

Különböző meghajtású közúti gépjárművek fenntarthatósági vizsgálata Magyarországon

Sustainability investigation of road vehicles with different power-driven systems in Hungary

Dr. ÁRPÁD István¹, Dr. T. KISS Judit², Dr. BELLÉR Gábor³, Dr. KOCSIS Dénes⁴

¹adjunktus, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék,
4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.; arpad.istvan@eng.unideb.hu

²oktatási dékánhelyettes, tanszékvezető egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Menedzsment és Vállalkozási Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.; tkiss@eng.unideb.hu

³egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Környezetmérnöki Tanszék,
4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.; beller.gabor@eng.unideb.hu

⁴tanszékvezető egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Környezetmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen,
Ótemető utca 2-4.; kocsis.denes@eng.unideb.hu

Abstract

The CO₂ emission of road vehicles in gCO₂/km is a very important parameter. However, this parameter alone is not enough to decide which power-driven system is the best in point of view of sustainability for vehicle. A more complex analysis is needed to decide this. The production of vehicle motion is the result of different multi-stage energy conversion process, depending on the mode of power-driven system, starting from a given primary energy source. These energy conversions also generate CO₂ emissions, which must also be considered when evaluating vehicles. In addition, energy conversion technologies have different energy efficiencies, which is other important parameter in the complex assessment. The presentation and the article examine these aspects using data from Hungary and, based on the results using presents a sustainability matrix that shows how can be the electric power-driven system more favorable than other power-driven systems from a sustainability point of view.

Keywords: CO₂ emission; energy efficiency; electric vehicle; internal combustion engine, sustainability matrix

Kivonat

A közúti gépjárművek gCO₂/km-ben kifejezett CO₂ kibocsátása nagyon fontos paraméter. Azonban csak ez alapján még nem dönthető el az, hogy a fenntarthatóság szempontjából melyik meghajtású gépkocsi a legkedvezőbb. Ennek eldöntéséhez átfogóbb vizsgálat szükséges. A gépjárművek mozgásának előállítása a meghajtási módjuktól függően többféle és többlépcsős energiaátalakítási folyamat végeredménye, amelynek a kiindulópontja egy adott primer energiaforrás. Ezen energiaátalakítások során is képződik CO₂ kibocsátás, amit szintén figyelembe kell venni a gépjárművek üzemeltetésénél. Ezen túlmenően az energiaátalakítási technológiáknak különböző energetikai hatásfoka van, ami szintén fontos paraméter a komplex értékelésben. Az előadás és a cikk ezeket a szempontokat vizsgálja magyarországi adatokat felhasználva és az eredmények alapján egy fenntarthatósági mátrixban bemutatja, hogyan lehet kedvezőbb az elektromos meghajtás a többi meghajtási módnál fenntarthatósági szempontból.

Kulcsszavak: CO₂-kibocsátás; energetikai hatásfok; elektromos jármű; belső égésű motor, fenntarthatósági mátrix

1. Bevezetés

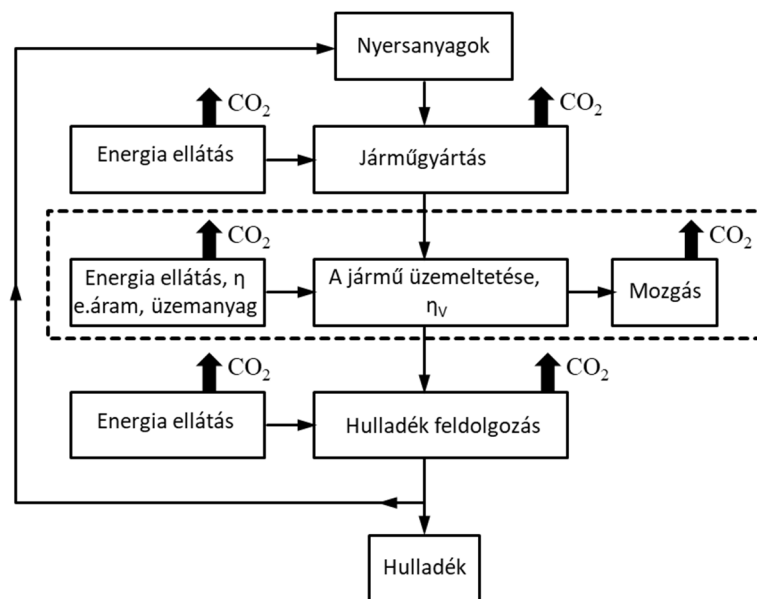
A globális felmelegedés látható hatásai miatt egyre nagyobb aggodalomra ad okot a légkörben lévő üvegházhatású gázok szintjének folyamatos emelkedése. 2015-ben a szén-dioxid (CO₂) havi globális átlagkoncentrációja átlépte a 400 ppm értéket [1], amely egy szimbolikus küszöbérték volt az éghajlatváltozás veszélyzónájába.

A megfoghatatlan veszélyek elkerülése érdekében közép- és hosszú távon az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése rendkívül fontos. A Párizsi Megállapodással [2] az EU vállalta, hogy 2030-ig legalább 40%-kal csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását 1990-hez képest. Ennek érdekében az EU új energiaszabályzatot készített "Tiszta energiát minden európai számára" [3] néven, amely az EU hosszú távú stratégiájaként szolgál a szén-dioxid-semlegesség 2050-ig történő eléréséhez. Az új célokat minden tagállamnak figyelembe kellett vennie, ezért 2020-ban Magyarország is elkészítette a Nemzeti Energia- és Klímatervét [4].

Számos tanulmány foglalkozott a gépjárművek energiafogyasztásával, környezeti hatásával és üvegházhatású gáz (ÜHG) kibocsátásával [5] [6] [7] [8] [9].

A szén-dioxid az elsődleges üvegházhatású gáz, és kibocsátásának jelentős része a közúti gépjárművekkel kapcsolatos. A különböző járműtípusok CO₂-kibocsátásának teljes körű értékelése és összehasonlítása az élet-ciklus elemzés (LCA, Life-cycle assesment) (1. ábra) segítségével valósítható meg, amely hatékony eszköz egy termék, folyamat vagy szolgáltatás teljes környezeti hatásának becslésére [10] [11].

Ebben a cikkben azonban csak a gépjármű életciklusának egy részterületére kívánunk összpontosítani. Az 1. ábrán a szaggatott vonal mutatja be az LCA vizsgálat hatókörét. A gépjármű mozgatásához felhasznált végső energia, amelyet a gépjármű állít elő, egy sor energiaátalakításból származik. Az energiaátalakítás technológiai folyamata is CO₂-t termel, és közvetlenül kapcsolódik a gépjárművek CO₂-kibocsátásához. Megközelítésünk a teljes energiatermelési vonalat magában foglalja, ahol az utolsó "energiaátalakító" maga a gépjármű. Ez a módszer egy „well-to-wheel” (WTW) elemzés (energiaforrástól a kerékig elemzés), és fontos szerepet játszik a közlekedési ágazatban. A WTW lehetővé teszi az üzemanyagok előállításából, szállításából és elosztásából származó energia- és üvegházhatásúgáz-kibocsátás összegzését, valamint a különböző meghajtási módok eredő energetikai hatásfokának kiszámítását. A WTW-módszereket széles körben alkalmazzák konkrét helyzetek és járműtípusok értékelésére.



1. ábra. A gépjárművek CO₂-kibocsátásának életciklus-alapú rendszere (a szerzők saját készítésű ábrája)

A jelenlegi szabályozások [gCO₂/km] egységben határozzák meg az egyes gyártók gépjárműpalettájára vonatkozó követelményeket. Ezek az értékek azonban nem veszik figyelembe a gépjárműveket közvetlenül kiszolgáló energiaipart. Ráadásul a jelenlegi szabályozásban sem a gépjárművek, sem a gépjárművek üzemeltetéséhez szükséges energiát előállító energiaipar hatékonysága, sem az energiaiparnak a gépjárművek üzemeltetése által okozott CO₂-kibocsátása nem szerepel. Ezért kutatásunk a hiányzó komplex értékelések hiányának pótlására összpontosít a különböző gépjárműtípusok teljes CO₂-kibocsátására gyakorolt teljes energiaátalakítási hatás tekintetében. A cikk magyarországi adatok alapján értékeli és hasonlítja össze a különböző meghajtási móddal rendelkező gépjárműveket [12], abból a célból, hogy a különböző meghajtású járművek a mozgásukkal milyen mértékben járulnak hozzá a légkör CO₂ terheléséhez és milyen hatásfokkal hasznosítják a primer energiaforrásokat. A kapott értékelés jelzi, hogy melyik meghajtási módok alkalmazása biztosíthatja jobban az elérni kívánt fenntartható fejlődést, ami egy olyan fejlődés, amely kiszolgálja a jelen

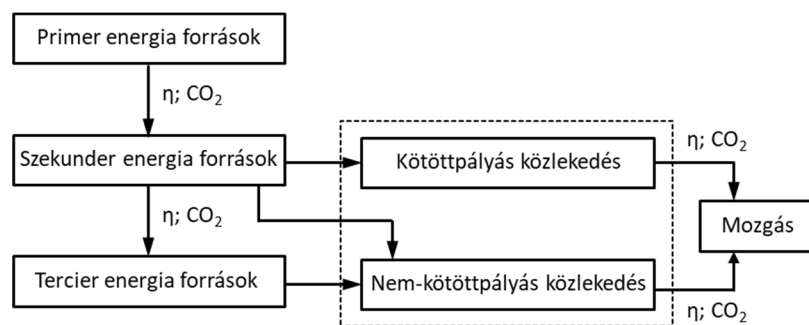
igényeit, anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő generációit abban, hogy a saját szükségleteiket majd kielégíthessék.

Tehát cikkünk egyik célja az, hogy meghatározzuk a különböző típusú meghajtási rendszerekkel rendelkező gépjárművek teljes energiaátalakításának eredő hatásfokát (η). A másik célunk az, hogy kiszámítsuk a különböző motortípusokkal rendelkező gépjárművek energia-fajlagos CO₂-kibocsátását (ϵ), amely magában foglalja az energiaátalakítás során kibocsátott teljes CO₂-kibocsátást is. Végül a harmadik célunk a kapott eredmények értékelése, az eredményekből levonható következtetések meghatározása volt.

2. Módszerek

Ebben a fejezetben a számításaink logikai felépítését ismertetjük. Minden egyes energia átalakuláshoz tartozik egy energetikai hatásfok (η) és egy energia fajlagos CO₂ kibocsátás.

A mozgáshoz felhasznált energia (E_m) többnyire mozgási energia (E_{kin}), de a jármű mozgása során fellépő magasságkülönbségek miatt potenciális energiát (E_{pot}) is tartalmaz. A mozgáshoz szükséges energia (E_m) többlépcsős energiaátalakítási folyamatok során jön létre (2. ábra). Az energiaátalakítások utolsó lépése magának a gépjárműnek az energiaátalakítása, amikor a felhasznált elektromos energiát vagy üzemanyagokat átalakítja a mozgási energiává.



2. ábra. A gépjárművek teljes energiaátalakítási rendszere (a szerzők saját készítésű ábrája)

Az energiaipar primer energiaforrásokból állítja elő a szekunder energiát. A primer energiaforrásokat általában három nagy csoportba sorolják. Ezek a fosszilis energiaforrások (különböző szén- és szénhidrogén nyersanyagok), a nem fosszilis ásványi anyagok (természetes urán) és a megújuló energiaforrások. A 3. ábra mutatja, hogy a fosszilis tüzelőanyagokból milyen módon állítanak elő másodlagos energiaforrásokat, és ezek az energiakonverziók hogyan károsítják a környezetet.

A 3. ábrán a fa és az energianövények mint primer energiaforrások szaggatott vonalakkal vannak jelölve, mivel a jelenlegi gyakorlat szerint az ezekből a forrásokból előállított másodlagos (szekunder) energiák (bioetanol és "bioáram") un. tiszta energiának minősülnek. Természetesen ez a gyakorlat vitatható és vitatandó, mert ez a fajta energiatermelés csökkenti a Föld CO₂-feldolgozó és élelmiszertermelő kapacitását, ugyanakkor károsíthatja a terület termőerejét. Az ilyen kérdések azonban nem képezik ennek a cikknek a tárgyát.

A nem fosszilis energiaforrásból származó másodlagos energia előállítása az atomerőművekben történő villamosenergia-termelés. Az atomerőművek által termelt villamos energiát a CO₂-kibocsátás szempontjából tiszta energiának tekintjük, bár az urándúsítási folyamatnak is van CO₂-kibocsátása, de mivel ez elhanyagolható a termelt végső energiához képest, így ettől eltekintünk.

A megújuló energiaforrások fő típusaiból (nap, szél, víz) származó villamos energia előállításának módjai az elsődleges energiaforrásokból történő másodlagos energiatermelés. Az ilyen energiaátalakításból származó villamos energia a CO₂-kibocsátás szempontjából is tiszta energiának tekinthető.

A 4. ábra mutatja, hogy a gépjárművek hogyan használhatják a másodlagos és harmadlagos energiákat.

3. Számítások és eredmények

a. Az energiaátalakítások hatékonysága

Az energiaátalakítás mindig energiavesztéssel jár. E veszteségek mértékét a hatásfok (η) segítségével fejezhetjük ki, amelyet a következő képlettel számítunk [13]:

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}, \quad \eta = \frac{\text{energia ki}}{\text{energia be}} \quad [-] \quad (1)$$

A sorosan kapcsolt energiaátalakítások eredő hatásfoka az egyes hatásfokok szorzatából adódik [13]:

$$\eta_{\text{total}} = \prod_i \eta_i, \quad \eta_{\text{total}} = \eta_{\text{mozgás}} \quad (2)$$

ahol " η_{total} " vagy " $\eta_{\text{mozgás}}$ " a teljes energiaátalakítás hatásfoka, "i" az energiaátalakítások száma, és " η_i " az energiaátalakítás i-edik lépésének hatásfoka. Ez az egyenlet hasonló a PEF (Primary Energy Factor) egyenletéhez [14]. Ebben az esetben azonban az " η_{total} " vagy " $\eta_{\text{mozgás}}$ " a gépjárművek energetikai hatásfokával bővül.

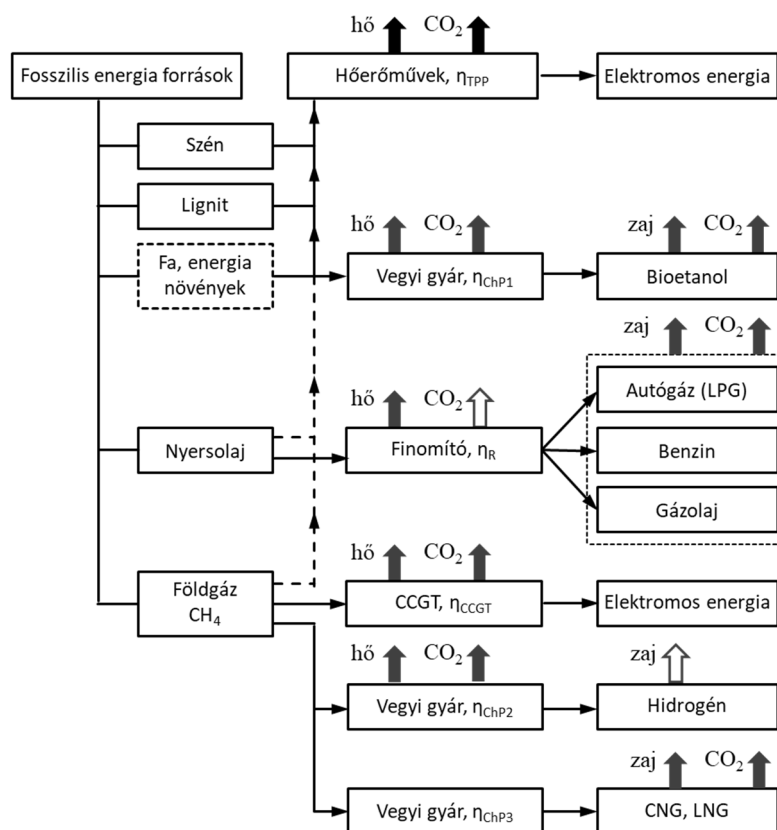
A számítások eredményeit az 1. táblázat tartalmazza. A számítások részletezése megtalálható a [12] irodalomban.

Az energiaátalakítások eredő hatásfokai a 2019-es magyarországi adatok alapján* 1. táblázat

$\eta_{\text{mozgás, EV}}$	$\eta_{\text{mozgás, BEV}}$	$\eta_{\text{mozgás, HEV}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, G}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, LPG}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, D}}$
0,35	0,31	0,27 – 0,31	0,27	0,27	0,36

* A rövidítések jelentését lásd 4. ábra, illetve G (gasoline) – benzin, D (diesel) – dízel, LPG (Liquefied Petroleum Gas) – propán-bután gáz

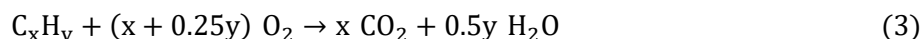
Ha a megújuló energiaforrások aránya nő a villamosenergia-termelésben, akkor a $\eta_{\text{motion, EV}}$ és a $\eta_{\text{motion, BEV}}$ hatásfokok javulni fognak, és meghaladhatja a többiek értékét. A jelenlegi műszaki megoldásokat szem előtt tartva csak így javítható a közvetlenül az előállított mozgási energia energetikai hatásfoka.



3. ábra. A fosszilis energiaforrások primer-szekunder energiaátalakítása (a szerzők saját készítésű ábrája)

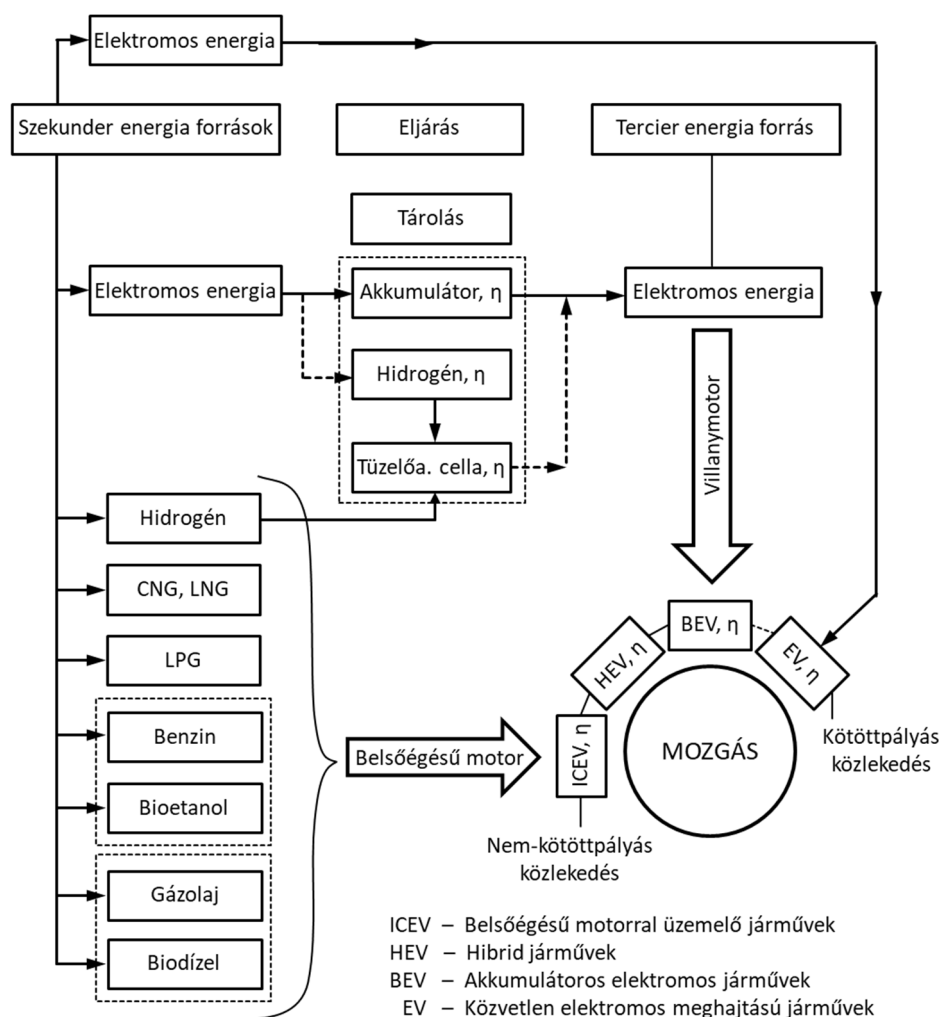
b. A gépjárművek energia-fajlagos CO₂-kibocsátása

A fosszilis tüzelőanyagok elégetése során a széntartalom határozza meg a keletkező CO₂ mennyiségét. A kémiai reakció általános sztöchiometriai egyenlete tökéletes égést feltételezve a következő [15]:



Vezessünk be egy új komplex mutatót, az "energia-fajlagos CO₂-kibocsátást", amelyet ε -vel jelölünk, és a következő képlettel számítjuk ki:

$$\varepsilon = \frac{m_{CO_2}}{E_{mozgás}}, \quad \varepsilon = \frac{\text{az energiaátalakítások során keletkező összes CO}_2\text{tömege}}{\text{a gépjármű végső mozgási energiája}} \left[\frac{\varepsilon_{CO_2}}{MJ_{mozgás}} \right] \quad (4)$$



4. ábra. A különböző gépjárművek és az energiaellátásuk (a szerzők saját készítésű ábrája)

Egyértelmű, hogy a kizárólag megújuló villamos energiát és nukleáris villamos energiát használó elektromos járművek CO₂-kibocsátása lenne csak nulla. A felhasznált villamos energia azonban több primer energiaforrásból származik, ezért a magyarországi villamosenergia-mix felhasználásával kell kiszámítani a hazai villamosenergia termelés átlagos CO₂-kibocsátási értékét ($\varepsilon_{E,HUmix}$). Az is ismert, hogy a magyar energiamix-ben jelentős az import. A villamosenergia-import az EU villamosenergia-mix átlagértékeként lett figyelembe véve.

A belső égésű járművek energia-fajlagos CO₂-kibocsátási értékeinek számítási részletei az [12] irodalom tartalmazza. Figyelemre méltó, hogy a gázolaj ε értéke jobb, mint a benziné. Az adatok vizsgálata azt is megmutatta, hogy az E10 és E85 üzemanyagok fűtőértéke kisebb, mint a benziné. Jelentős javulást a belsőégésű motorokkal működő járművek kibocsátásában csak akkor lehet elérni, ha a megújuló üzemanyagok aránya magas a felhasznált üzemanyagon belül. Ez azonban ismét az "élelmiszer vagy üzemanyag"

problémához vezet. A számítások azt is bebizonyították, hogy a bioüzemanyagok részarányának növelése az energetikai hatásfokot pozitív irányba nem befolyásolja.

4. Az eredmények összefoglalása és a következtetés

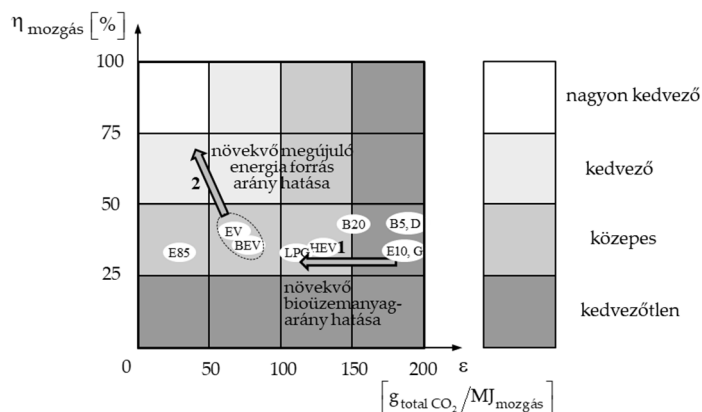
Mindkét mutató, a mozgási energia előállításának teljes energetikai hatásfoka ($\eta_{\text{mozgás}}$) és az energiafajlagos CO₂-kibocsátás (ϵ) együttesen jellemzi a gépjárműtípusokat a fenntarthatóság szempontjából. A 2. táblázat összefoglalja a számított paramétereket.

A gépjárművek számított eredő energetikai hatásfoka (η [-]) és a mozgási energiára jellemző teljes CO₂-kibocsátási értékek (ϵ [g CO₂/MJ_{mozgás}]).* 2. táblázat

$\eta_{\text{mozgás, EV}}$	$\eta_{\text{mozgás, BEV}}$	$\eta_{\text{mozgás, HEV}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, LPG}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, G}}$
0,35	0,31	0,27–0,31	0,27	0,27
ϵ_{EV}	ϵ_{BEV}	ϵ_{HEV}	$\epsilon_{\text{ICEV, LPG}}$	$\epsilon_{\text{ICEV, G}}$
67	75	100–170	113	195
$\eta_{\text{mozgás, ICEV, E10}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, E85}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, D}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, B5}}$	$\eta_{\text{mozgás, ICEV, B20}}$
0,27	0,27	0,36	0,36	0,36
$\epsilon_{\text{ICEV, E10}}$	$\epsilon_{\text{ICEV, E85}}$	$\epsilon_{\text{ICEV, D}}$	$\epsilon_{\text{ICEV, B5}}$	$\epsilon_{\text{ICEV, B20}}$
180	28	195	185	155

* A rövidítések jelentését lásd 1. táblázat

Az eredmények értelmezésének megkönnyítése érdekében egy fenntarthatósági mátrixot készítettünk (5. ábra). A fenntarthatósági mátrix azt mutatja, hogy a teljes energia konverziót átfogó eredő energetikai hatásfok jelenleg minden gépjármű esetében nagyon hasonló. Az eredő energetikai hatásfok csak akkor javítható, ha a villamosenergia-termelésben növeljük az újrahasznosítható energiaforrások arányát, ami ráadásul a CO₂-kibocsátást is csökkentené. A nyilak a fejlesztés lehetséges útjait és következményeit mutatják.



5. ábra. A fenntarthatósági mátrix (a szerzők saját készítésű ábrája)

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TKP2020-NKA-04 Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatásával valósult meg, a 2020-4.1.1-TKP2020 támogatási program keretében.

Irodalmi hivatkozások

- [1] L. E. Cagle és D. Tillery, Tweeting the anthropocene: #400ppm as networked event. *Scientific Communication: Practices, Theories, and Pedagogies* 131-148., Taylor and Francis, <http://dx.doi.org/10.4324/9781315160191>, 2017.
- [2] UNFCCC, „Paris Climate Change Conference. In Proceedings of the Conference of the Parties (COP),” Paris, France, 30 November–11 December 2015.
- [3] European Commission, *Clean Energy For All Europeans Communication. In COM(2016) 860 Final*, Luxembourg: European Commission, 2016.
- [4] Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM), *Nemzeti Energia- és Klimaterv*, Budapest: ITM, 2020.
- [5] L. K. Mitropoulos és P. D. Prevedouros, „Life Cycle Emissions and Cost Model for Urban Light Duty Vehicles,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 1. kötet41, pp. 147–159, doi:10.1016/j.trd.2015.09.024, 2015.
- [6] O. Hurtig, L. Leible, S. Kälber, G. Kappler és U. Spicher, „Alternative Fuels from Forest Residues for Passenger Cars - An Assessment under German Framework Conditions,” *Energy Sustain. Soc.*, 1. kötet, összesen: 24, 12, pp. doi:10.1186/2192-0567-4-12, 2014.
- [7] Z. Wu, M. Wang, J. Zheng, X. Sun, M. Zhao és X. Wang, „Life Cycle Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of Battery Electric Vehicle,” *J. Clean. Prod.*, 1. kötet190, pp. 462–470, doi:10.1016/j.jclepro.2018.04.036, 2018.
- [8] F. Tong, P. Jaramillo és I. Azevedo, „Comparison of Life Cycle Greenhouse Gases from Natural Gas Pathways for Medium and Heavy-Duty Vehicles,” *Environ. Sci. Technol.*, 1. kötet49, pp. 7123–7133, doi:10.1021/es5052759, 2015.
- [9] W. Ke, S. Zhang, X. He, Y. Wu és J. Hao, „Well-to-Wheels Energy Consumption and Emissions of Electric Vehicles: Mid-Term Implications from Real-World Features and Air Pollution Control Progress,” *Appl. Energy*, 1. kötet188, pp. 367–377, doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.011, 2017.
- [10] M. E. Ahmadi, N. Ericsson, P. A. Hansson és Å. Nordberg, „Exploring the Potential for Biomethane Production by Willow Pyrolysis Using Life Cycle Assessment Methodology,” *Energy. Sustain. Soc.*, 1. kötet, összesen: 29, 6, pp. doi:10.1186/s13705-019-0189-0, 2019.
- [11] D. Moosmann, S. Majer, S. Ugarte, L. Ladu, S. Wurster és D. Thrän, „Strengths and Gaps of the EU Frameworks for the Sustainability Assessment of Bio-Based Products and Bioenergy,” *Energy Sustain. Soc.*, 1. kötet, összesen: 210, 22, pp. doi:10.1186/s13705-020-00251-8, 2020.
- [12] I. Árpád, J. T. Kiss, G. Bellér és D. Kocsis, „Sustainability Investigation of Vehicles’ CO₂ Emission in Hungary,” *Sustainability*, 1. kötet, összesen: 213, 8237, p. <https://doi.org/10.3390/su13158237>, 2021.
- [13] P. László, *Hőenergia-gazdálkodás (kézirat)*, Veszprém: Veszprémi Egyetem Géptan Tanszék, 1991.
- [14] K. Tucki, O. Orynych, A. Swic és M. Mitoraj-Wojtanek, „The Development of Electromobility in Poland and EU States as a Tool for Management of CO₂ Emissions,” *Energies*, 1. kötet, összesen: 212, 2942, p. doi:10.3390/en12152942, 2019.
- [15] L. O. Nord és O. Bolland, *Carbon Dioxide Emission Management in Power Generation*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2020, ePDF ISBN: 978-3-527-82664-3.