L. Szabó, E. Varga, and D. I. Kis, "Development of a Hydrogen Fuel Cell Prototype Vehicle Supported by Artificial Intelligence for Green Urban Transport," *Energies*, vol. 17, p. 1519, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17071519>
- [6] V. Vodovozov, Z. Raud, and E. Petlenkov, "Review of Energy Challenges and Horizons of Hydrogen City Buses," *Energies*, vol. 15, no. 6945, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15196945>
- [7] H. Fan, Z. Tu, and S. H. Chan, "Recent Development of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: A Review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8421–8446, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.003>
- [8] Y. Manoharan et al., "Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Current Status and Future Prospect," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 2296, 2019. <https://doi.org/10.3390/app9112296>
- [9] M. P. Alves, W. Gul, C. A. Cimini Jr., and S. K. Ha, "A Review on Industrial Perspectives and Challenges on Material, Manufacturing, Design and Development of Compressed Hydrogen Storage Tanks for the Transportation Sector," *Energies*, vol. 15, p. 5152, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15145152>
- [10] D. I. Kis and E. Kókai, "A Review on the Factors of Liner Collapse in Type IV Hydrogen Storage Vessels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 50, pp. 236–253, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.316>
- [11] H. Barthelemy, M. Weber, and F. Barbier, "Hydrogen Storage: Recent Improvements and Industrial Perspectives," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 7254–7262, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.178>
- [12] M. Li et al., "Review on the Research of Hydrogen Storage System Fast Refueling in Fuel Cell Vehicles," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 10677–10693, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.208>
- [13] S. Hosseini and B. Butler, "An Overview of Development and Challenges in Hydrogen Powered Vehicles," *Int. J. Green Energy*, vol. 17, pp. 13–37, 2019. <https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1685999>
- [14] F. Suleman, I. Dincer, and M. Agelin-Chaab, "Environmental Impact Assessment and Comparison of Some Hydrogen Production Options," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 6976–6987, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.123>
- [15] C. J. B. Dicken and W. Mérida, "Measured Effects of Filling Time and Initial Mass on Temperature Distribution Within a Hydrogen Cylinder During Refuelling," *J. Power Sources*, vol. 165, pp. 324–336, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.11.077>
- [16] J. Pepin et al., "Determination of Key Parameters Responsible for Polymeric Liner Collapse in Hyperbaric Type IV Hydrogen Storage Vessels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 16386–16399, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.177>
- [17] J. Pepin et al., "Replication of Liner Collapse Phenomenon...", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, pp. 4671–4680, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.022>
- [18] P. Blanc-Vannet et al., "Sample Scale Testing Method to Prevent Collapse of Plastic Liners in Composite Pressure Vessels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, pp. 8682–8692, 2019.
- [19] Global Technical Regulation No. 13, Hydrogen and Fuel Cell Vehicles, United Nations, 2013.
- [20] UNECE R134, Uniform Provisions for the Approval of Hydrogen-Fuelled Vehicles, 2019.
- [21] ISO 19881:2018, Gaseous Hydrogen — Land Vehicle Fuel Containers, International Organization for Standardization, 2018.
- [22] SAE J2600:201510, Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Connection Devices, SAE International, 2015.
- [23] S. Astbury and S. Hawsworth, "Spontaneous Ignition of Hydrogen Leaks," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 2178–2185, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.005>
- [24] M. Liu and S. Zhang, "Hydrogen Fuel Cell Safety Detection Based on Leakage Quality Limit," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2174, 2022. doi:10.1088/1742-6596/2174/1/012049
- [25] Y. Maeda et al., "Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage," SAE International, 2006. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0126>
- [26] W. Liu and D. M. Christopher, "Dispersion of Hydrogen Leaking from a Fuel Cell Vehicle," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 16673–16682, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.026>
- [27] J. Snoussi et al., "Auto-Adaptive Filtering-Based Energy Management Strategy for FCHVs," *Energies*, vol. 11, p. 2118, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11082118>
- [28] Y. Liu, J. Liang, J. Song, and J. Ye, "Energy Management Strategy of Fuel Cell Vehicle Based on Multi-Dimensional Dynamic Programming," *Energies*, vol. 15, p. 5190, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15145190>
- [29] P. Yu et al., "Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Review of Topologies and Energy Management Strategies," *World Electr. Veh. J.*, vol. 13, p. 172, 2022. <https://doi.org/10.3390/wevj13090172>
- [30] A. Ragab, M. I. Marei, and M. Mokhtar, "Comprehensive Study of FCHVs: Classification, Topologies, and Control," *Applied Sciences*, vol. 13, p. 13057, 2023. <https://doi.org/10.3390/app132413057>