

# AZ AKKUMULÁTOROS ELEKTROMOS SZEMÉLYGÉPJÁRMŰVEK KÖRNYEZETI HATÁSAINAK ÉRTÉKELÉSE A TELJES ÉLETCIKLUS FIGYELEMBEVÉTELÉVEL – HOL AZ IGAZSÁG?

## ENVIRONMENTAL IMPACT EVALUATION OF BATTERY ELECTRIC PASSENGER VEHICLES CONSIDERING THE WHOLE LIFE-CYCLE – WHERE IS THE TRUTH?

Szilágyi Artúr<sup>1</sup>, Bereczky Ákos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék  
szilagyi@energia.bme.hu

<sup>2</sup>egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék  
berezky@energia.bme.hu

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi években az elektromobilitás fejlődéséről szóló hírek mellett számos olyan hír is megjelent, amely kétségbe vonja ennek a trendnek az üvegházhatású gázok (ÜHG-k) kibocsátását csökkentő hatását. A cikkünkben azt szeretnénk bemutatni, hogy az egymásnak sokszor ellentmondó hírek háttérében milyen számítások és gondolatmenetek állnak. Le kell szögezni, hogy a cikkben nem kívánunk állást foglalni egyik oldal mellett sem, de fontosnak tartjuk, hogy bizonyos fogalmak tisztázásra és az elektromobilitás ÜHG-kibocsátásának fontos részletei bemutatásra kerüljenek. Ennek keretén belül a technológia mai állását mutatjuk be, csak a főbb szegmensekre: a gyártásra, az energiatermelésre, -felhasználásra és -tárolásra fókuszálva az életciklus-elemzés segítségével. A változatos szakirodalmi adatokat felhasználva hét különböző szenáriót mutatunk be a BEV-ek (Battery Electric Vehicle, akkumulátoros elektromos gépjárművek) környezeti hatásainak ellentmondásos megítélésének szemléltetésére.

### ABSTRACT

In recent months, as we hear about how well electromobility is evolving and how effectively it is spreading, there have been a number of reports questioning its reducing effect of greenhouse gases (GHGs), particularly CO<sub>2</sub>. In our article, we present the calculations behind these often contradictory news stories and the trains of thought from which conclusions are drawn. It should be noted that in the article we do not intend to take a position on either side, but we consider it important that certain concepts are clarified and that important details of electromobility CO<sub>2</sub> emissions are presented. Within this framework, we present the current state of technology, focusing only on the main segments of manufacturing, energy production and storage, by presenting Life-Cycle Assessment (LCA). Using diverse literature data, we show seven different scenarios to illustrate the contradictory assessment of the environmental impacts of BEVs.

**Kulcsszavak:** elektromobilitás, környezeti lábnyom, belső égésű motorok, életciklus-elemzés, személygépjárművek

**Keywords:** electromobility, environmental footprint, internal combustion engines, life-cycle assessment, passenger vehicles

## BEVEZETÉS

Az elektromobilitás Witkamp és társai szerint olyan elektromos hajtású gépjárműveket (electric vehicle, EV) jelent, amelyek esetén egy vagy több villamos motort használnak a meghajtáshoz. Ez magában foglalja a csak akkumulátor energiaforrású elektromos hajtású gépjárműveket (battery electric vehicle, BEV), a tölthető, hibrid elektromos hajtású gépjárműveket (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) és az üzemanyagcellás (vagy tüzelőanyag-cellás) elektromos hajtású gépjárműveket (fuel cell electric vehicle, FCEV) (Witkamp et al., 2017). A hagyományos hibrideket (hybrid electric vehicle, HEV) a szerzők nem sorolják ide, azokat csak várhatóan fontos szereplőknek tekintik az átmeneti szakaszban (Witkamp et al., 2017). A BEV-ek olyan gépjárművek, amelyek kémiai úton – akkumulátorban – tárolják a villamos energiát. A PHEV-eknél az üzemhez szükséges energiát részben akkumulátor (külső [hálózati] töltés, illetve fékezés során visszatöltve) tárolja, részben a terhelés és az akkumulátorok töltöttségének függvényében belső égésű motorral állítja elő. Az üzemanyagcella pedig valamilyen tüzelőanyag oxidációja segítségével termeli meg az üzemeltetéshez szükséges elektromos energiát.

Ezenkívül elterjedt a nulla kibocsátású gépjármű (zero-emission vehicles, ZEV) elnevezés, amely az akkumulátoros elektromos gépjárműveket (BEV-eket) és az üzemanyagcellás elektromos gépjárműveket takarja. Ez az elnevezés azért erősen zavarba ejtő, mert így az a kép alakulhat ki, hogy ezek a gépjárművek nem rendelkeznek üvegházhatású és egyéb – egészségre káros – kibocsátással. Ez részben igaz, hiszen helyben nem bocsátanak ki káros anyagokat (eltekintve például a gumiabroncsok kopásától és hasonlóktól), viszont a villamos energiát meg kell termelni, és ennek a környezetterhelése nem elhanyagolható. Annak megismerésére, hogy ezeket az egyéb közvetett környezeti hatásokat feltárjuk, a leginkább elfogadott módszer az életciklus-elemzés.

## 1. AZ ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS

Az életciklus-elemzést (Life-Cycle Assessment, LCA) széles körben használják különféle termékek környezeti hatásainak értékelésére. Gépjárművek esetében az LCA-tanulmányok figyelembe veszik az életciklus szempontjából összes jelentős

folyamatot, így a nyersanyag-kitermelést, az alkatrészek gyártását, az összeszerelést, a szállítást, magát a gépjármű használatát és végül a hulladékkezelés lépéseit. Mivel ez a szemlélet a gépjármű életútját gyakorlatilag a „bölcsőtől a sírig” lefedti, ezért elkerülhető vele a környezeti problémák „kiszervezése”. Például egyes alkatrészek gyártásának Kelet-Ázsiába telepítésével nyilvánvalóan nem szűnik meg a környezetterhelés, csak áthelyeződik máshová.

A tudományos életben egyre elkeseredettebb vita folyik a személygépjárművek teljes életciklusra vetített környezeti hatásairól, ráadásul politikailag is egyre kiemeltebb figyelmet kap a klímaváltozás és levegőszennyezettség ügye.

Sok LCA-elemzés készült már különböző hajtású gépjárművekről (belső égésű motoros, hibrid, CNG [Compressed Natural Gas, sűrített földgáz], akkumulátoros, üzemanyagcellás stb.), de viszonylag kevés a téma irodalmát szemlélő, áttekintő jellegű tanulmány. A ritka kivételek egyike az Anders Nordelöf és munkatársai (2014) által készített elemzés, amelyben hetvenkilenc korábbi LCA-t vettek górcső alá. Meg is találták az egymástól elütő eredmények legfontosabb okait:

- különböző rendszerhatárok (*well-to-wheel*, *well-to-tank* stb.);
- figyelembe vett villamosenergia-termelési mód(ok);
- gyári vagy valós fogyasztási és kibocsátási értékek használata.

További lényeges különbségeket okoz:

- a gépjármű feltételezett élettartama. Rövidebb élettartam választásával – például 200 ezer km helyett 150 ezer km – felértékelődik a gépjármű gyártásának környezetterhelése a használathoz képest;
- BEV-ek esetén a figyelembe vett akkumulátor élettartama és típusa.

A következő részben röviden áttekintjük az eddigi kutatások által feltárt lényegesebb összefüggéseket, továbbá azokat a feltételezéseket és számítási módszereket, amelyek leginkább befolyásolják az elektromos gépjárművek környezeti megítélését.

## 2. A BEV-EK ÉLETCIKLUSA

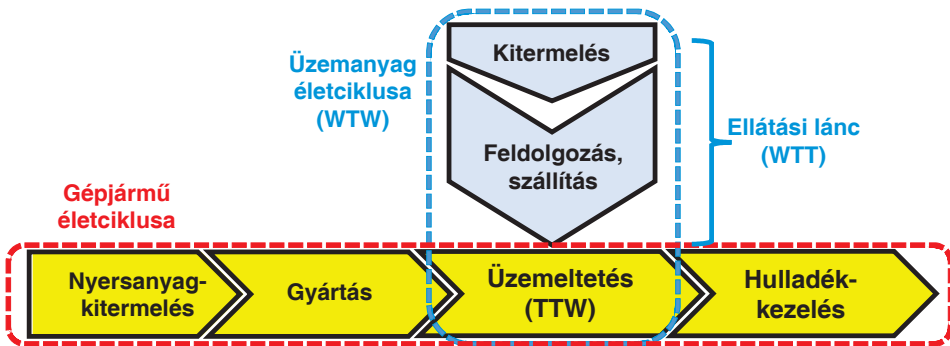
### 2.1. A rendszerhatárok kérdése

A rendszer lehatárolása alatt azt értjük, hogy kiválasztjuk a gépjármű életciklusának azon részeit, amelyeket figyelembe veszünk, és azokat, amelyeket nem. Nagyon egyszerű példa: az összes komolyan vehető tanulmány figyelembe veszi a kőolajtermékek (például benzin vagy gázolaj) előállítását (*well-to-tank*, WTT), de az autógyárban felhasznált kesztyűk gyártását már szinte senki nem tekinti a modell részének. Az LCA alapját képező ISO-szabványoknak nem célja eze-

ket a határokat pontosan tisztázni, ezért az LCA-szakértők elvileg szabadon választhatják meg a rendszerhatárokat. Azért csak elvileg, mert a dokumentációból egyértelműen ki kell derülnie a lehatárolásnak, ezért gépjárművek esetén csak két fő rendszerhatárral lehet találkozni:

- Az egyszerűbb, „well-to-wheel” (WTW) tanulmányok csak az energia-hordozók életciklusát veszik figyelembe, tehát a kitermelésüktől és feldolgozásuktól a szállításon át a felhasználásig.
- Ezzel szemben mások a teljes életciklus leírására vállalkoznak, azaz a vizsgálatot kiterjesztik a gépjárműgyártás részleteire, az üzemidő alatti karbantartásra, az alkatrészek cseréjére, illetve a hulladékok kezelésére. Ebben az esetben komoly kihívás, hogy a szükséges adatok java része, például a gépjármű összes alkatrészét tartalmazó alapanyaglista (bill of materials, BOM), általában a gyártók szellemi tulajdonát képezi. Ezért vagy megbízunk a gyártók által végzett LCA-számításokban a részletek ismerete nélkül, vagy a kevés nyilvános alapanyaglista alapján következtethetünk más gépjárműtípusokra (Schweimer–Levin, 2001).

Az életciklus-elemzés során tehát egy leltár kerül összeállításra, amely tartalmazza a gyártás során felhasznált alkatrészek, anyagok és energiaforrások teljes életciklusát (1. ábra). A gépjárművek életciklusát négy fő szakaszra célszerű bontani: a) nyersanyagok kitermelése, b) gyártás, c) használat és karbantartás, valamint d) a hulladékkezelés.



1. ábra. A közlekedési gépjárművek és az üzemanyagok általános életciklusfázisai  
 WTW: well-to-wheel („küttől a kerékig”), WTT: well-to-tank („küttől az üzemanyagtartályig”),  
 TTW: tank-to-wheel („üzemanyagtartálytól a kerékig”)

Köztudott, hogy az elektromos hajtású járművek gyártása általában nagyobb környezetterheléssel jár, a különböző szerzők által elvégzett LCA-vizsgálatok 85%-ánál az elektromos hajtás növelte az autógyártás környezetterhelését

(Nordelöf et al., 2014). A BEV-ek esetén ez a növekedés egyértelműen az akkumulátorgyártás rovására írható. Jens F. Peters és munkatársai (2017) alapján az akkumulátor típusától függően 40–350 kg, de átlagosan 110 kg CO<sub>2</sub>-egyenérték (CO<sub>2</sub>e) ÜHG-kibocsátással jár minden 1 kWh akkumulátorkapacitás legyártása. A gépjármű feltételezett élettartama nagyban meghatározza az egy kilométerre fajlagosított eredményeket. Például, ha a gyári adatok szerinti 150 ezer km-t vesszük alapul, akkor a gépjármű akkumulátorának gyártása 50–80 g CO<sub>2</sub>/km kibocsátásnak felel meg. Ezzel szemben, ha ezt 250 ezer km-re növeljük, akkor lecsökken 30–50 g CO<sub>2</sub>/km-re.

Ennél sokkal fontosabb azonban az energiahordozó életciklusa (WTW), amely az üzemeltetés fázisában találkozik a gépjármű életútjával. Függetlenül attól, hogy ez hagyományos üzemanyag vagy villamos energia, minden közúti gépjármű esetében egyértelműen ez a legszennyezőbb folyamat. A részletes WTW-tanulmányokból tudjuk, hogy az elektromos hajtás esetén a három legfontosabb tényező:

- a személygépjármű fogyasztása (energiafelhasználása),
- a töltéshez felhasznált villamos energia előállításának módja, illetve
- hibridek esetén a hibridizáció foka, vagyis hogy az üzemeltetés mekkora hányadát teszi ki elektromos hajtás.

## 2.2. Energiamix

Ahogy az előzőekben utaltunk rá, a villamosenergia-előállítás módja döntő jelentőségű a BEV-ek teljes életciklusát tekintve.

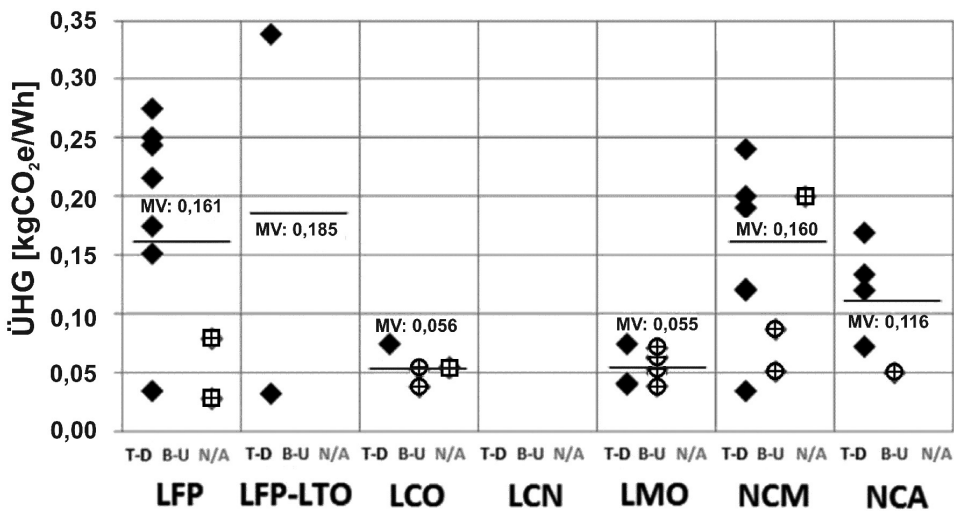
A töltéshez szükséges villamos energia termelése sokféle elsődleges energiahordozó felhasználásával történhet (például kőszén, földgáz, biomassza, szél, napsugárzás, atomenergia stb.), amelyeknek eltérő környezeti hatásai vannak. Azonban egyféle erőmű általában nem tudja ellátni egy adott terület villamosenergia-igényét, mert az egyes erőműtípusok más-más funkciót töltenek be, és eltérő „menetrend” szerint működnek. Mivel a termelésnek minden pillanatban meg kell egyeznie a fogyasztással, ezért szükség van rugalmasan változtatható teljesítményű erőművekre (például gázturbinákra) vagy energiatárolásra is a rendszer megbízható működéséhez. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a villamosenergia-termelésen túl az erőművek gyakran egyéb kapcsolt feladatokat is ellátnak, mint például a távhőtermelés vagy hulladékégetés.

Mindez még kiegészül azzal is, hogy a legtöbb ország elektromosenergia-rendszere össze van kapcsolva a szomszédos országok hasonló rendszereivel a terheléskiegyenlítés megkönnyítése érdekében. Ezek után egyértelmű, hogy a járművek hálózatról történő töltése esetén szinte lehetetlen kibogozni, hogy adott pillanatban melyik erőmű milyen arányban járult hozzá az akkumulátorban eltárolt energia megtermeléséhez, egyszóval az energiamix meghatározásához mindenképpen

valamilyen feltételezéshez vagy egyszerűsítéshez kell folyamodni. A témában írt tanulmányokkal szemben tehát elsődleges követelmény, hogy átláthatóan közöljék, melyik megközelítést alkalmazták, és milyen értéket vettek figyelembe. A harmadik részben több ilyen forgatókönyvet is bemutatunk és összehasonlítunk.

### 2.3. Akkumulátorok

A BEV-ek esetén fontos követelmény a hatótávolság, ennek növelésére számos módszer adott, az egyik lehetőség akkumulátor kapacitásának növelése, amely a gépjármű tömegének – jelentős – növekedését vonja maga után, például egy 2009-től gyártott Citroen C-Zero 67 Wh/kg energiasűrűségű 16 kWh elméleti kapacitású akkumulátorcsomaggal 1100 kg üres tömeget eredményezett. Addig egy Tesla Model S (Performance) 160 Wh/kg energiasűrűségű 100 kWh elméleti kapacitású akkumulátorcsomaggal az üres tömeg 2241 kg, ugyanez az adat egy AUDI e-tron 55 esetén 95 kWh elméleti kapacitású akkumulátorral 2490 kg.



2. ábra. Az egyes akkumulátortípusok fajlagos gyártási ÜHG kibocsátása különböző LCA-módszerek szerint modellezve (magyarázat: T-D: fentről lefele, B-U: lentől felfele modellezve, N/A: nem ismert módszer, MV: átlag, LFP: lítium-vas-foszfát, LFP-LTO: lítium-vas-foszfát-lítium-titanát, LCO: lítium-kobalt-oxid, LMO: mangán-spinell-oxid, LCN: lítium-kobalt-nikkel, NCM: kobalt-nikkel-mangán, NCA: nikkel-kobalt-alumínium) (Peters et al., (2017) alapján)

Az akkumulátorcsomagok életciklusra vetített környezeti hatásait részletesen a már említett Peters és munkatársai (2017) foglalták össze, akik 113 publikációt tekintettek át. Megállapításuk szerint mindössze hét esetben állt a szerzők ren-

delkezésére részletes összetétel az akkumulátor alkatrészeiről, de azóta ezek az adatok is jórészt elavultak. A tanulmány eredményei alapján az akkumulátorok előállításának ÜHG-kibocsátásait leginkább meghatározó tulajdonságok az élettartam, a kisütési mélység, a határfok és az energiasűrűség. Emellett fontos tényezők az akkumulátorokban felhasznált anyagok is.

Megjegyzendő, hogy bár a legtöbb tanulmány csak a klímaváltozásért felelős kibocsátásra (ÜHG) fókuszál, addig az akkumulátorok esetében fontos lenne a bányászathoz (főleg nikkell és kobalt) és a gyártáshoz kötődő szennyezőanyagok kibocsátásának pontosabb ismerete is a környezeti hatások pontosabb és szélesebb körű megítéléséhez.

Az életciklus-elemzés szempontjából fontos a hulladékkezelés. Ezzel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy már zajlik az elhasználódott, de még üzemképes személygépjármű-akkumulátorok előkészítése másodlagos hasznosításra. Erre lehetőséget például a szél- és fotovoltaikus erőművek ingadozó termelésének kiegyenlítésére szolgáló energiatároló egységek nyújtanak, amely megoldás határozott környezeti előnyökkel járhat.

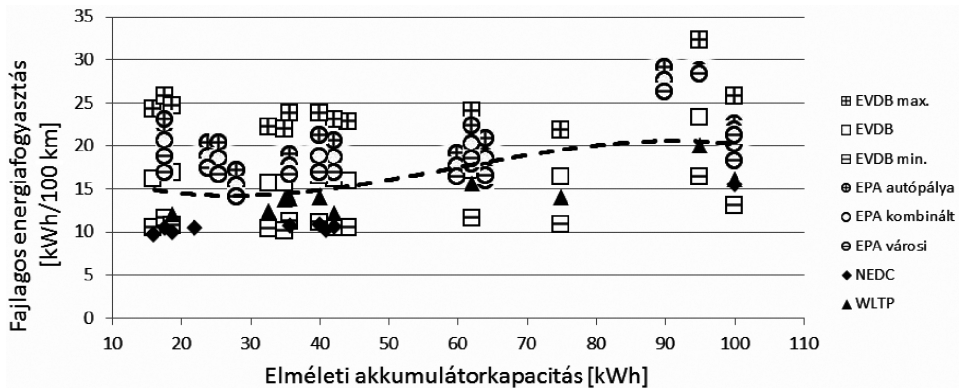
#### 2.4. A gépjárművek energiafelhasználása

A BEV-ek környezetterhelését és hatótávolságát meghatározó következő fő paraméter a fogyasztás, amit szintén nagyfokú bizonytalanság övez, bár kisebb mértékben, mint a villamosenergia-mix. A kérdés tehát, hogy az akkumulátorokkal mekkora távolságot lehet megtenni, azaz mekkora az energiafogyasztása egy gépjárműnek például 100 km-re vonatkoztatva?

Az elektromos hajtású gépjárművek esetében több vizsgálati ciklus szerinti értéket találhatunk, ezek a leggyakrabban az NEDC-, a WLTP- és az EPA-ciklus szerinti eredmények. A legrégebbi az NEDC (new European driving cycle, új európai menetciklus), amelyet az 1980-as években fejlesztettek ki, ez két részből áll, egy négyszer ismétlődő városi és egy egyszeri közúti szakaszt tartalmaz. Ennek utódja a WLTP- (world harmonized light vehicle test procedure, könnyű gépjárművek világszerte összehangolt teszteljárása) ciklus, amely 2017 óta kötelező az új típusokra. Ez a ciklus lényegesen dinamikusabb, mint az NEDC, számos gyorsítást és lassítást tartalmaz, így valóságosabb. Fontos megjegyezni, hogy ez kiegészült az ún. RDE- (real driving emissions, valós vezetési kibocsátás) teszttel, melyet valós forgalomban kell végrehajtani. Az Egyesült Államokból az EPA- (US Environmental Protection Agency, USA Környezetvédelmi Ügynökség) vizsgálat szerinti mérési adatokkal találkozhatunk, amely szintén dinamikus, és több részből áll (városi, autópálya stb.), melyek további részekre bonthatóak. A fenti, az RDE-től eltekintve laboratóriumi (fékpad) vizsgálati módszereken kívül számos szervezet/cég ad információkat az energiafelhasználásról, ezek közül sok a gyári adatokat gyűjti össze, de vannak olyan adatbázisok, melyek adatai olyan model-

lekre épülnek, amelyeket folyamatosan fejlesztenek különféle forrásokból származó tapasztalati adatok felhasználásával, ezek közül az EVDB (Electric Vehicle Database) adatait mutatjuk be (URL1).

A 3. ábrán különböző forrásokból 36 gépjárműre összegyűjtött energiafogyasztási adatokat mutatunk be az elméleti akkumulátorkapacitás függvényében, a nem EPA-adatok esetén olyan gépjárművek lettek kiválasztva, melyeknél adott legalább kettő az NEDC, a WLTP vagy az EVDB szerinti energiafogyasztásról. Megfigyelhető, hogy az energiafogyasztási adatok között nagy az eltérés, legalacsonyabb az energiafogyasztás az NEDC-ciklus szerint, a WLTP-ciklus esetén átlagosan 20%-kal nagyobb, de van, ahol csak 4%-kal, viszont van ahol 30%-kal nagyobb. Az EVDB szerinti energiafogyasztás több mint 20%-kal nagyobb, mint a WLTP-ciklus esetén mért, itt az eltérés +10% és +40% közötti. Az EPA és az EVDB esetén az EPA 1–20%-kal nagyobb értéket ad meg (az EPA esetén a kombinált energiafogyasztást vettük figyelembe).



3. ábra. A fajlagos energiafogyasztás az elméleti akkumulátorkapacitás függvényében (Wu et al., 2015 alapján)

Az EVDB-adatbázis különböző üzemi esetekre is ad energiafogyasztási értékeket, innen a legalacsonyabb a városi felhasználás átlagos környezeti hőmérséklet esetén (23 °C, fűtés és A/C [légkondicionálás] nélkül), és a legmagasabb az autópályás felhasználás esetén hideg időben (−10 °C, fűtéssel). Itt az átlagos energiafogyasztás a legkisebb energiafogyasztás esetén 66%-kal alacsonyabb, míg az autópályás felhasználása esetén 42%-kal magasabb, mint a kombinált fogyasztás esetén.

Az említett bizonytalanságok természetesen fennállnak belső égésű motoros – személygépjárművek (internal combustion engine vehicle, ICEV) – esetén is. Az azonban látszik, hogy a városi közlekedésben az ICEV és a BEV közti fogyasztásbeli különbség nő az utóbbi javára, ami elsősorban a regeneratív fékezésnek és az üresjáratú fogyasztás hiányának köszönhető.



### 3. AZ AKKUMULÁTOROS ELEKTROMOS GÉPJÁRMŰVEK KIBOCSÁTÁSAINAK ÖSSZEHASONLÍTÓ ÉRTÉKELÉSE

Ahhoz, hogy számszerűen meg tudjuk vizsgálni a BEV kontra ICEV vitában elhangzó érveket és ellenérveket, felállítottunk egy egyszerűsített életciklusmodellt, amely a BEV-ek közvetett kibocsátásait a hét legfontosabb paraméterből számítja ki, a referenciaként szolgáló ICEV-ét pedig öt változóból (*1. táblázat*). Az ÜHG-kibocsátások összehasonlításához kiválasztottunk öt különböző szakirodalmi munkát, ezek értékeivel végeztük el a számításokat. Emellett két szélsőséges forgatókönyvet is készítettünk: az egyik a BEV-eket a lehető legrosszabb, a másik a lehető legjobb fényben feltüntető esetet mutatja be. Itt a paramétereket úgy választottuk meg, hogy vagy mindenben a BEV-nek kedvező, vagy mindenben a BEV-ek szempontjából hátrányos szélsőértékeket vegyenek fel. Az első eset körülbelül annak felelne meg, ha egy nagy fogyasztású és nagy akkumulátorral ellátott BEV csak széntüzelésű erőművekben termelt villamos energiával lenne töltve, amit egy kis fogyasztású, gyári fogyasztási adataival figyelembe vett dízelüzemű gépjárművel hasonlítunk össze. A másik véglet, hogy 100%-ban megújuló villamos energiával töltött kis és hatékony akkumulátorral bíró gépjárművet egy kedvezőtlen fogyasztású és rövid élettartamú hagyományos személygépjárművel állítunk párba. Összesen tehát hét különböző forgatókönyv számadataival érzékeltetjük a BEV-ek környezetterhelésének ellentmondásos megítélését (*1. táblázat*).

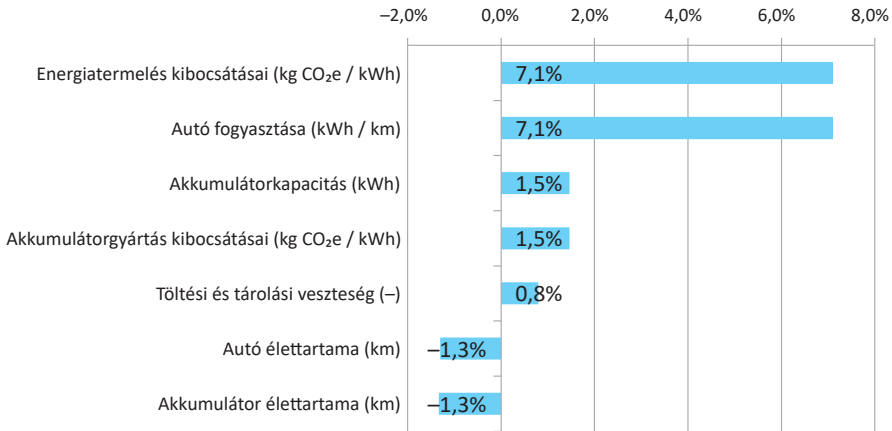
A két véglet szerint a BEV-ek kihozhatók akár egy nagyságrenddel kedvezőbbnek vagy akár hatszor olyan szennyezőnek is, mint egy hagyományos személygépjármű. A szakirodalmi források ennél kiegyenlítettebbek, kettő nem talál szignifikáns különbséget, egy a kibocsátások kismértékű növekedését, kettő pedig kb. 60%-os csökkenést prognosztizál (lásd *1. táblázat*).

Megvizsgáltuk azt is, hogy az egyes paraméterek 10%-os növelése hogyan változtatja meg a BEV-ek kibocsátásait az átlaghoz képest (*4. ábra*). Ebből kitűnik, hogy a személygépjármű fogyasztása és a villamosenergia-termelés módja a legfontosabb tényező, a többi paraméter csak kisebb hatást gyakorol a végső képre. Az akkumulátor és a gépjármű élettartamának növelése csak kismértékben csökkenti az ÜHG-kibocsátásokat.

A közlekedés környezeti hatásai az üvegházhatású gázokon túl még egyéb légszennyező anyagok kibocsátására is kiterjednek. Ezek közül a legfontosabbak az élővilágra és az emberi egészségre káros nitrogén-oxidok, kén-oxidok és a por (Gács, 2019). Ugyanúgy, ahogy a szén-dioxid esetében, a BEV-ek hajtásláncja közvetlenül ezekből sem bocsát ki a használat során, csak közvetve, a gépjármű életciklusa és a villamos energia megtermelése során. Sajnos az egyéb szennyezőkről még kevesebb szakirodalmi adat áll rendelkezésre, mint a CO<sub>2</sub>-ről. Különösen rossz a helyzet az akkumulátor gyártásával járó környezeti hatásokat illetően, ahol szinte lehetetlen megfelelő adatokhoz jutni. Ahhoz, hogy mégis képet

1. táblázat. Különböző forgatókönyvek a BEV-ek és ICEV-ek ÜHG-kibocsátásainak értékeléséhez

Paraméter	Mértékegység	Gáscs (2019)	Message (2019)	ADAC (URL2)	Buchal et al. (2019)	Hoekstra (2019)	Legjobb eset	Legrosszabb eset	Átlag
WTW (energiamix)	kg CO <sub>2e</sub> / kWh	0,57	0,3	0,58	0,55	0,38	0,02	1,4	0,48
Töltési és tárolási veszteség	–	0,15	–	–	–	–	0,06	0,2	0,1
Akkumulátorkapacitás	kWh	–	30	40	75	75	30	100	40
Akkumulátor-élettartam	ezer km	–	133	150	150	300	250	100	133
Akkumulátorgyártás	kgCO <sub>2e</sub> /kWh	–	55	75	170	65	40	350	106
Fogyasztás	kWh/km	0,2	0,2	0,19	0,15	0,178	0,15	0,35	0,15
Gépjármű-élettartam	ezer km	–	200	225	150	150	250	150	200
WTW	g CO <sub>2e</sub> /km	134	60	110	83	67	3	612	80
Akkumulátorgyártás (fajl.)	g CO <sub>2e</sub> /km	–	12	20	85	16	5	350	30
Járműgyártás	g CO <sub>2e</sub> /km	–	16	14	–	–	13	21	16
<b>Σ Fajlagos kibocsátás</b>	<b>g CO<sub>2e</sub>/km</b>	<b>134</b>	<b>88</b>	<b>145</b>	<b>168</b>	<b>83</b>	<b>21</b>	<b>984</b>	<b>130</b>
WTT (dizel-előállítás)	g CO <sub>2e</sub> /km	–	20	–	–	–	30	20	20
TTW (közvetlen kibocsátás)	g CO <sub>2e</sub> /km	137	120	120	141	141	150	110	120
Járműgyártás	g CO <sub>2e</sub> /km	–	21	36	–	–	21	12,8	12,8
Élettartam	ezer km	–	150	250	250	250	150	250	250
NEDC korrekció	–	–	1,35	–	–	1,57	1,5	0	1,35
<b>Σ Fajlagos kibocsátás</b>	<b>g CO<sub>2e</sub>/km</b>	<b>137</b>	<b>210</b>	<b>156</b>	<b>141</b>	<b>221</b>	<b>291</b>	<b>143</b>	<b>202</b>
Változás BEV esetén ICEV-hez képest		-2%	-58%	-7%	+19%	-63%	-93%	+589%	-35%



4. ábra. A modell érzékenysége a paraméterek 10%-kal történő növelése esetén

tudjunk alkotni a környezetterhelésről, az Ecoinvent életciklus-adatbázis 3.4-es verziójának (Wernet et al., 2016) adatait felhasználva egy 38 kWh Nissan Leaf modell paramétereivel végeztük el a számításokat. A vizsgált személygépjármű adatai: az akkumulátor tömege 300 kg, a személygépjármű tömege akkumulátor nélkül 1300 kg, az átlagos fogyasztás 0,2 kWh/km, a töltési és tárolási veszteség 10%, az akkumulátor élettartama 133 ezer km, a gépjármű élettartama 200 ezer km. A villamos energiára vonatkozó adatokat a Magyarországra vonatkozó adat-sorból („electricity, low voltage, Hungary”) kerestük ki, amely figyelembe veszi az importot is. Ez utóbbi bővebb kifejtését már korábban megtettük a NO<sub>x</sub>-kibocsátások esetére vonatkoztatva (Szilágyi, 2019).

Összehasonlítási alapként egy modern benzines személygépjárművet választottunk, amelynek a közvetlen (TTW) kibocsátásait Gács Ivántól vettük át (Gács, 2019), a gépjárműgyártási és az üzemanyag-előállítással kapcsolatos kibocsátásokat pedig szintén az Ecoinvent-adatbázisból („passenger car, petrol/natural gas” és „petrol, 5% ethanol by volume from biomass” adatsorok). A benzines személygépjármű tömegét 1450 kg-nak, a fogyasztást 6 l/100 km-nek, az élettartamát pedig 250 000 km-nek feltételeztük.

A fenti feltételezések természetesen vitathatóak, például az egyszerűség kedvéért nem vettük figyelembe a regeneráló fékezéssel megtakarítható porkibocsátást vagy a dízelüzemű gépjárművek kedvezőtlenebb kibocsátási értékeit. Az azonban elég egyértelmű, hogy a BEV-gépjárművek kibocsátásai a teljes életciklus alatt nagyjából egy nagyságrendbe esnek a modern hagyományos gépjárművekével. Kétségtelen, hogy a belső égésű motoros gépjárművek közvetlen kibocsátásainak nagy része koncentráltan jelenik meg a városi környezetben, míg az erőművek kárpótlások nagy területen eloszlatni a szennyezőanyagukat, de az összes kibocsátást tekintve nem igazán jelentenek jelentős előrelépést a BEV-ek.

2. táblázat. A BEV és ICEV egyéb légszennyező anyag kibocsátásai az életciklus során

Légszennyezői probléma	Mértékegység	BEV					Referencia benzines jármű				Változás	
		Energiamix	Akku. gyártás	WTW	Akku. gyártás (fajlagos)	Járműgyártás	Összes fajlagos	WTT	TTW (füstgáz)	Járműgyártás		Összes fajlagos
Fotokémiai szmog	NM VOC eq.	1063	300	236	90	219	545	184	80	169	524	+4%
Savasodás	SO <sub>2</sub> -eq.	2136	753	475	226	266	967	300	90	198	724	+34%
Légzőrendszeri betegségek	PM10-eq.	677	289	150	87	153	391	87	5	114	239	+36%

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredményeink szerint a „villanyautók” a közlekedés környezeti problémáit sajnos nem oldják meg varázsütésre. Egyrészt a villamosenergia-termelés sajátosságai miatt a jelen helyzetben nem jelentenek nagy előrelépést a korszerű belső égésű motorokkal szemben, másrészt az akkumulátorok gyártása is jelentős környezetterheléssel jár. Így paradox módon jelenleg minél kisebb a hatótávolság, annál nagyobb az esély, hogy az elektromos autó használat közben behozza a gyártásából adódó hátrányokat. Előnyük jelenleg nagyrészt abban áll, hogy a sűrűn lakott városközpontokból a szennyezés áthelyeződik a városoktól gyakran távol elhelyezkedő és a szennyezést nagy magasságban kibocsátó erőművekhez, illetve más országokba. A klímaváltozás szempontjából valóban jelenthetnek kismértékű előrelépést, de a BEV-ek magas ára miatt valószínűleg ez messze nem a leghatékonyabb megoldás a klímaváltozás elleni küzdelemben. Ugyanakkor ez a helyzet lassan megváltozhat a villamosenergia-rendszer EU-szinten vizionált karbonmentessé válásával, amely esetben a villanyautók előnyei egyre hangsúlyosabbá válhatnak, főleg kis és közepes hatótávolság esetén a kisebb energiafogyasztás miatt. Ehhez azonban feltétlenül szükséges az elektromos energiatermelés LCA elemzése, amely figyelembe veszi a megújulóenergia-termelés eszközeinek gyártásával, üzemeltetésével és újrahasznosításával járó szennyezést, valamint a nehezen előrejelezhető rendelkezésre állás járulékos környezetterhelését, amit a hálózatba való integrálás okoz.

## KITEKINTÉS, ZÁRÓ GONDOLATOK

Magyarország esetében köztudott, hogy a hazai gépjárműpark átlagéletkora húsz év körül van, és elsősorban anyagi okok állnak a mögött, hogy nem a korszerű Euro 6-os gépjárművekkel közlekedik az egész ország. A villanyautók jelenlegi relatíve magas ára ezen a trenden nem sokat változtat. Ráadásul megalapozottnak tűnik az a feltételezés, hogy az elektromos autókat elsősorban a nagyobb vásárlóerővel rendelkező vásárlók fogják megvásárolni, akik eddig is a legkorszerűbb és legkevésbé szennyező gépjárműveket használták. Nemzetgazdasági szinten sokkal hatékonyabb lenne a flotta legelavultabb, a mainál tízszer, hússzor szennyezőbb gépjárműveit Euro 5-ös vagy 6-os szintűre cserélni. Első körben tehát célszerű lenne a magyar gépjárműflotta életkorát csökkenteni, hiszen szinte majdnem mindegy, milyen tüzelőanyagú újabb személygépjárműre cserélünk, a kibocsátási értékek jelentősen csökkenhetnek. Emellett mindegyik gépjárműtípusnak megvan a maga piaci szegmense, ahol az előnyeit kihasználva fontos részese lehet az energetikai átalakulásnak: a BEV-ek a városi közlekedésben, rövidebb utakon előnyösek, a hibridek (HEV) a távolsági utazásban stb.

Egy lépéssel messzebből szemlélve a közlekedési szektort, számos szent ténnek tekintett dogmához kellene hozzányúlni a hatékony cselekvés érdekében. Egyrészt a személyközlekedést átfogóan kellene fejleszteni nagyobb ívű stratégiák mentén, amely magában foglalja a személygépjárműves közlekedés alternatíváinak fejlesztését. Ilyenek például a kényelmes és gyors közlekedést biztosító, fejlett közösségi közlekedési infrastruktúra, a modális közlekedés, P+R-parkolók, nagy sebességű vasút, kerékpárutak stb. Másrészt, ha tényleg komoly eredményeket szeretnénk elérni, akkor újra kell gondolni a társadalom mobilitáshoz fűződő viszonyát: a jóllétünkhöz tényleg szükségünk van-e egyáltalán *ennyi* közlekedésre és szállításra? A közlekedés és szállítás volumenének csökkentését szolgálhatja például a távmunka vagy a munkahelyhez közeli lakhatás támogatása, a rövidebb munkahetek bevezetése és számos egyéb ösztönző, amelyek látszólag távol esnek a közlekedés témájától. A döntéshozók számára tehát számtalan eszköz adott a helyzet javítására. Ha most nem vesszük a fáradságot a változásra, akkor a természet előbb-utóbb gondoskodni fog róla, hogy „észrevegyük”. Abban ugyanis nem bízhatunk, hogy a túlfogyasztáson alapuló gazdasági modellből és az elkényelmesedett életmódunkból származó problémákból valamilyen okos technológiával majd ki tudjuk magunkat „innoválni”.

## IRODALOM

- Buchal, C. – Karl, H. D. – Sinn, H. W. (2019): Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO<sub>2</sub>-Bilanz? *Schnelldienst*, 8, 72. Jahrgang 25. April 2019.
- Gács I. (2017): A szén-dioxid-kiváltás mértéke. *Magyar Energetika*, XXIV, 1, 14–17.
- Gács I. (2019): A zéró kibocsátás mítosza. *Mérnök Újság*, 4, 25–27.
- Gombert, J. – Maes, E. (2018): *A Ban on the Internal Combustion Engine by 2030 – an Economic Utopia*. Master's Dissertation. Gent, Belgium: Universiteit Gent, <https://bit.ly/3mXj4hT>
- Hoekstra, A. (2019): The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. *Joule*, 3, 6, 1412–1414. DOI: 10.1016/j.joule.2019.06.002, [https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(19\)30271-5.pdf](https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(19)30271-5.pdf)
- Hu, K. – Wu, J. – Schwanen, T. (2017): Differences in Energy Consumption in Electric Vehicles: An Exploratory Real-World Study in Beijing. *Journal of Advanced Transportation*, Article ID 4695975 DOI: 10.1155/2017/4695975, <http://downloads.hindawi.com/journals/jat/2017/4695975.pdf>
- Messagie, M. (2019): *Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles*. Brussel, Belgium: Vrije Universiteit Brussel, <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf>
- Nordelöf, A. – Messagie, M. – Tillman, A.-M. et al. (2014): Environmental Impacts of Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles – What Can We Learn From Life Cycle Assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 25. DOI: 10.1007/s11367-014-0788-0, <https://bit.ly/3omKT3l>
- Peters, J. F. – Baumann, M. – Zimmermann, B. et al. (2017): The Environmental Impact of Li-ion Batteries and the Role of Key Parameters – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491–506. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.039

- Schweimer, G. – Levin, M. (2001): *Life Cycle Inventory for the Golf A4 (Internal Report)*. Volkswagen AG. <http://www.wz.uw.edu.pl/pracownicyFiles/id10927-volkswagen-life-cycle-inventory.pdf>
- Szilágyi A. (2019): Life-cycle Nitrogen Oxide Emissions of the Hungarian Electricity Consumption Mix. In: Gróf G. (szerk.): *13<sup>th</sup> International Conference on Heat Engines and Environmental Protection Proceedings*. 201–206.
- Wernet, G. – Bauer, C. – Steubing, B. et al. (2016): The Ecoinvent Database Version 3 (Part I): Overview and Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21, 9,1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8, [https://www.researchgate.net/publication/301561039\\_The\\_ecoinvent\\_database\\_version\\_3\\_Part\\_I\\_Overview\\_and\\_methodology](https://www.researchgate.net/publication/301561039_The_ecoinvent_database_version_3_Part_I_Overview_and_methodology)
- Witkamp, B. – van Gijlswijk, R. – Bolech, M. et al. (2017): *The Transition to a Zero Emission Vehicles Fleet for Cars in the EU by 2050. Pathways and Impacts: An Evaluation of Forecasts and Backcasting the COP21 Commitment*. Bruxelles: EAFO Project, <https://bit.ly/3ITpe1b>
- Wu, X. – Freese, D. – Cabrera, A. et al. (2015): Electric Vehicles' Energy Consumption Measurement and Estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 34, 52–67. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.007, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920914001485>
- Zu, C. – Li, H. (2011): Thermodynamic Analysis on Energy Densities of Batteries. *Energy & Environmental Science*, 4, 2614–2624. DOI: 10.1039/C0EE00777C, [https://www.researchgate.net/publication/255748960\\_Thermodynamic\\_analysis\\_on\\_energy\\_densities\\_of\\_batteries](https://www.researchgate.net/publication/255748960_Thermodynamic_analysis_on_energy_densities_of_batteries)
- URL1: EV Database: <https://ev-database.org> (letöltés: 2020. április 30.)
- URL2: ADAC: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/studie-oekobilanz-pkw-antriebe-2018/> (letöltés: 2019. szeptember)