



**Elektromobilitás és fenntarthatóság:
A V2G közép-európai adaptációs lehetőségei**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Horváth Gábor

Témavezető: Dr. Szegedi Sándor

DEBRECENI EGYETEM
Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács
Földtudományok Doktori Iskola
Debrecen, 2026

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács, Földtudományok Doktori Iskola Tájvédelem és éghajlat programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 2026.01.24.

.....

a jelölt aláírása

Tanúsítom, hogy Horváth Gábor doktorjelölt 2020 - 2025 között a fent megnevezett Doktori Iskola Tájvédelem és éghajlat programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 2026.01.24.

.....

a témavezető aláírása

ELEKTROMOBILITÁS ÉS FENNTARTHATÓSÁG: A V2G KÖZÉP-EURÓPAI ADAPTÁCIÓS LEHETŐSÉGEI

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében
a **földtudományok** tudományágban

Írta: **Horváth Gábor**
okleveles közgazdász

Készült a Debreceni Egyetem Földtudományok Doktori Iskola doktori iskolája
(Tájvédelem és éghajlat programja) keretében

Témavezető: Dr. Szegedi Sándor

Az értekezés bírálói:

Dr.

Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: Dr.

tagok: Dr.

Dr.

Dr.

Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 20...

Köszönetnyilvánítás

Sokszor nem a válasz volt a nehéz, hanem annak tisztázása, mi is pontosan a kérdés. Dr. Szegedi Sándornak, témavezetőmnek köszönöm a szakmai kereteket és a lényegre irányító visszajelzéseket, amelyek a munkát mindvégig mederben tartották. Dr. Tóth Tamásnak külön köszönöm a mindennapi együtt gondolkodást és a jókor feltett, rövid, pontos kérdéseket, amelyek nyomán a következő lépés magától értetődővé vált. Hálás vagyok a Debreceni Egyetem Földtudományi Doktori Iskolája szakmai közegének és a PhD-hallgatótársaknak az inspiráló beszélgetésekért és a tapasztalatszeréért, amelyek minden alkalommal szélesítették látókörömet. Végül köszönöm a családomnak a türelmet és a háttérrel, mert nélkülük a végső kérdésekig vezető utat nem járhattam volna végig.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	1
1.1	A kutatás indokoltsága és célrendszere	2
1.2	Kutatási célok, kérdések és hipotézisek	3
2.	Szakirodalmi áttekintés	8
2.1	BEV-ek és energiarendszerek kapcsolata.....	8
2.1.1	Az elektromos hajtás és energiaigény hálózati összefüggései.....	9
2.1.2	Az akkumulátortechnológia fejlődése és a rendszerintegráció.....	10
2.1.3	A decentralizált, rugalmas hálózat és az EV-k szerepe	11
2.2	A V2G-technológia műszaki és rendszerelméleti alapjai	11
2.2.1	A kétirányú energiaáramlás technikai feltételei	12
2.2.2	Rendszerszintű szolgáltatásai és aggregációs modellek	14
2.2.3	A pilotprojektek fő tanulságai és technológiai érettsége	17
2.3	Gazdasági, technológiai és viselkedési ösztönzők a V2G-rendszerek elterjedésében	20
2.3.1	Gazdasági ösztönzők és költségstruktúrák	21
2.3.2	Technológiai ösztönzők és kompatibilitási feltételek.....	24
2.3.3	Viselkedési ösztönzők és felhasználói döntési mintázatok.....	28
2.4	Regionális alkalmazhatóság és magyar kontextus.....	31
2.4.1	EU27 szerkezeti különbségek és összehasonlítási lehetőségek	31
2.4.2	A közép-európai elektromobilitási sajátosságok	34
2.4.3	A magyar piac szerkezeti, szabályozási és technológiai adottságai	37
2.5	Életciklus-alapú környezeti értékelési keretek az elektromobilitás és a V2G kontextusában.....	41
2.5.1	Az elektromos járművek életciklus-alapú üvegházhatásúgáz-kibocsátási profilja.....	42
2.5.2	Az EV-akkumulátorok életciklusa: degradáció, szekunder felhasználás és környezeti implikációk	45
2.5.3	A V2G szerepe az energiarendszer karbonintenzitásának csökkentésében életciklus-alapú megközelítésben	50
3.	Anyag és módszer	54
3.1	Kutatási stratégia és adatforrások	54
3.2	G1: Régióspecifikus TCO-modell felépítése.....	57
3.3	G2: Az elektromos autómegosztás gazdasági fenntarthatóságának módszertani kerete: benchmarking és Monte Carlo-szimuláció	59
3.3.1	Deskriptív benchmarking és inputparaméterek	59
3.3.2	Determinisztikus bevétel–költség modell.....	60
3.3.3	Cash-flow és Monte Carlo-szimuláció	61
3.3.4	Szenáriók, érzékenységvizsgálat és módszertani korlátok	62
3.4	R1: Az elektromos járműpiac egységes összehasonlítása az Európai Unióban: indikátorrendszer és klaszterezési logika	63

3.5	R2: V2G-hatás becslése a regionális termelés–fogyasztás kiegyenlítésében	67
3.6	M1: Nemzetközi V2G-pilotprojektek adatbázisa és kvalitatív elemzési kerete	67
3.7	K1, K2, K3: Életciklus- és scenárióalapú környezeti értékelési keretrendszer	73
3.7.1	Közös bemeneti paraméterek és életciklus-számítási alapok	74
3.7.2	K1: Ország–fogyasztás mátrix és EV/ICEV fajlagos összehasonlítás	76
3.7.3	K2: Akkumulátor-degradáció és akkumulátor-életciklus CO ₂	77
3.7.4	K3: Flotta-szintű V2G-kapacitás és kiváltott hálózati tárolás karbonlábnyoma	78
4.	Eredmények.....	80
4.1	G1: A BEV–ICEV TCO-elemzés eredményei	80
4.2	G2: Az elektromos autómegosztás gazdasági fenntarthatóságának eredményei	83
4.3	R1: Az elektromobilitási indikátorrendszer és klaszterezés eredményei az Európai Unióban	86
4.4	K1: EV-k használatából eredő CO ₂ -kibocsátás és a villamosenergia-mix összefüggései.....	88
4.5	R2: A V2G-technológia szerepe a regionális villamosenergia termelés–fogyasztás kiegyenlítésében	90
4.6	K2: A V2G-használat hatása a hasznos energiaciklusokra és az akkumulátor fajlagos életciklus-karbonlábnyomára	91
4.7	K3: A V2G felhasználása szektorszintű karbonmegtakarítási potenciálja	93
4.8	M1: Gazdasági, technológiai és viselkedésalapú ösztönzők hatása a V2G-flották hálózati integrációjára	95
5.	Diszkusszió és következtetések	99
5.1	Az eredmények szintézise és értelmezése	99
5.2	Elhelyezés a szakirodalomban.....	103
5.3	Kritikai elemzés és korlátok	106
5.4	Gyakorlati és szakpolitikai következmények	109
5.5	Jövőbeni kutatási irányok	111
6.	Összegzés	113
7.	Summary	118
8.	Szakirodalmi hivatkozások:.....	122
9.	Függelék:.....	145

1. Bevezetés

Az energiarendszerek gyors transzformációja, az elektromobilitás térnyerése új típusú műszaki és szabályozáspolitikai kihívásokat indukál. Ez a megállapítás fokozottan érvényes a korlátozott jövedelmi viszonyokkal rendelkező térségekre, melyekben az infrastruktúra fejletlenebb, az energiapolitikai irányvonalak pedig reaktív módon alakulnak. Az e-mobilitás egyik legdinamikusabban fejlődő területe a jármű-hálózat integráció (Vehicle-to-Grid, V2G), melynek keretében az akkumulátoros elektromos gépkocsik (Battery Electric Vehicle, BEV) energiatárolóként és visszatápláló egységként is üzemelnek a hálózatban. Bár a technológia műszaki érettsége bizonyított, alkalmazása jelentős földrajzi eltéréseket mutat, Közép-Európában pedig továbbra is marginális marad.

A közlekedési szektor átalakulása a műszaki fejlesztéseken túl a járműállomány rendszerbeágyazottságának radikális újraértelmezését is jelenti. Míg a belső égésű motorral hajtott modellek (Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV) klasszikusan zárt, autonóm energiafelhasználók („individuális entitások”), addig az elektromos változatok a hálózati kapcsolódás révén adat- és energiacserére alkalmas „konnektív aktorokká” válnak. Ez az átmenet a mobilitási eszközöket a szállítási funkció mellett energiamenedzsment-képességgel is felruházza, újrapozicionálva szerepüket a villamosenergia-struktúrákban. Disszertációm e logika mentén vizsgálja a V2G szerepét, a hangsúlyt a közép-európai alkalmazási lehetőségekre helyezve.

A dolgozat kiindulópontját a nemzetközi szakirodalom fókuszja képezi, miszerint a kutatások döntően a nyugat-európai és észak-amerikai kontextusokból indulnak ki. Ezekben a régiókban az elsődleges BEV-piacok dominálnak, a szabályozási környezet stabilabb, az energiarendszerek decentralizáltsága pedig előrehaladottabb. Ezzel szemben Közép-Európában – kiemelten Magyarországon – a szekunder piac a meghatározó, a hálózati struktúrák centralizáltabbak, az aggregátori és visszatáplálási rendszerek intézményi keretei pedig még kiforratlanok. Mindez régióspecifikus tényezőket vet fel, mely elemek külön vizsgálatot igényelnek.

A kutatási irányt egyfelől a régió energetikai átalakulásában megfigyelhető inkoherenciák, másfelől az innovációs ígéretek és a kereskedelmi realitások fennálló feszültsége inspirálta. Ezzel összhangban az értekezés célja annak bemutatása, mely gazdasági, társadalmi és szabályozáspolitikai kondíciók esetén válhat a V2G-megoldás életképes alternatívává Közép-Európában. A kutatás különös figyelmet fordít a teljes birtoklási költség (Total Cost of

Ownership, TCO) régióspecifikus alakulására, a scenárióalapú megtérülési viszonyokra, továbbá a szabályozási akadályok azonosítására.

A munka újdonsága a TCO-modellezés, a szabályozáselemzés és a scenárióvizsgálat integrálása egy közép-európai fókuszú, interdiszciplináris struktúrában. Az alkalmazott kvantitatív módszertan nem csupán új adatokat hasznosít, de széleskörű érzékenységvizsgálatot is kínál, ezáltal megalapozza az innováció gazdasági realizmusának régióspecifikus értelmezését. A vizsgálat relevanciáját tovább erősíti a tény, miszerint az Európai Unió dekarbonizációs stratégiái – mint a REPowerEU és a Fit for 55 – fokozott súlyt helyeznek a decentralizált energiamodellekre, melyeknek a V2G az egyik potenciális alapeleme lehet.

A kutatás alapvetően közép-európai fókuszú, az elemzett kérdések és az alkalmazott modellek azonban globális kihívásokat érintenek, így eredményeik más, hasonló fejlettségi régiókra is adaptálhatók. A BEV-ek hálózati integrációjának komplexitását számos nemzetközi pilot projekt és demonstrációs program tapasztalatai is alátámasztják, melyek értékes empirikus alapokat szolgáltatnak a V2G-rendszerek gazdasági, műszaki és társadalmi-viselkedésalapú ösztönzőinek vizsgálatához.

1.1 A kutatás indokltsága és célrendszere

A szakirodalom áttekintése rávilágított, hogy a V2G megítélése globálisan árnyalt és alapvetően jól dokumentált. A nemzetközi diskurzus számos aspektust tárgyal a hálózati integrációs potenciáltól a rugalmassági szolgáltatásig, különös tekintettel a fejlett műszaki és gazdasági adottságokkal rendelkező országokra. Ezzel szemben meglepő hiányosság mutatkozik azon tanulmányok terén, amelyek Közép-Európa sajátos kihívásait és lehetőségeit elemzik az adaptáció kapcsán.

A régió – Magyarországot is beleértve – nem csupán eltérő jövedelmi és infrastrukturális háttérrel, hanem különböző fogyasztói magatartásmintákkal és szabályozási ösztönzőkkel bír. Ez a kettős – makrogazdasági és mikroszintű viselkedési – eltolódás korlátozza a nemzetközi modellek alkalmazhatóságát. A korábbi kutatások elsősorban műszaki és energetikai szempontokra koncentrálnak. Csekély figyelem irányul ugyanakkor a régióspecifikus kereskedelmi racionalitás, a használatalapú költségstruktúra vagy a szabályozási rezsimelemzésére. Ez a tudományos hiányosság új vizsgálati irányt indokol, kijelölve a jelen értekezés fókuszát.

A munka középpontjában a V2G-technológia regionális alkalmazhatóságának és költséghatékonyságának empirikus feltárása áll. Ennek érdekében a kutatás kvantitatív, modellalapú TCO-elemzést végez, figyelembe véve a magyar gazdasági környezet sajátosságait. Az elemzés

ezenfelül másodlagos szakirodalmi és gazdasági adatokra támaszkodva rekonstruálja az adaptációt befolyásoló fogyasztói döntési mintázatokat és érzékenységeket. A dolgozat így nem elsődleges adatgyűjtésre, hanem a létező empirikus tapasztalatok kritikai szintézisére és régióspecifikus újraértelmezésére épül.

A kitűzött cél nem csupán a koncepció hazai és regionális kontextushoz illeszkedő értékelése. A dolgozat hozzájárulást kíván nyújtani a szakmai diskurzushoz, melyben a közép-európai adottságok nem hiányként, hanem aktív formáló erőként jelennek meg az elektromobilitás jövőjéről szóló vitákban. A megfogalmazott célok vizsgálatához többszintű módszertani struktúra képezi az elemzés alapját. A következő szakasz röviden bemutatja a kutatási megközelítéseket, az adatforrásokat és a számítási logikát.

1.2 Kutatási célok, kérdések és hipotézisek

A kutatás adatbázis-struktúrájának célja, hogy a BEV-ekhez és a V2G-technológiához kapcsolódó gazdasági, regionális és környezeti kérdések összehasonlítható, egységesen feldolgozott adatokra épüljenek. Az elemzés döntően a 2010 utáni időszakra, azon belül a modellezés időpontjában rendelkezésre álló legfrissebb EU27- és magyar adatsorokra támaszkodik. Ebben az alfejezetben azoknak az adatforrásoknak és indikátorcsoportoknak az áttekintése szerepel, amelyek a későbbi gazdasági, regionális és életciklus-elemzések közös alapját adják, különös tekintettel a közép-európai és magyar kontextusra. A kutatás főbb kérdéseit és téziseit foglalja össze az 1. táblázat. A további alfejezetekben és táblázatokban a kapcsolódó téziseket rövid betűkódok jelölik: a gazdasági fókuszú téziseket (G), a regionális összehasonlításra épülő téziseket (R), a környezeti/életciklus-szemléletű téziseket (K), valamint a multidiszciplináris megközelítésű tézist (M) jelöli.

Kód	Fókusz	Kutatási kérdés	Tézis lényege
G1	BEV TCO, futásteljesítmény, időtáv, magyar piac	Mikor kedvezőbb a BEV TCO-ja az ICEV-nél a magyar piacon?	Kellő futásteljesítménynél és időtávon a BEV-ek teljes birtoklási költsége alacsonyabb a belső égésűeknél.
G2	E-autómegosztás, kihasználtság, árképzés, közép-európai városok	Gazdaságosak-e az e-autómegosztó rendszerek Közép-Európában?	A jelenlegi árázással önmagában nem, a szolgáltatás fenntarthatósága csak nagyvállalati szintű beágyazottsággal biztosítható.
R1	E-mobilitási indikátorok, penetráció, infrastruktúra, energiamix (EU)	Értékelhetők-e az EU-tagállamok egységes indikátorok alapján?	Az EU-tagállamok fenntarthatósági dimenziók mentén jól elkülönülő, eltérő érettségű klaszterekre bonthatók.
R2	V2G, megújuló, csúcsterhelés, kiegyenlítés	Hogyan segíti a V2G a regionális energia kiegyenlítést?	A V2G rugalmas kapacitása mérsékli a csúcsterhelést és a kiegyenlítési igényt, javítva a megújuló-integrációt.
K1	Energiamix, életciklus-CO ₂ , indirekt emissziók	Mennyire határozza meg a mix a járművek CO ₂ -mérlegét?	Érdemi CO ₂ -csökkentéshez magas megújuló részarány kell; fosszilis dominanciánál az előnyök korlátozottak.
K2	V2G, akkudegradáció, ciklusszám, töltésmenedzsment	Növeli-e a V2G a hasznos ciklusokat élettartam-vesztés nélkül?	Megfelelő menedzsmenttel a V2G növeli a hasznos ciklusszámot, mérsékelt élettartam-rövidülés mellett.
K3	Energiarendszer-modell, rugalmasság, tárolóigény	Csökkenthető-e a dedikált tárolóigény V2G-vel?	A V2G részben kiváltja a dedikált hálózati tárolókat, csökkentve az akkumulátorigényt és a karbonlábnyomot.
M1	V2G-részvétel, ösztönzők, dinamikus árazás	Mely ösztönzők növelik a V2G-flották kihasználtságát?	Dinamikus árazás, fejlett töltésmenedzsment és viselkedésalapú ösztönzők kombinációja növeli a részvételt.

1. táblázat A disszertáció kutatási kérdései és tézisei – áttekintése Forrás: saját szerkesztés

G1 – A BEV-ek TCO-jának versenyképessége

G1 hipotézis: A BEV-ek TCO-ja meghatározott futásteljesítmény és használati időtáv felett a magyarországi – és tágabban a közép-európai – piacon gazdaságilag kedvezőbb alternatívát jelent a hasonló kategóriájú belső égésű motorral szerelt modellekkel (ICEV) szemben. A kedvezőbb pozíció elsősorban az alacsonyabb energia- és karbantartási kiadásoknak és a hatékonyabb üzemeltetési költségstruktúrának köszönhető.

G1 tézis: A disszertációban bemutatott modellezés és empirikus összehasonlító elemzés igazolja, miszerint a releváns használati tartományban – megfelelő futásteljesítmény és időtáv esetén – a BEV-ek TCO-ja tartósan kedvezőbb, mint a hasonló szegmensbe tartozó ICEV-eké a magyar gazdasági környezetben. A magasabb induló beszerzési ár hosszabb távon kompenzálódhat a kedvezőbb energiaárak, az alacsonyabb üzemanyag-ráfordítások, a kevesebb mozgó alkatrészből adódó szervizelőnyök és a felhasználói szokásokhoz illeszkedő üzemeltetés révén. Ez alátámasztja a technológia gazdasági versenyképességét, mely nem csupán szabályozói és támogatási kérdés, de jól körülírható paramétertartományban üzleti alapon is megalapozott.

G2 – Elektromos autómegosztó rendszerek gazdasági fenntarthatósága

G2 hipotézis: Az elektromos autómegosztó szolgáltatók (e-carsharing) a közép európai nagyvárosokban, kiemelten Budapesten V2G nélküli, tisztán mobilitási alapú üzleti modellje a jelenlegi ár- és kihasználtsági szintek mellett tartósan nem képes stabil és fenntartható operatív cash flow-t biztosítani. A működés jellemzően csoportháttérre, szinergiákra, támogatásokra és keresztfinanszírozásra támaszkodik. A V2G ugyanakkor megfelelő technológiai, piaci és szabályozási feltételek mellett kiegészítő bevételi és költségoptimalizációs csatornát nyithat, amely mérsékelheti a tartós veszteség kockázatát.

G2 tézis: Az e-carsharing szolgáltatók pénzügyi beszámolóinak elemzése és a hétéves diszkontált cash flow szimulációk alapján a szegmens a jelenlegi ár- és kihasználtsági paraméterek mellett önállóan, támogatások és csoportszintű szinergiák nélkül tartósan veszteségkockázatos. Ezt a magas fix költségszint, a flottaléptékből adódó tőkeigény és a kereslet volatilitása erősíti. A disszertáció eredményei szerint a V2G integráció szabályozott rugalmassági termékekbe való piaci belépéssel és optimalizált töltésmenedzsmenttel érdemben javíthatja az operatív cash flow profilt többletbevétel és energiaköltség csökkentés révén. Mindez csökkentheti a kizárólagos keresztfinanszírozási függést, ugyanakkor a társadalmi és környezeti hasznosság önmagában nem garantálja a versenyalapú gazdasági életképességet.

R1 – Fenntarthatósági klaszterek az EU elektromobilitási piacán

R1 hipotézis: Az elektromobilitás fenntarthatósági dimenziói – különösen a BEV-penetráció, a töltőinfrastruktúra sűrűsége és a villamosenergia-mix megújuló részaránya – segítségével az EU-tagállamok egységes indikátorrendszer segítségével jól körülhatárolható klaszterekbe sorolhatók. Ezek a csoportok eltérő fejlődési pályát, intézményi beágyazottságot és politikai beavatkozási szükségletet tükröznek.

R1 tézis: A dolgozatban alkalmazott indikátorrendszer és klaszterezés nyomán az EU-tagállamok a BEV-penetráció, a nyilvános töltőinfrastruktúra sűrűsége és a megújulók részarányának kombinációja mentén számos, jól elkülöníthető fenntarthatósági csoportba rendeződnek. A fejlettebb klaszterekben a magas BEV-arány szorosan együtt jár a sűrű töltőhálózattal és a dekarbonizált energiamixszel, míg a lemaradónál mindhárom dimenzióban elmaradás tapasztalható. A klaszterek azonosítása megalapozza a differenciált közlekedés- és energiapolitikai beavatkozásokat, és rámutat arra, miszerint a műszaki, infrastrukturális és szabályozói kondíciók együttesen határozzák meg az elektromobilitás érettségét.

R2 – A V2G szerepe a regionális termelés–fogyasztás kiegyenlítésében

R2 hipotézis: Azokban a közép-európai régiókban, melyekben a megújuló energiaforrások részaránya nő, a termelés és fogyasztás térbeli és időbeli eloszlása pedig egyre inkább szétválik, a V2G-technológia – megfelelő szabályozói és kereskedelmi környezet esetén – szignifikánsan alkalmas a hálózati terhelés ingadozásainak és a kiegyenlítési kiadásoknak a csökkentésére.

R2 tézis: A régióspecifikus energetikai modellezés és hálózati szcenárióelemzés rámutat arra, hogy a közép-európai térségekben a V2G-kompatibilis BEV-flották rugalmas energiatárolóként való bevonása érzékelhetően mérsékli a csúcsidőszaki terhelést, csökkenti a kiegyenlítő energia iránti igényt, és hozzájárul a megújuló termelés nagyobb arányú rendszerintegrációjához. A technológia nem csupán lokális kiegyenlítő szerepet tölt be, ugyanis régiós léptékben is alkalmas a termelés–fogyasztás időbeli és területi eltéréseiből fakadó strukturális feszültségek mérséklésére.

K1 – Az energiamix szerepe a BEV-ek életciklus-CO₂ mérlegében

K1 hipotézis: A BEV-ek használatából eredő tényleges szén-dioxid-kibocsátás jelentős mértékben függ a nemzeti villamosenergia-mix megújuló részarányától. A túlnyomórészt fosszilis forrásokra épülő termeléssel rendelkező országokban az elektromobilitás életciklus-szemléletű CO₂-mérlege kizárólag korlátozott mértékben javul a hagyományos belső égésű motoros modellekkel szemben, szélsőséges esetben akár romlást is mutathat.

K1 tézis: Az EU-tagállamok viszonylatában végzett összehasonlító életciklus-elemzés rávilágít a BEV-ek környezeti előnye és a nemzeti energiamix dekarbonizáltsága közötti szoros összefüggésre. A magas megújuló részarányú államokban az elektromos közlekedés a teljes körű életciklusra vetítve érdemi CO₂-csökkentést biztosít. Ezzel szemben a magas fosszilis kitettségű termelői mixszel rendelkező országokban az

indirekt emissziók nagymértékben lerontják a BEV-ek környezeti mérlegét. A töltési energiaforrások dekarbonizációja így nem csupán kiegészítő feltétel, hanem a fenntarthatóság alapköve.

K2 – Akkumulátor-degradáció és energiaciklus-kihasználtság V2G-alkalmazás mellett

K2 hipotézis: A V2G alkalmazása – megfelelő töltésmenedzsment és üzemeltetési paraméterek esetén – növeli a BEV-akkumulátorok hasznos energiaciklus-kihasználtságát azok teljes körű élettartamának szignifikáns csökkenése nélkül. A kétirányú áramlásban részt vevő energiatárolók többletterhelése kontrollált üzemi körülmények között nem eredményez aránytalan degradációt.

K2 tézis: A mikroszintű szimulációk és degradációs modellek eredményei igazolják a V2G-be bevont akkumulátorok – meghatározott töltési–kisütési mélység, hőmérséklet-tartomány és operatív profil fennállásakor realizálható – növelt számú hasznos energiaciklusát a teljes körű élettartamra vetítve, mérsékelt élettartam-rövidülés mellett. A technológia így hozzájárul az adott kapacitásra jutó energiaszolgáltatás mennyiségének növekedéséhez. Ez a hatás javítja az egységek életciklus-hatékonyágát és mérsékli az egységnyi energiamennyiségre eső környezeti terhelést.

K3 – A V2G makroszintű karbonlábnyom-csökkentő potenciálja

K3 hipotézis: A V2G-kompatibilis BEV-flották széles körű elterjedése hálózati szinten csökkenti a dedikált energiatároló-igényt, ezáltal mérsékli az energiaszektor akkumulátorszükségletét és az ahhoz kapcsolódó összesített karbonlábnyomot.

K3 tézis: A makroszintű energetikai modellezés eredményei rámutatnak a V2G-kompatibilis BEV-flották hálózati rugalmassági szolgáltatásokba – kiemelten a csúcsvágás, a frekvenciaszabályozás és a megújuló termelés kiegyenlítése terén – történő aktív bevonásának dedikált tárolókapacitásokat részlegesen kiváltó potenciáljára. Ez a folyamat a hálózati szinten igényelt akkumulátormennyiség csökkentése révén mérsékli a gyártáshoz kapcsolódó karbonlábnyomot, és hozzájárul az energiatranszformáció egészének fenntarthatóbbá tételéhez.

M1 – Gazdasági, technológiai és viselkedésalapú ösztönzők a V2G-flották hálózati integrációjára

M1 hipotézis: A szakirodalom és a nemzetközi pilotprojektek tapasztalatai nyomán azonosíthatók a V2G-kompatibilis BEV-ek hálózati kihasználtságát számottevően növelni képes gazdasági, műszaki és viselkedésalapú ösztönzők. A részvétel mértéke nem csupán a műszaki adottságoctól, hanem a felhasználók döntési mechanizmusait célzottan befolyásoló ösztönzőstruktúrától is függ.

M1 tézis: A vizsgálat igazolja a dinamikus árazás, a felhasználóbarát töltésmenedzsment-platformok és a viselkedésalapú ösztönzők – például az automatikus töltési optimalizáció, a pénzügyi bónuszok és a reputációs visszajelzések – kombinációjának a V2G-kompatibilis flották aktív részvételét ösztönző hatását a hálózati energiaszolgáltatásokban. A kihasználtság fenntartható kiterjesztése nem kizárólag műszaki fejlesztéseken múlik. Kulcstényező a gazdasági és viselkedésalapú ösztönzők koherens, a felhasználói motivációkat és kockázatterzékelést figyelembe vevő struktúrában történő kialakítása. Ez teremti meg a BEV-flották energetikai infrastruktúrába történő, hosszú távon gazdaságilag és környezetileg is fenntartható integrációjának feltételeit.

2. Szakirodalmi áttekintés

Az elemzés kezdeti szakasza a BEV-flotta energetikai integrációjára fókuszál. Kiemeli a keresleti oldal időbeli sűrűsödését, a vételezési viselkedés determinánsait és az infrastruktúra korlátaiból fakadó költségeket. A továbbiakban a kétirányú energiaáramlásra épülő V2G-technológia műszaki és elméleti alapjait tárgyalja a fejezet. A vizsgálat kiterjed az aggregáció funkciójára, a rugalmassági megoldások tipológiájára és a szabályozási-elszámolási kondíciók jelentőségére. A területi különbségek értelmezési kereteit és mérhetőségét bemutató részekben hangsúlyt kap a villamosenergia-mix, a hálózati struktúra és a töltőpontok fejlettsége. Ezen strukturális tényezők a műszaki hatások összevethetőségét befolyásoló változók. A fejezet zárásaként az elemzés az akkumulátorok életciklus-szemléletű környezeti teljesítményét és a szekunder felhasználásra épülő hálózati kihatásokat vizsgálja. Utóbbiak a V2G fenntarthatósági potenciáljának értelmezéséhez elengedhetetlen aspektusok.

2.1 BEV-ek és energiarendszerek kapcsolata

A közlekedés villamosítása és a BEV technológia exponenciális terjedése az energetikai rendszerekben fundamentális változásokat indít el. Ez a folyamat kettős természetű: a BEV-flotta egyszerre jelenik meg a hálózatban új, időben és térben erősen koncentrált keresleti sokként, ugyanakkor – megfelelő technológiai és szabályozási feltételek mellett – egy új típusú, elosztott és gyors reagálású rugalmassági erőforrásként is értelmezhető (Malya és mtsai., 2021; Nespoli és mtsai., 2023a; Ravi & Aziz, 2022; Sarsia és mtsai., 2023; Sultan és mtsai., 2022). A BEV-flották növekedését az akkumulátorárak csökkenése, az energiahatékonyság javulása és a szigorodó környezetvédelmi szabályozás együttesen gyorsítja, ami a villamosenergia-architektúrákban is új alkalmazkodási kényszereket

hoz létre (Al-Ghaili és mtsai., 2022; Darani és mtsai., 2021; Giannelos és mtsai., 2024; Malya és mtsai., 2021; Naidu és mtsai., 2024). A rendszerszintű hatások megértését segíti ezt követően a technológiai alapok áttekintése.

2.1.1 Az elektromos hajtás és energiaigény hálózati összefüggései

A BEV-ek által generált hálózati hatások elemzésekor az elsődleges kockázati tényező a csúcsidei egyidejűség (simultaneity factor). A koordinálatlan töltési események hajlamosak a meglévő lakossági vagy ipari csúcsidekkel egybeesni, ami drasztikusan növelheti a terhelési maximumokat. Ez a jelenség a hálózati infrastruktúra szempontjából kritikus, mivel a villamosenergia-rendszerek kapacitásait (vezeték-keresztmetszetek, transzformátorok névleges teljesítménye) a csúcsterhelésekre, nem pedig az átlagfogyasztásra méretezik. Következésképpen a hálózati korlátok és a szükséges beruházási ráfordítások nem lineárisan követik az éves fogyasztásbővülést, hanem ugrásszerűen jelentkeznek a szűk keresztmetszetek elérésekor (Ahsan és mtsai., 2023; Alanazi, 2023; Amamra & Marco, 2019; Christensen és mtsai., 2021; Manso-Burgos és mtsai., 2021).

Az említett folyamatok két, egymással összefüggő, de eltérő beavatkozási logikát jelölnek ki. Az elosztóhálózati engedélyes (Distribution System Operator, DSO) szintjén a feladat tipikusan földrajzilag kötött és eszközszintű. A probléma adott transzformátorkörzetek, illetve betáplálási pontok korlátai mentén jelentkezik, így a fókusz a lokális csúcsterhelések mérséklése és a feszültségminőség fenntartása. Az átviteli rendszerirányító (Transmission System Operator, TSO) vonatkozásában ezzel szemben a hangsúly az időskálán és a szabályozhatóságon van. A terhelések aggregált dinamikája és előrejelezhetősége nyer relevanciát, leginkább a vételezési igények és a megújuló termelés ingadozásának találkozásakor.

Ez a kettősség indokolja a BEV-flotta kockázati tényezőként és potenciális rugalmassági erőforrásként történő egyidejű értelmezését. Ugyanaz a töltési viselkedés kedvezőtlen időzítés esetén csúcsterhelést és költségnövekedést okoz, megfelelő koordinációval azonban a terhelésáthelyezés és csúcsvágás eszközévé válhat. E megkülönböztetés közvetlenül megalapozza az egyirányú vezérelt töltés (Unidirectional Smart Charging, V1G) és a kétirányú működés (V2G) hálózati racionalitását. A V1G logikája, miszerint az időbeli koncentráció csökkentésével a fogyasztás hálózati „illeszkedése” javítható. A V2G ennél tovább lép: a modellek nem kizárólag a csúcsok elkerülésére, de – megfelelő környezetben – aktív rugalmassági funkciók nyújtására is bevonhatók. A szabályozhatóság gyakorlati korlátait az akkumulátor, a fedélzeti egység és az akkumulátor-

felügyeleti rendszer (Battery Management System, BMS) együttese jelöli ki. A következő alfejezet az utóbbiak műszaki és üzemeltetési kereteit tárgyalja.

2.1.2 Az akkumulátortechnológia fejlődése és a rendszerintegráció

A BEV-ek hálózati integrálhatóságát és a V2G gyakorlati alkalmazhatóságát alapvetően az innovációk és a fedélzeti teljesítményelektronika érettsége alapozta meg. A cella-, modul- és csomagfejlesztések, a hőmenedzsment, és a nagyobb töltési és kisütési teljesítmények kezelhetősége közvetlenül meghatározza az eszköz rugalmas energiatárolóként való viselkedésének mértékét. V2G-üzemben kulcskérdés a többletciklizálás akkumulátordegradációra gyakorolt hatása. Azonosítani szükséges továbbá azon üzemeltetési stratégiákat, melyek alkalmasak a rugalmasság oly módon történő biztosítására, melyben az élettartam-csökkenés kontrollált tartományban marad.

A kétirányú energiaáramlás feltétele azonban nem korlátozódik az akkumulátorra. Az elvárások a hajtáslánc és a teljesítményelektronika oldalán is keresendők. Alapvető követelmény a típus és a töltőinfrastruktúra visszatáplálást támogató architektúra és védelem biztosítására, és a szükséges adatkapcsolat megbízható működtetésére vonatkozó alkalmassága. Hálózati szinten ez azért lényeges, mert az autó így a pusztán fogyasztói szerep mellett szabályozható teljesítményként is definiálható. Ez a tényező a kétirányú megoldásokat a gyakorlatban jellemzően az aggregált operatív konstrukciók felé tereli.

A hálózati funkciók teljesíthetősége a fedélzeti energiamedzsment és az integráció „üzemi logikája” felől is vizsgálendő. A csúcsterhelés-csökkentés, a kiegyenlítés és a tartalékjellegű rugalmasság tipikusan az egyedi egységek stabil viselkedése helyett a flotta összehangolt vezérlésén múlik. Ennek előfeltétele a hiteles mérés–kommunikáció–vezérlés lánc és egy specifikus szabályozási-elszámolási környezet. Utóbbi a mobilitási rendelkezésre állás és az energiaszolgáltatási célok között kiszámítható ösztönzőket és korlátokat definiál. Jelen fejezet ezen a ponton a keret rögzítésére fókuszál. A konkrét vezérlési algoritmusok és optimalizálási megközelítések részletezése a későbbi műszaki és módszertani részekben kap helyet (Alfaverh és mtsai., 2023; Briguglio & Formosa, 2023; Fu és mtsai., 2022; Ghatikar & Alam, 2023; Luo és mtsai., 2022).

A V2G szempontjából az akkumulátor-élettartam nem izolált műszaki kérdés, tekintve közvetlen hatását a szolgáltatható rugalmasság mennyiségére és költségére. A BMS által engedett töltöttségi ablak, a hőmérsékleti korlátok és a megengedett C-ráta határozza meg egy adott modell aktiválhatóságának időtartamát és teljesítményszintjét. Amennyiben

a rugalmassági szolgáltatás miatti többletciklizálás a várható degradációt szignifikánsan növeli, az a tulajdonosi ösztönzők révén visszahat a rendelkezésre állásra, így az aggregációs szinten „értékesíthető” kapacításra is. E logika miatt a műszaki érettség és az üzemeltetési/elszámolási keretek kizárólag együttesen értelmezhetők.

2.1.3 A decentralizált, rugalmas hálózat és az EV-k szerepe

A villamosenergia-szektor transzformációjának domináns iránya a decentralizáció és a digitalizáció. A diszperz termelők, tárolók és rugalmas fogyasztók integrációja az üzemvitelt adat- és szabályozásintenzív mechanizmussá formálja. Ebben a kontextusban az intelligens hálózati megközelítések alapja a kétirányú energia- és adatcsere, a valós idejű állapotfelügyelet, továbbá a keresletoldali menedzsment eszköztára. Utóbbi a terhelések időzítését és mértékét optimalizálási szempontokhoz igazítja (Aggarwal és mtsai., 2021; I. Ahmed és mtsai., 2023; Bhundar és mtsai., 2023; Gonzalez Venegas és mtsai., 2020; X. Liu, 2020). A BEV-flotta ebben a rendszerben mobil kapacitást képvisel. Ez az állomány aggregált formában számos rugalmassági funkcióhoz is illeszthető a mérés–elszámolás–szabályozás koherens kereteinek megléte esetén.

A járműállomány infrastrukturális szerepe azon esetekben lép elő relevánssá, ha a flexibilitás elméleti kapacitás helyett mérhetően aktiválható termékként realizálódik. Ennek előfeltétele a lokális technikai korlátok (kiemelten feszültség- és terhelhetőségi határértékek) és a makroszintű célok összehangolt kezelése. Utóbbiak közé tartozik a csúcsterhelések mérséklése és a megújuló termeléshez illesztett terhelésátrendezés. A folyamat a mérés–adatcsere–vezérlés lánc minőségét és az elszámolási keretek stabilitását egyaránt kritikus tényezővé emeli. Ebből adódóan a V2G a pusztán kétirányú áramlási mechanizmus mellett integrált üzemviteli képességként definiálható. A szabályozhatóság, az auditálhatóság és a rendelkezésre állás együttesen határozza meg a ténylegesen mozgósítható potenciált. A valós rendszerszintű haszon ugyanakkor kontextusfüggő. Eltérő célfüggvények érvényesek az elosztói korlátkezelésben és a központi kiegyenlítésben. Ez a kettősség a V2G-t többszintű üzemviteli és szabályozási térben definiálható megoldássá emeli (Aggarwal és mtsai., 2021; Gonzalez Venegas és mtsai., 2020; D. Liu és mtsai., 2021).

2.2 A V2G-technológia műszaki és rendszerelméleti alapjai

A V2G alkalmazása hálózati szinten a megújuló termelés ingadozásának kezelése, a stabilitás fenntartása és a rugalmasság növelése szempontjából releváns. A megoldás a töltési terhelések időbeli átrendezésén és a visszatáplálási képességek révén alkalmas az üzemeltetés mozgásterének

bővítésére (Amamra & Marco, 2019; Huang és mtsai., 2020; H. Liu és mtsai., 2019; Luo és mtsai., 2022; Nespoli és mtsai., 2023a). Rendszerelméleti megközelítésben a V2G lényege a BEV-állomány aggregáció révén történő szervezése. Ez a szabályozható portfólió különböző hálózati szolgáltatásokhoz illeszthető, például szabályozási és tartalékjellegű rugalmassághoz, terhelésmenedzsmenthez vagy lokális korlátkezeléshez. Ennek következményeként a releváns kutatási kérdés az egyedi eszköz „képessége” helyett a flottaszintű vezérlés, az elszámolási és ösztönzési kondíciók, és a valós idejű optimalizáció és stabilitás kapcsolatára fókuszál (Barone és mtsai., 2020; Icaza és mtsai., 2023; Karolemeas és mtsai., 2024; Schwerdt és mtsai., 2019; S. Yu & Park, 2024).

2.2.1 A kétirányú energiaáramlás technikai feltételei

A visszatáplálás gyakorlati megvalósítása és a teljes körű energialánc stabilitása összetett, integrált műszaki környezetet követel meg. A sikeres implementáció kulcseleme a kétirányú töltést támogató teljesítményelektronika és védelmi architektúra, a BEV-akkumulátor felügyeletét ellátó BMS üzembiztonsága, továbbá a szabványosított interfészekkel rendelkező, hiteles elszámolási és valós idejű kommunikációs infrastruktúra (Qin és mtsai., 2020; Saha és mtsai., 2022; Schwerdt és mtsai., 2019; Sehimi és mtsai., 2023; S. Yu & Park, 2024). A szakirodalom egyöntetű álláspontja szerint e komponensek koherens integrációja nélkül a V2G-funkció nem bővíthető kiterjedt, üzembiztos hálózati szolgáltatássá, legfeljebb lokális demonstrációként azonosítható (Boudmen és mtsai., 2024; Malakhatka és mtsai., 2024; Malya és mtsai., 2021; Ritter & Schanz, 2021; W. Wang és mtsai., 2023). A teljesítményelektronikai megoldások szemléletében a két domináns architektúra az AC-V2G és a DC-V2G. E megoldások eltérő felelősségmegosztást és szabályozási rugalmasságot kínálnak. AC-V2G esetén a modellbe épített inverter és a fedélzeti töltőegység végzi a szinkronizálást és a visszatáplálást. Ezzel szemben DC-V2G-nél a külső töltőberendezés vállal nagyobb szerepet a hálózati előírások szerinti szabályozásban. Utóbbi sok esetben gyorsabb reakciót tesz lehetővé, azonban eltérő interoperabilitási és költségprofilokkal jár. A frekvenciaszabályozási és feszültségtámogatási funkciók hasznosíthatóságát a konvertertopológia, a szabályozási algoritmusok és a csatlakozási követelményekhez illesztett védelem, továbbá a teljesítményminőség (például harmonikusok, meddő teljesítmény) közösen határozza meg (Arandhakar és mtsai., 2022; Sehimi és mtsai., 2023; Saha és mtsai., 2022; Schwenk és mtsai., 2021; Qin és mtsai., 2020).

Az üzembiztonság másik pillére a BMS és a töltés/kisütés menedzsmentjének precizitása. A szolgáltatásnyújtás során a BEV-oldali

állapotváltozók (töltöttségi szint, hőmérséklet, cellaeegyensúly, degradációs állapot) közvetlenül befolyásolják a rendelkezésre bocsátható rugalmassági kapacitást és annak időbeli korlátait. A kontrollszintek összehangolása – a cellaszintű biztonsági határfeltételektől a kereskedelmi szemléletű aggregált diszpécselésig – kiemelten kritikus a nagy ciklusszámú, gyakori fel- és leszállást igénylő feladatoknál. E folyamatoknál a megbízhatóság és az élettartam viszonylatában fellépő kompromisszum kezelése determináló (Gonzalez Venegas és mtsai., 2020; Tomczewski és mtsai., 2023; Adegbohun és mtsai., 2024).

A széleskörű alkalmazhatóság egyik leggyakoribb technikai korlátja az interoperabilitás. A BEV, a töltő, az aggregátori platform és a hálózati irányítás viszonylatában fellépő együttműködés heterogén gyártói ökoszisztémában kizárólag szabványosított kommunikációs és azonosítási folyamatok mentén tartható fenn. A kutatások és a pilotprogramok nyomán látható, hogy a kompatibilitás javítása közvetlenül kihat a szolgáltatható rugalmasság volumenére és költséghatékonyságára. A szabványosított kommunikáció és az egységesített eszközkezelés a rendszerköltségeket is markánsan mérsékelheti. Ezzel az összefüggéssel a BEV–töltő kommunikáció, a töltő–backend összeköttetés és az elszámolási folyamatok egységesítése egyszerre jelenik meg műszaki és kereskedelmi belépési követelményként (Benysek és mtsai., 2022; Dorokhova és mtsai., 2021; Giannelos és mtsai., 2024; Q. Ma és mtsai., 2021; Neaimh & Andersen, 2020; Sultan és mtsai., 2022). A digitális és üzemviteli előfeltételek szintjén a V2G ipari méretű szolgáltatássá válása a megbízható informatikai és szabályozási infrastruktúra meglétéen múlik. Ez a háttér valós időben, megfelelő rendelkezésre állással és kiberbiztonsági védelemmel támogatja a flottaszintű optimalizációt. Az elszámolhatóság és auditálhatóság érdekében a hiteles mérés, az adatátviteli megbízhatóság és a vezérlési parancsok pontos végrehajthatósága egyaránt kulcstényező. Ez kiemelten igaz a frekvenciatartási és egyéb gyors dinamikájú rugalmassági termékek bevezetésekor. A szakirodalom rámutat a következő tényre: a V2G-üzemvitel stabilitása nem redukálható a töltő és a BEV műszaki kompatibilitására. Az adatkezelést és diszpécselést végző háttérrendszerek minősége ugyanilyen mértékben befolyásolja a szolgáltatás minőségét (M. Ahmed és mtsai., 2021; S. Cai & Matsushashi, 2021; T. Liu és mtsai., 2023; Taghizadeh és mtsai., 2020; Ustun és mtsai., 2019). A pilotprojektek tapasztalatai igazolják a technikai kondíciók önmagában vett elégtelenségét a tartós üzem garantálásához. A V2G működése valós környezetben a felhasználói rendelkezésre állás, a töltési szokások, és a flottaszintű aggregáció, továbbá a diszpécselés összehangolásán múlik. Az eddigi kísérletek rávilágítanak a tényre, miszerint a minőség és a rendszerszintű bővíthetőség gyakran az integráció „finom” rétegeiben dől el. A

szabványértelmezések eltérései, a firmware-verziók kompatibilitása, a mérési protokollok különbségei és a hibakezelési logikák egységessége a szolgáltatás folytonosságát közvetlenül befolyásolja (Andersen és mtsai., 2019, 2019; Bach Andersen és mtsai., 2019; Bañol Arias és mtsai., 2020; Høj és mtsai., 2018).

A technikai feltételrendszer többkomponensű, egymásra épülő integrációs láncként írható le. A teljesítményelektronika teremti meg a fizikai visszatáplálás lehetőségét. A BMS és a töltés–kisütés menedzsment biztosítja az akkumulátoroldali üzembiztonságot. A hiteles mérés szolgálja a kereskedelmi értékesítés alapját. A szabványosított kommunikáció pedig a tömeges integrációt támogatja. E komponensek együttese indokolja a V2G szakirodalmi megközelítését. A kutatások a technológiát tipikusan „eszközfunkció” helyett integrált rendszerképességként kezelik (Icaza és mtsai., 2023; Saha és mtsai., 2022; Schwerdt és mtsai., 2019; Sehimí és mtsai., 2023; S. Yu & Park, 2024).

2.2.2 Rendszerszintű szolgáltatásai és aggregációs modellek

A rendszerszintű integrációban az aggregátor szerepe meghatározó. A koordináció képes a BEV-ek egyedi, sztochasztikus rendelkezésre állását olyan szabályozható portfólióvá szervezni, amely különböző termékekhez illeszthető. A rugalmasság ebben a struktúrában mérhető paraméterekkel írható le. Ilyen mutató a rendelkezésre bocsátható teljesítmény (kW), az energiamennyiség (kWh), a reakcióidő, a rendelkezésre állás valószínűsége, továbbá a teljesítés időtartama és ismételhetősége. Az aggregátor feladata e mutatók szerződéses terméké formálása. A portfólióképzés, a diszpécseles, a mérés–elszámolás és a kockázatkezelés együttesen határozza meg a névleges kapacitás ténylegesen értékesíthető részarányát.

Ebben a kontextusban a funkciók számos szinten értelmezhetők. Elsőként az energiaprofil-átalakítás azonosítható. Ez a terület magában foglalja a terhelésáthelyezést és a csúcsvágást. Másrészt, megjelenik a lokális hálózati stabilitás támogatása is. Ide sorolható a feszültség szabályozás és a meddőteljesítmény-menedzsment. Harmadrészt, a technológia kereskedelmi alapú rendszerszintű szolgáltatásként is hasznosul. Ez a szint a frekvenciatartalékok és a kiegyenlítő kapacitások piacán történő részvételt jelenti. A gyakorlati működtethetőséget a fejlett mérési infrastruktúra (Advanced Metering Infrastructure, AMI) és a felügyeleti irányító rendszerek (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) együttese szavatolja, auditálható módon. Ez a feltétel kiemelten fontos a heterogén eszközparkok fennállásakor (H. Liu és mtsai., 2019; Malya és mtsai., 2021; Tan és mtsai., 2018; Xu és mtsai., 2023; S. Yu & Park, 2024).

Az üzemeltetés szempontjából a V2G-aggregáció stabilitását a vezérlés alkalmazkodóképessége határozza meg. A rendszernek, az időablakokon túl, a hálózati állapotokhoz, a kereskedelmi jelzésekhez és a BMS korlátaihoz is igazodnia kell. A demonstrációs programok tanulságai nyomán kritikus tényező a döntések transzparenciája, a visszamérhetőség és a hibakezelés. Számos projekt igazolta a skálázás elsődleges korlátjainak eredőjét valós környezetben. A nehézségek az integráció finom rétegeiben rejlenek, így a protokoll-implementációból, az eszközkompatibilitásból és az adatminőségből fakadnak (Andersen és mtsai., 2019; Bañol Arias és mtsai., 2020; Høj és mtsai., 2018; Huber és mtsai., 2021; Jones és mtsai., 2021). A funkciók célszerűen az átviteli rendszerirányító (TSO) és az elosztóhálózati engedélyes (DSO) igényeinek metszetében értelmezhetők. TSO-oldalon a BEV-flotta jellemzően gyors dinamikájú tartalék- és szabályozási termékekhez kapcsolódhat. Ebbe a körbe tartozik a frekvenciatartási tartalék (Frequency Containment Reserve, FCR) és a frekvenciahelyreállítási tartalék (Frequency Restoration Reserve, FRR). DSO-szinten, ezzel szemben, a helyi feszültségprofilok, torlódások és kapacitáskorlátok kezelése kerül előtérbe. Ebből a kettősségből következik a V2G összetett jellege. A technológia egyetlen „termék” helyett többféle szolgáltatáscsalád támogatására alkalmas (Barone és mtsai., 2020; Huang és mtsai., 2020; Icaza és mtsai., 2023; Karolemeas és mtsai., 2024; Nespoli és mtsai., 2023a). A szolgáltatási portfólió gyakorlati felépítésében meghatározó a bevételhalmozás (Revenue Stacking, RS) logikája. Ugyanazon flotta – időben és teljesítményben megfelelően korlátozva – számos kereskedelmi és hálózati feladatot is teljesíthet. Erre példa a csúcsvágás (Peak Shaving, PS) és a terhelésáthelyezés (Load Shifting, LS) tartalékjellegű rugalmassággal történő kombinálása. A megvalósíthatóság azonban erősen függ a baseline-képzés, a rendelkezésre állás és a teljesítés-ellenőrzés módszertanától. A referenciaprofil pontatlansága és az adatminőségi bizonytalanság közvetlenül növeli a nemteljesítés és a pénzügyi szankciók kockázatát. E ponton a baseline-képzés pusztán módszertani részlet helyett a bevételbiztonság kulcstényezőjeként jelenik meg. A referenciaprofilok torzulása és az adatingadozás növeli a szolgáltatás „büntetékockázatát”. Ez a tényező a nettó RS-eredményt a várható bruttó bevételeknél erősebben ronthatja. A szakirodalom következőképpen a V2G gazdasági életképességét az elméleti maximális kapacitás helyett a valós aktíválhatóság és a szerződéses teljesítési kockázat együtteséből vezeti le (Benysek és mtsai., 2022; S. Cai & Matsushita, 2021; Dorokhova és mtsai., 2021; Neaimah & Andersen, 2020; Taghizadeh és mtsai., 2020). Az aggregációs modellek technikai oldalról három fő architektúrára bonthatók. A centralizált aggregáció (centralized aggregation, CA) esetén a központi optimalizáló közvetlenül vezérli a BEV-

ket, míg a hierarchikus aggregáció (hierarchical aggregation, HA) tipikusan területi, DSO-zónákhoz illeszkedő alaggregátorokat alkalmaz. Ezzel párhuzamosan az elosztott koordináció (distributed coordination, DC) modelljében a döntések helyi szinten születnek, a központ pedig csupán célfüggvényeket közvetít. A modellválasztást a kommunikációs késleltetés, a kiberbiztonság, a helyi korlátok reprezentálhatósága és a felelősségmegosztás alakítja (Alfaverh és mtsai., 2023; Briguglio & Formosa, 2023; Fu és mtsai., 2022; Luo és mtsai., 2022; Schwerdt és mtsai., 2019). A végrehajtási láncban a szabványosított adatcsere és az interoperabilitás a műszaki feltételek mellett üzleti előfeltételként is funkcionál. A BEV-töltő kapcsolatban a jármű-hálózat kommunikációs szabvány (Vehicle-to-Grid Communication Interface, ISO 15118), a töltőoldali backend kapcsolatokban pedig a nyílt töltőpont-protokoll (Open Charge Point Protocol, OCPP) biztosít közös „nyelvet”. E szabványok hiányában a heterogén eszközpark flottaszintű vezérlése és auditálható elszámolása nehezen kivitelezhető (International Electrotechnical Commission, 2024; International Organization for Standardization, 2014, 2022; Open Charge Alliance, 2025). A gyakorlatban azonban a szabványok implementációs különbségei a szolgáltatásminőség szórásában mutatkoznak meg. Ilyen eltérést okozhatnak a verziók, az opcionális mezők és a gyártóspecifikus kiterjesztések egyaránt. A pilóták visszatérő tanulsága megerősíti az aggregátor valós üzemi kockázatainak integrációs és adatminőségi eredetét (M. Ahmed és mtsai., 2021; Giannelos és mtsai., 2024; T. Liu és mtsai., 2023; Q. Ma és mtsai., 2021; Ustun és mtsai., 2019). A demonstrációs programok közül számos projekt kifejezetten az aggregáció és a valós idejű vezérlés rendszerszintű működőképességét vizsgálta. A vezérlési platformok és a prediktív optimalizáció gyakorlati korlátait – mint azt a VIGIL és az Electrific projektek, valamint az utrechti demonstráció igazolta – a későbbi kísérleti programokat a pilótaprojekteket elemző fejezet tárgyalja részletesen.

Közép-európai kontextusban a fenti mechanizmusok jelentősége felerősödik. A kereskedelmi termékhozzáférés, az aggregátori ökoszisztéma érettsége és az elszámolási-mérési infrastruktúra heterogenitása gyakran szűkíti a valós aktiválhatóságot. A modellezésben a névleges kapacitások helyett következképpen indokolt a teljesítési kockázattal korrigált rugalmasságot tekinteni releváns inputnak. Ez a megközelítés közvetlenül megalapozza a disszertáció későbbi fejezeteiben tárgyalt gazdasági és ösztönzési kérdéseket. A V2G régióspecifikus életképessége a technikai lehetőség és a szerződéses-kereskedelmi operacionalizálhatóság metszetében dől el (M. Ahmed és mtsai., 2021; S. Cai & Matsuhashi, 2021; Neaimeh & Andersen, 2020; Taghizadeh és mtsai., 2020; Ustun és mtsai., 2019)

A V2G rendszerszintű szolgáltatásai és aggregációs modelljei többrétegű keretet alkotnak. Ezen a szinten a technikai vezérlés, a mérés–elszámolás, a szabványosított interoperabilitás és a kereskedelmi termékspecifikációk közösen határozzák meg a ténylegesen aktiválható rugalmasságot. A következő alfejezet emiatt a portfólió gyakorlati alkalmazhatóságának rugalmassági tipológiáit és elszámolási-szabályozási megoldásait vizsgálja. Az elemzésben kiemelt figyelmet kapnak a közép-európai alkalmazás specifikus korlátai.

2.2.3 A pilotprojektek fő tanulságai és technológiai érettsége

A BEV-k energiatárolási kapacitásának bővülése a villamosenergia-rendszerek digitalizációjának és a vezérelt rugalmasság piacodosásának kontextusában értelmezhető. Ebben a megközelítésben az eszközök a puszta terhelési szerepkörön túlmutatva mérhetően aktiválható, időben szabályozható erőforrásként azonosíthatók. Ez a funkció a rendszerstabilitás és a rugalmassági tartalékok oldalán is értéket képvisel (Darani és mtsai., 2021; Z. Ma és mtsai., 2021; Neaimeh & Andersen, 2020; Shipman és mtsai., 2019; Sultan és mtsai., 2022). A technológiai érettség értékelése következésképpen a demonstrációs projektek tapasztalatai felől közelíthető meg. Utóbbiak egyszerre adnak visszajelzést a technikai működőképességről, az integrációs kockázatokról és a szolgáltatható rugalmasság valós nagyságrendjéről.

A rendszerszintű integráció gyakorlati megvalósítását és validálását számos országban pilotok segítették. Ezek a programok tipikusan terepi tapasztalatot nyújtanak a töltési profilok és a hálózati hatások méréséhez. Támogatják továbbá a kétirányú töltés műszaki és kiberbiztonsági feltételrendszerének validálását, és az aggregáció gyakorlati működőképességének ellenőrzését. A Parker Project a keresztmárkás V2G-szolgáltatás tesztelése és a valós környezetben végzett üzemeltetési tapasztalatok miatt vált referenciává (Andersen és mtsai., 2019, 2019; Bach Andersen és mtsai., 2019; Bañol Arias és mtsai., 2020; Høj és mtsai., 2018) Ezzel párhuzamosan a Sciurus Pilot a gyakorlati „trial insight” jellegű tanulságokkal járult hozzá az ismeretekhez, különös tekintettel a lakossági telepítési és felhasználói szempontokra (Cenex, 2021; CHAdEMO Association, 2021; Evbenata & Jakeman, 2023; Ghatikar & Alam, 2023; Huber és mtsai., 2021; Jones és mtsai., 2021).

A Vehicle-to-Grid Intelligent Control (VIGIL) program a vezérlési platform és az optimalizáció gyakorlati megvalósíthatóságát állította középpontba. A projekt eredményei rámutattak a kereskedelmi jelzések, a hálózati korlátok és a BEV-oldali üzemeltetési kondíciók együttes kezelésének szükségességére. E tényezők szinkronizációjának hiányában a rugalmasság

„értékesíthető” része lényegesen alulmúlja a névleges kapacitást (Innovate UK, 2020; Newsroom, 2020; PSD, 2020; Versinetic, 2019). Az Electrific projekt e megállapítással összhangban a telematikai és prediktív megközelítések szerepét erősítette meg a flottaszintű optimalizációban. A kutatások kiemelték a mobilitási rendelkezésre állás előrejelzésének és a töltési profilok predikciójának kockázatesökkentő hatását. Ezek a megoldások javítják a szolgáltatás konzisztenciáját (University of Passau, 2025).

A carsharing-környezetben végzett Utrecht Energetic jellegű demonstrációk további rendszerszintű konklúziókkal szolgálnak. A V2G üzemi eredményességét az egyszeri műszaki kompatibilitáson túlmenően a flottaüzemeltetés napi logikája határozza meg. Ebbe a körbe tartoznak a járműcserék, a felhasználói terhelési mintázatok, a töltési fegyelem és az üzemeltetői szolgáltatási szintmegállapodások (Service Level Agreements, SLA). Ilyen környezetben az aggregációs modell feladata a mobilitási szolgáltatás elsőbbségének és az energiaszolgáltatási célokból következő aktiválási igényeknek az egyidejű kezelése. Ez a kényszer a vezérlés és az ösztönzők finomhangolását indokolja (Altamirano, 2025; Hu és mtsai., 2025; Jowett, 2025; Scale, 2025).

Az energiarugalmasság gyakorlati „értékesíthetőségét” és működtetési feltételeit további kulcsprojektek vizsgálták valós környezetben. Az egyesült királyságbeli E-Flex Project az üzleti modellek és a hálózati piacok összekapcsolását demonstrálta (Delaney, 2022; E-Flex, 2020; Nuvve Corporation, 2023; UKRI, 2025), Ezzel párhuzamosan a Dreev projektek a V2G kereskedelmi fókuszú diffúzióját elemezték (Adnan és mtsai., 2023; Agregio Solutions, 2024; Albogamy és mtsai., 2022; Chen és mtsai., 2024), valamint a frekvenciaszabályozási részvétel gyakorlati kérdéseit értelmezték (Dreev, 2021, 2020; Jiang és mtsai., 2023; Pedram és mtsai., 2023). Jelen áttekintés nyomán megállapítható, hogy a smart grid és a decentralizált rugalmasság koncepciója biztosítja azt a rendszerszintű háttérrel, amely elengedhetetlen a V2G műszaki megoldásainak, irányítási logikáinak és értékelési módszereinek későbbi részletes elemzéséhez (Boudmen és mtsai., 2024; Malakhatka és mtsai., 2024; Malya és mtsai., 2021; Ritter & Schanz, 2021; W. Wang és mtsai., 2023).

A flottaalapú V2G-demonstrációk egyik kiemelt hozadéka a közösségi és intézményi üzemeltetés (például iskolabusz-flották) kedvező belépési pontként való azonosítása. Ennek háttérében a rendelkezésre állás és a vételezési ablakok előrejelezhetősége áll. Ezek a tényezők támogatják az auditálható szolgáltatásnyújtást. Az említett a tendenciát illusztrálja a San Diego V2G Iskolabusz Pilot. A programban a hálózati integrációt és a helyi energiaszolgáltatási célokat összekapcsoló üzemeltetési logika került

előtérbe (Cadmus Group & Energetics Incorporated, 2023; EEI, 2022; IT, 2022; St. John, 2024; Stafford, 2025). Az eredmények értelmezését a kapcsolódó beszámolók a gyakorlati kondíciók oldaláról is megerősítik (Gray, 2022; Morris, 2022; Zum, 2024). Hasonló elv alapján működika Realising Electric Vehicle-to-Grid Services (ACT REVS) kezdeményezés. A projekt kifejezetten a hálózati szolgáltatásminőség és a skálázhatóság terepi validálására épített (ANU Battery Storage and Grid Integration Program, 2025; Australian Renewable Energy Agency, 2020; Energeia, 2024; Foley, 2024; Haque és mtsai., 2022; JET Charge, 2023). A V2G rendszerszintű alkalmazhatósága szorosan kapcsolódik a mikrohálózat (Microgrid, MG) koncepciójához. Az MG-k lokális vezérlési és optimalizációs környezetben alkalmasak a BEV-k integrálására terheléskiegyenlítés, csúcsterhelés-csökkentés és visszatáplálás céljából. A folyamat során a hálózati korlátok kezelése „közelebb helyeződik” a vezérlési döntésekhez (Bayati és mtsai., 2019; H. Cai és mtsai., 2018; He és mtsai., 2018; Shi és mtsai., 2019; Usman & Faruque, 2019). E logika mentén értelmezhető a SEEV4-City Pilot (Osló) is, melynél a BEV-k és a lokális tárolók szerepét a CO₂-csökkentés, valamint a hálózati beruházások elhalasztásának összefüggésében vizsgálta (X. Dai és mtsai., 2020; Domènech Abella & Jay East, 2020; Modumudi Venkata Gautam, 2019; Putrus és mtsai., 2018; van der Hoogt és mtsai., 2020). A pilotok visszatérő metatanulása rávilágít az ipari méretű bevezetés elsődleges korlátaira. A nehézségek a „fizikai” visszatáplálási képesség helyett gyakran az integráció szoftveres és üzemviteli rétegeiből erednek. A valós idejű vezérlés, a protokoll-implementációk, az adatminőség és az üzemeltetői folyamatok közösen határozzák meg a szolgáltatás folytonosságát, továbbá az aktiválhatóság konzisztenciáját (De Lima és mtsai., 2021; Karolemeas és mtsai., 2024; Klingert & Lee, 2022; Rene & Fokui, 2024; Surmann és mtsai., 2020). Ezen fejlesztések eredményeit az E-Flex Projekt demonstrálta (Delaney, 2022; E-Flex, 2020; Nuvve Corporation, 2023; UKRI, 2025). A technológiai érettség egyik legfontosabb indikátora a gyors dinamikájú szolgáltatásokhoz szükséges reakcióidő és a teljesítményprofilok követhetősége. A szakirodalmi megállapítások nyomán a frekvenciaközeli beavatkozásoknál a válaszidő akár 1–2 másodperc alá is csökkenthető. A csúcsterhelések kezelése, ezzel párhuzamosan, mérhető optimalizációt eredményezhet, tipikusan 5–11% nagyságrendben (Erdogan és mtsai., 2018; Klaina és mtsai., 2020; Krueger & Cruden, 2020; H. Liu és mtsai., 2018; S. Liu és mtsai., 2020). Az ACT REVS beszámoló mellett olyan üzemzavari, áramszünet (blackout) jellegű helyzetben végzett demonstrációt is kiemelnek, ahol rövid időn belüli visszatáplálással a rendszerreziliencia növelése került sor (ANU Battery Storage and Grid Integration Program, 2025; Australian Renewable

Energy Agency, 2020; Energeia, 2024; Haque és mtsai., 2022; JET Charge, 2023). A szakirodalmi elemzés az integrációs lánc stabilitását a vezérlési algoritmusok és interfészek fejlettségéhez köti (Elmouatamid és mtsai., 2020; International Energy Agency, 2024; Ouramdane és mtsai., 2022). A KEPCO–Hyundai kísérlet ezen a téren specifikus áttörést hozott az AC-V2G szabványosításának és költséghatékony implementálhatóságának igazolásával. A működési kockázatok oldaláról a kutatások mára a sztochasztikus bizonytalanságok kezelésére alkalmas prediktív modelleket helyezik előtérbe (S. Cai & Matsushashi, 2021; Liang és mtsai., 2022; X. Wang és mtsai., 2023). Ez a technikai háttér teremti meg az alapot a strukturális terheléskisimítás és az arbitrage gazdasági vizsgálatához (Dallinger és mtsai., 2010; Eltamaly, 2023; Steward, 2017). A terepi tapasztalatok ezzel párhuzamosan rávilágítottak a gyors dinamikájú szolgáltatások üzemviteli feltételeire (Energeia, 2024; JET Charge, 2023), továbbá a gyakorlati megvalósítás és a megtérülési kérdések összekapcsolására (Cenex, 2021; CHAdeMO Association, 2021; Ghatikar & Alam, 2023; Huber és mtsai., 2021). E műszaki keret közvetlenül megalapozza a kutatási szakaszban vizsgált ösztönző mechanizmusok és integrációs modellek elemzését. A fent sorolt tényezők együttesen határozzák meg a V2G-flották gyakorlati elfogadottságát, aktiválhatóságát és tömeges alkalmazhatóságát.

2.3 Gazdasági, technológiai és viselkedési ösztönzők a V2G-rendszerek elterjedésében

A V2G jármű–hálózat integráció kereskedelmi és hálózati kiterjedése nem azonosítható kizárólag technikai képességként. A kétirányú töltés tömegesen alkalmazható rugalmassági erőforrássá lép elő, amennyiben a részvételhez szükséges ösztönzők, kockázatmegosztási mechanizmusok és intézményi kondíciók közösen stabilizálják a szereplői döntéseket (Neaimh & Andersen, 2020; Nespoli és mtsai., 2023a; Sultan és mtsai., 2022). A V2G terjedésének magyarázó változói következőképpen többszintű struktúrában ragadhatók meg. Ebben a dimenzióban a háztartási és flottaszintű döntések, az aggregátori üzleti modellek, továbbá a hálózati és piaci szabályozás egymást feltételező keretrendszert alkotnak (Amamra & Marco, 2019; Fu és mtsai., 2022; Luo és mtsai., 2022).

Gazdasági dimenzióban a részvétel tartóssága a pozitív nettó ösztönzőkön múlik. A bevételi lehetőségeknek (kereskedelmi és hálózati funkciók, optimalizált töltésből származó megtakarítás) fedezniük kell a teljes körű költségeket és kockázatokat. Ez az akkumulátor-használat implicit költségeinek tükrében kiemelten érvényes (Ghatikar & Alam, 2023; Vanhaverbeke és mtsai., 2017; Zhang és mtsai., 2025). Technológiai

dimenzióban az interoperabilitás, a szabványosított adatcsere és a vezérlési lánc üzembiztonsága határozza meg a szolgáltatás piacképességét. A különböző gyártói ökoszisztémák közötti operatív kompatibilitás fennmaradása szintén kulcstényező (Giannelos és mtsai., 2024). Viselkedési dimenzióban a felhasználói kontroll, az észlelt hasznosság és a bizalom szerepe meghatározó. A mobilitási elsődlegesség és a kockázatérzékelés közvetlenül korlátozhatja a rendelkezésre állást, következésképpen a szolgáltatható rugalmasság mennyiségét is (Abdelmotteleb és mtsai., 2024; Bakhuis és mtsai., 2025; Cenex, 2021). E három dimenzió közösen jelöli ki a disszertáció ösztönzőkre épülő téziseinek megalapozásához szükséges analitikai keretet. A V2G ökonómiai integrációja kizárólag transzparens, szabályozási és üzleti szempontból is előrejelezhető bevétel- és költségmegosztás esetén gyorsítható. A műszaki érettség és a szabványosítás feladata a belépéshez és a mindennapi üzemeltetéshez kapcsolódó kockázatok csökkentése. A felhasználói oldalon ezzel párhuzamosan specifikus élmény- és kontrollmechanizmusok kiépülése szükséges. Ezen kondíciók a részvételt a mobilitási szükségletekkel és preferenciákkal összeegyeztethető, kiszámítható döntési helyzetté alakítják (Alfaverh és mtsai., 2023; Briguglio & Formosa, 2023; Ferko & Geurts, 2024; Icaza és mtsai., 2023).

2.3.1 Gazdasági ösztönzők és költségstruktúrák

A V2G-megoldások kereskedelmi terjedését a gazdasági ösztönzők és a költségstruktúrák a műszaki megvalósíthatóság kontextusában meghatározó módon alakítják. A részvétel tartóssága az átlátható és előre kalkulálható nettó pénzügyi egyenlegen múlik. A felhasználói oldalon a kézzelfogható előnyként való azonosíthatóság szintén kritikus (Amamra & Marco, 2019; Manso-Burgos és mtsai., 2021). E logikában a megtérülési idő, az energiaköltség-megtakarítás és az akkumulátor-amortizáció explicit beárazása egyszerre mikroökonómiai döntési paraméter és rendszerszintű piacformáló tényező. Ez az összefüggés kiemelten érvényes koherens tarifarendszer, kiegyenlítőpiaci hozzáférés és szabályozott aggregátori szerepek fennállása esetén.

A flottás és autómegosztási üzleti modellek kiemelt referenciának tekinthetők. Ezekben a fenntarthatósági érvelés kizárólag mérhető költségcsökkentés és érdemi kockázatmérséklés esetén fordul át tényleges szolgáltatáshasználatba (Briguglio & Formosa, 2023; Ritter & Schanz, 2021). Az utrechti, V2G-képes carsharing demonstráció ennek illusztratív esete: a becslések járművenként több száz euró/év bevételi potenciált jeleznek, ami a költségoldali hatásokkal együtt a TCO kedvező irányú alakulását valószínűsíti, miközben a visszatáplálás és a rugalmassági hozzájárulás a hálózati szolgáltatási oldalt is számszerűsíthetővé teszi

(Altamirano, 2025; Hirtenstein & Guillaume, 2025; Jowett, 2025; Renault Group, 2024). A tapasztalati tanulság ezért nem szűkíthető pusztán bevételi kérdésre: a szabályozási, tarifális, elszámolási és technológiai kitettségek csökkentése önálló ösztönzőként működik, mert mérsékli a várható haszon szubjektív diszkontálását.

A V2G-ösztönzők intézményi és piaci feltételrendszere a keresleti oldal bővülésével együtt értelmezhető, ugyanakkor e kontextus a V2G szempontjából elsősorban ott releváns, ahol a szabályozási és támogatási eszközök a hálózati integrációt közvetlenül lehetővé tevő piacokat készítik elő: ilyen a kétirányú töltés mérési és elszámolási megfelelése, az aggregáció jogi és piaci hozzáférése, valamint a dinamikus tarifák alkalmazhatósága (Anastasiadou & Gavanas, 2022; Hassan és mtsai., 2024; Kovács, 2019; T.-Y. Ma & Fang, 2022; Tirunagari és mtsai., 2022). Ennek gazdasági jelentősége a megfelelési és belépési kondíciók tisztázásában ragadható meg. Ez a folyamat csökkenti a tranzakciós költségeket és a bevételi bizonytalanságot, így mérsékli a részvételhez kapcsolt kockázati prémiumot. Európai példák és rendszerfejlesztési ajánlások igazolják a V2G-kompatibilis kereskedelmi struktúrák célzott szabályozási fejlesztésekkel történő kialakíthatóságát. Ez kiemelten igaz az aggregáció és a tarifadizájn területére (Scale, 2025; Dorji és mtsai., 2023; Ko és mtsai., 2021; Sanguesa és mtsai., 2021; Abdelmottaleb és mtsai., 2024). A kínai New Energy Vehicle (NEV) pilotok e megállapítással összhangban a V2G-integrációt célzó intézményi keretek gyorsított kialakítását jelzik. Ez a trend igazolja a szabályozás közvetlen hatását a tömeges elterjedés ütemére (Latief, 2025; L. Lee, 2025; Miao, 2025; Shenzhen Daily, 2025).

A V2G gazdasági életképességét a szakirodalom két, kiemelten jól dokumentált projekt nyomán számszerűsíti. A dán Parker projektben az aggregátori konstrukció stabil, előre kalkulálható bevételt jelzett (1 860 €/jármű/év). A modellezési adatok aggregátorvezérelt működésben ezzel szemben gyakran a 100–1 100 €/év tartományt adják meg (Andersen és mtsai., 2019). Lakossági alkalmazási környezetben a Sciurus pilot a villamosenergia-kiadások mérséklődését átlagosan mintegy 30 £/hó (≈ 360 £/év) nettó megtakarításként azonosítja. A beszámolók továbbá 80 £/hó nagyságrendű jóváírást (kreditet) említenek. Ez a programfüggő, nem feltétlenül nettó pénzügyi tétel évesítve hozzávetőleg 960 £/év pénzügyi értéknek felel meg (Cenex, 2021; CHAdeMO Association, 2021). A pilot és a kapcsolódó értékelések hangsúlyozzák az automatizált, felhőalapú töltésoptimalizációt, és a felhasználói kontrollt, továbbá az elszámolási átláthatóság szerepét a részvétel fenntarthatóságában (Cenex, 2021; Ghatikar & Alam, 2023). A részvételi hajlandóság szempontjából mindkét esetben meghatározó a bevételek értelmezhetősége az átlagértéken túlmenően a kockázati profiljukban is. Ez a szempont kiemelten fontos az

árvolatilitás, a rendelkezésre állási kötelezettségek, a degradációs bizonytalanság és az elszámolási késedelem miatt. Ezt az összefüggést a különböző értékajánlat-keretek is megerősítik (Cenex, 2020a, 2020b; MacLeod & Cox, 2018). Intézményi flották esetében további empirikus példa, hogy a hálózati szolgáltatási bevételek a magasabb belépési költségek kompenzálására is alkalmasak lehetnek, amit a San Diego-i elektromos iskolabusz pilot is jelez (IT, 2022; Morris, 2022; St. John, 2024).

A V2G gazdasági életképességét a bevételi csatornák mellett a belépési beruházás szerkezete is érdemben meghatározza, különösen a kétirányú töltéshez szükséges töltőberendezések (és kapcsolódó megfelelőségi elemek) esetében. A váltóáramú (alternating current, AC) és az egyenáramú (direct current, DC) megoldások között eltérő CAPEX–OPEX pálya rajzolódik ki: AC-alapon a kétirányú működés jellemzően erősebben támaszkodik a jármű fedélzeti teljesítményelektronikájára, míg DC-alapon a hálózat felé történő visszatáplálást tipikusan a külső töltőberendezés végzi, ami a berendezésköltséget és a telepítési/megfelelőségi terheket megnövelheti. A piaci kommunikációk ezt a különbséget általában tükrözik: franciaországi, járművásárláshoz kötött kereskedői ajánlatokban a Mobilize PowerBox Verso V2G csomag telepítéssel „1299 €-től” jelenik meg, míg egy korábbi, fogyasztói piacon is elérhető DC/V2G eszköz, a Wallbox Quasar (CHAdeMO) esetében 7000 € árszint is előfordul (Carplug, 2025; Mobilize (Renault Group), 2025).

A TCO és a megtérülés vizsgálata következőképpen a gazdasági tézisek centrumát képezi. A beszerzési és üzemeltetési kiadások a V2G-specifikus bevételi csatornákkal és az optimalizált töltésből adódó megtakarításokkal kiegészülve határozzák meg a nettó hatást (Caban és mtsai., 2024; García és mtsai., 2023; van der Hoogt és mtsai., 2020; Vanhaverbeke és mtsai., 2017; Zhang és mtsai., 2025). A V2G működés gazdasági hatása a TCO-ra kedvező piaci és szabályozási kondíciók tükrében pozitív irányú lehet. A hatás nagysága ugyanakkor erősen függ a tarifakörnyezettől, az aggregátori konstrukciótól, a rendelkezésre állási követelményektől és a bevételek–ráfordítások elszámolásának módjától (Bañol Arias és mtsai., 2020; Høj és mtsai., 2018; Huber és mtsai., 2021; Vanhaverbeke és mtsai., 2017). A részvételi hajlandóság szempontjából meghatározó az akkumulátor-degradációval összefüggő többletterhelés és a V2G-ből származó előnyök költségoldali kezelésének átlátható megjelenése az elszámolási logikában. Ez a transzparencia mérsékli a kockázatészlelést és a várható haszon szubjektív diszkontálását (International Energy Agency, 2012; J.-W. Lee és mtsai., 2024; Chapman & Corchero, 2019; Y. Lee és mtsai., 2012; Mah és mtsai., 2012).

A tarifastruktúrák és kereskedelmi ösztönzők oldalán a döntő tényező a célorientált, átlátható árazási mechanizmus megléte. A dinamikus és keresletvezérelt tarifák teszik lehetővé a töltési és kisütési ciklusok hálózati terheléshez illesztését. Ez a folyamat egyszerre növeli a működési hatékonyságot és a felhasználói megtakarítás realizálhatóságát (Alfaverh és mtsai., 2023; Amin és mtsai., 2020; Kovács, 2019; Muqbel és mtsai., 2024; Steffen és mtsai., 2020). Az aggregátori és közösségi energia-architektúrákban a valós idejű árszignálokra épülő koordináció további gazdasági nyereséget nyithat meg. Ezt a potenciált számos modellezés megerősíti (Bogdanova és mtsai., 2023; Chen és mtsai., 2024; Jimenez Carrizosa és mtsai., 2022; Z. Wang és mtsai., 2021; Zhou és mtsai., 2023). A V2G-megoldások tömeges alkalmazhatósága azonban korlátozott maradhat egyértelmű és kellően konszolidált intézményi-szabályozás hiányában. Ide tartozik a kiegyenlítőpiaci integráció, a mérési–elszámolási megfelelés és az aggregáció szabályozása. E hiányosságok közvetlenül növelik a piacra lépés tranzakciós költségeit (Diaz-Londono és mtsai., 2024; D. Liu és mtsai., 2021; K. Liu és mtsai., 2018). E korlátokat számos, gazdasági szimulációkra épülő vizsgálat alátámasztja. Az árjel-vezérelt működés és a szabályozási keretek együttes modellezése nyomán az aggregációs mechanizmusok tipikusan javítják az összgazdasági eredményességet. A koordináció révén a rugalmassági funkciók és a költségmegtakarítások nagyobb hányada válik realizálhatóvá (Dallinger és mtsai., 2010; Diaz-Londono és mtsai., 2024; Jin és mtsai., 2020).

A V2G üzleti terjedése gazdasági oldalról kizárólag a következő feltételek teljesülése esetén gyorsítható: az elszámolási rend logikája a felhasználó számára követhető, a tarifák érdemi árjelekkel támogatják a hálózati igényhez illesztett működést, az aggregáció kereskedelmi hozzáférése pedig rendezett. A regionális szabályozási és ökonómiai sajátosságok ezzel párhuzamosan jelentősen differenciálják a bevételi kockázatokat és a megtérülési pályákat. A kiterjesztési potenciál következképpen országonként és szegmensenként eltérő (Castro és mtsai., 2022; Leal Filho és mtsai., 2021; Manso-Burgos és mtsai., 2021; Ritter & Schanz, 2021; Zahler és mtsai., 2025). A fenti összefüggések tartós üzemviteli működéssé kizárólag a gazdasági ösztönzők mögött a kétirányú üzemet ténylegesen lehetővé tevő műszaki adottságok megléte esetén fordíthatók.

2.3.2 Technológiai ösztönzők és kompatibilitási feltételek

Ahogy az eddigiekben már bemutattuk, a technológiát, a részvétel tényleges lehetőségét és a szolgáltatásminőséget a műszaki kompatibilitás, a szabványosított kommunikáció, továbbá a rendszerszintű üzemképesség határozza meg. A technológiai követelmények egyfelől „belépési küszöböt” jelentenek a szereplők számára, másfelől ösztönzőként is működnek,

amennyiben a megbízható, automatizált és felhasználóbarát működés csökkenti a használati kockázatokat és a tranzakciós terheket. A szakirodalom e műszaki dimenziót elsősorban két metszetben tárgyalja. Az első az együttműködési képesség és az eszközkompatibilitás, míg a második a műszaki érettség és a tömeges alkalmazhatóság. A rendszerközi átjárhatóság a V2G-terjedés egyik kritikus előfeltétele. A járműoldali architektúrák, a töltőberendezések és a háttér-infrastruktúrák heterogenitása ugyanis kockázatokat generálhat a működésbiztonság, az üzemeltethetőség és a felhasználói élmény szintjén egyaránt. A kompatibilitási hiányosságok a kiterjesztést tipikusan közvetett módon korlátozzák. Ez a hatás növeli az integrációs és tesztelési igényt, rontja az üzemeltetési prediktálhatóságot, továbbá töredezett szolgáltatói ökoszisztémát eredményezhet (Giannelos és mtsai., 2024; Z. Ma és mtsai., 2021; Neaimah & Andersen, 2020; Sultan és mtsai., 2022). A szabványosítás kulcstengelyei az ISO 15118, az OCPP és a CHAdeMO (CHArge de MOve). Gyakorlati érvényesülésük azonban a gyártói implementációk, a verziókezelés, és a tanúsítási, továbbá elfogadási eljárások eltérései miatt térségenként változhat. E keretek közös célja a jármű–töltő–háttér-infrastruktúra kommunikációjának és azonosításának egységesítése. Fókuszpont a biztonságos adatcsere támogatása és az integrációs bizonytalanság csökkentése. Ez a folyamat elősegíti a többgyártós és többüzemeltetős V2G-ökoszisztémák kiterjesztését (CHAdeMO Association, 2025; International Electrotechnical Commission, 2024; International Organization for Standardization, 2014, 2022; *Open Charge Point Protocol (OCPP) Specifications*, 2025).

A töltőinfrastruktúra szolgáltatói és platformszintű széttagoltsága kiemelten érzékeny terület. A nem harmonizált megoldások akadályozhatják a piacra lépést, emelhetik az üzemeltetési költségeket, továbbá bizonytalanságot kelthetnek a végfelhasználókban. Nemzetközi tapasztalatok nyomán az átjárható architektúrák támogatják az aggregátorok és hálózati szereplők együttműködését. Ezek a megoldások mérséklék az inkompatibilitásból eredő kommunikációs és adatkonzisztencia-hibákat. Javítják továbbá az energia- és információáramlás minőségét az üzemvitel szempontjából (Benysek és mtsai., 2022; Dorokhova és mtsai., 2021). A felhasználói oldal felől mindez a megbízhatóság és a „súrlódásmentes” működés révén lép előtérbe. A standardizált eljárások csökkenthetik a sikertelen töltések és kommunikációs hibák kockázatát. A folyamat a szolgáltatásminőség javításával erősítheti a részvételi hajlandóságot (Gadh, 2018; Goncearuc és mtsai., 2023). A kétirányú töltőinfrastruktúra implementációs „belépési küszöbét” a szabványosított kommunikáció és tanúsítási követelmények mellett a választott architektúra (AC vs. DC) is alakítja. Az AC megoldásoknál a kétirányú működés koncepcióban erősebben támaszkodik a jármű fedélzeti töltőjére (on-board charger; OBC) és a hozzá

illeszkedő protokollimplementációkra, míg egyenáramú (direct current, DC) konfigurációknál a hálózat felé történő energia-visszatáplálást jellemzően a külső töltőberendezés (electric vehicle supply equipment; EVSE) végzi. Ez a különbség a kompatibilitási és megfeleléségi terhekben is megjelenhet: DC oldalon a teljesítményelektronika és a hálózati csatlakozás oldaláról több, helyszín- és eszközspecifikus integrációs elem válhat meghatározóvá, miközben a V2G-funkciók skálázását a protokoll- és tanúsítási ökoszisztéma (pl. CHAdeMO vagy ISO 15118 implementációk) érettsége is erősen befolyásolja.

A pilot- és demonstrációs projektek egy része kifejezetten az interoperabilitás „rendszerpróbáját” adja. A dán Parker projekt a többmárkás járműflotta és a CHAdeMO-alapú kétirányú integráció gyakorlati kérdéseit is demonstrálta, kiemelve a cross-brand együttműködés jelentőségét (Bach Andersen és mtsai., 2019). Az utrechti V2G-képes carsharing kezdeményezés a szabványosított azonosítás és automatizált felhasználói folyamatok felől közelít, és a Plug & Charge (PnC) logikát az ISO 15118-20 keretrendszerébe illeszti (Scale, 2025). Ausztrál kontextusban az ACT REVS projekt a hálózati szolgáltatásokhoz kapcsolódó gyakorlati integrációs kérdéseket emeli ki, a V2G-képes töltés hálózati viselkedésének és üzemviteli paramétereinek vizsgálatával (Haque és mtsai., 2022). Dél-Koreában a KEPCO–Hyundai IONIQ 5 AC V2G demonstráció a valós idejű protokollkommunikáció és a PnC-hez kapcsolódó implementációk működőképességét tesztelte, a fedélzeti töltő (on-board charger; OBC) vezérlésének és a szabványosított hitelesítésnek a hangsúlyával (Park és mtsai., 2023). Európai példaként a Mobility House & TenneT Redispatch V2G pilot, illetve a Renault 5 + Mobilize V2G program is az ISO 15118-20 kompatibilitás és a PnC automatizáció irányába mutat (The Mobility House, 2024; Thomas és mtsai., 2023).

A rendszerközi átjárhatóság azonban nem kizárólag töltő-jármű kommunikációs kérdés. A fogalom a rendszerirányítási és aggregációs együttműködés „közös nyelvének” megteremtését is implikálja. Ezt a hálózati és kereskedelmi integrációt támogató protokollok és adatmegosztási mechanizmusok (például Open Smart Charging Protocol [OSCP], OpenADR) alkalmazása erősítheti. Ezen megközelítést számos rendszerfejlesztési ajánlás a smart grid irányú átmenet egyik alapfeltételként kezeli (Bakhuis és mtsai., 2025). A gyakorlatban továbbra is visszatérő kihívás az implementációk verzió- és megfeleléskezelése, a valós idejű adatszinkronizáció, a kiberbiztonsági és adatkezelési megfelelés. Ez a nehézség kiemelten a titkosított kommunikáció és a tanúsítási folyamatok heterogén piaci érettsége miatt áll fenn (Goh és mtsai., 2022; Piamvilai & Sirisumrannukul, 2022). A gyakorlati oldal jól megragadható azokban a flottás demonstrációkban, ahol a kétirányú töltés

virtuális erőművi (virtual power plant; VPP) logikába illesztve, automatizált üzem mellett teszteli a valós idejű vezérlést, hitelesítést és üzemeltetési folyamatokat nagyterhelésű környezetben (Morris, 2018).

Az infrastruktúra robusztusságát nem kizárólag a töltő vagy a jármű megbízhatósága adja. A szoftveres vezérlő- és aggregációs platformok stabilitása, az adatkommunikáció minősége, a hálózati korlátok kezelése (például terhelési limitek, rendelkezésre állási kritériumok) ugyancsak meghatározó tényezők. Az aggregáció és vezérlés ennek megfelelően kizárólag akkor működtethető nagyobb léptékben, ha platformszinten alkalmas sokrétű szereplő és eszköz összehangolt kezelésére. A folyamat során a működési állapotok és hálózati adottságok dinamikus figyelembevétele elengedhetetlen (Nespoli és mtsai., 2023a). A hálózati kapacitáskorlátok menedzsmentjét célzó megoldások sorában a dinamikus teljesítmény-visszaszabályozás („network throttle”) elvét alkalmazó fejlesztések töltenek be szemléltető szerepet (Innovate UK, 2020). A valós idejű adatokra és prediktív analitikára építő rugalmasságkezelés ezzel párhuzamosan a flotta-töltési profilok optimalizálásával közelíti meg a nagyléptékű működtetés kihívásait (University of Passau, 2025; Nuvve Corporation, 2023). A rendszer-architektúra választások szerepére az AC bidirekcionális töltés költség- és elfogadottsági érvei külön is rámutatnak. Ez a tényező a platformszintű megoldások optimalizálását a kereskedelmi kiterjesztés egyik előfeltételévé emeli (J. S. Hill, 2024; Kühnbach és mtsai., 2024). A kereskedelmi bevezetés műszaki előfeltétele a moduláris, szabványos interfészekre épülő platform-architektúrák és a reprodukálható üzemviteli folyamatok megléte (Bakare és mtsai., 2023; Z. Ma és mtsai., 2021). A gyakorlati demonstrációk között a valós idejű hálózati beavatkozásokra képes megoldások a rendszerreakció-képesség és üzemviteli robusztusság oldaláról adnak referenciát (Thomas és mtsai., 2023). A piaci érettség irányába mutató jelzéseként értelmezhető, amikor egy demonstráció kereskedelmi részvételre való alkalmassági minősítést vagy rendszerirányítói kompatibilitási elismerést kap (Nuvve Corporation, 2018). A nagyléptékű működéshez a felhasználói preferenciák és mobilitási kényszerek kezelése is hozzátartozik, mivel a V2G-szolgáltatás nem választható el a járműhasználat időbeli mintázataitól. A preferenciákat, hálózati korlátokat és árszignálokat együttesen kezelő töltési–kisütési stratégiák operatív kompatibilitási feltételt jelentenek, és az optimalizációs algoritmusok minősége önálló technológiai ösztönzőként értelmezhető (Gomes és mtsai., 2020). E tényezők szorosan kapcsolódnak az elosztott energiaforrás (Distributed Energy Resource, DER) – BEV integrációs kérdésekhez, a rugalmasságmenedzsmenthez és az energia-informatikai megoldásokhoz (Makeen és mtsai., 2023; R. D. Yu & De Martini, 2024). A technológiai ösztönzők és kompatibilitási kritériumok kizárólag akkor

támogatják a V2G terjedését, ha az együttműködési képesség a szolgáltatói ökoszisztéma szintjén is érvényesül. További feltétel, hogy a platform- és kommunikációs megoldások stabil üzemeltetést biztosítsanak, és a pilotok eredményei modulárisan továbbvihető architektúrákban, továbbá standardizált üzemeltetési folyamatokban rögzüljenek. Mindez a rendszerszintű digitalizáció és adatvezérelt irányítás tágabb keretében illeszkedik. Ez a megközelítés több friss áttekintésben is a hálózati integráció hosszú távú fenntarthatóságának egyik alapjaként tűnik fel (Escoto és mtsai., 2024; Koreny és mtsai., 2022; Kumar és mtsai., 2025; Makeen és mtsai., 2023; R. D. Yu & De Martini, 2024).

2.3.3 Viselkedési ösztönzők és felhasználói döntési mintázatok

A V2G-rendszerek elterjedése nem magyarázható kizárólag gazdasági és technológiai feltételekkel, mert a részvétel tényleges valószínűségét a felhasználói döntések pszichológiai és társadalmi meghatározói jelentősen alakítják. A V2G-alkalmazások értékelésében a cél a részvételi hajlandóság, a kontrollérzet és az elfogadottság változóinak megjelenítése a hálózati integráció „puha” kritériumaiként, de kvázi-műszaki relevanciával. Ezek a tényezők ugyanis közvetlenül befolyásolják a rendelkezésre álló rugalmasság mennyiségét, időbeliségét és megbízhatóságát (Aduama és mtsai., 2023; Gadh, 2018; Koreny és mtsai., 2022; Milas és mtsai., 2020; Rojano-Padrón és mtsai., 2023).

A V2G-architektúrák értékelésében a „műszaki-gazdasági potenciál” kizárólag mérhető és az elemzési keretbe beépíthető felhasználói részvételi valószínűség esetén fordítható át ténylegesen mozgósítható hálózati rugalmassággá. Ezt a célt a Technológiaelfogadási Modell (Technology Acceptance Model, TAM) és a Technológia Elfogadásának és Használatának Egységesített Elmélete (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology, UTAUT) szolgálja. E modellek néhány, empirikusan számszerűsíthető konstrukció mentén teszik explicitté a részvételi hajlandóság összetevőit (Davis, 1989; Venkatesh és mtsai., 2003). Ezen struktúrában az észlelt hasznosság (Perceived Usefulness, PU) és a teljesítményvárakozás (Performance Expectancy, PE) a haszonértelmezéshez és a kompenzáció értékeléséhez kapcsolódik. Az észlelt könnyű használhatóság (Perceived Ease of Use, PEOU) és az erőfeszítés-várakozás (Effort Expectancy, EE) a belépési és működtetési terhekhez társítható. A társas befolyás (Social Influence, SI) a normákhoz és a tapasztalatdiffúzióhoz, a támogató adottságok (Facilitating Conditions, FC) pedig a kompatibilitás, a hozzáférés és a szolgáltatói támogatás dimenziójához rendelhető. Ennek gyakorlati jelentősége a felhasználói döntés paraméterezhető változóként történő megjelenítése a „fekete doboz” jelleg helyett. Ez a megközelítés közvetlenül összekapcsolható a V2G-

környezetben ténylegesen aktiválhatóvá és kiterjeszhetővé váló rugalmassági potenciál hányadával (Bakhuis és mtsai., 2025; Baumgartner és mtsai., 2022; Venkatesh és mtsai., 2012).

A társadalmi tényezők közül kiemelt szerepe van a társadalmi tanulásnak és a normaképződésnek: a felhasználók döntéseit nemcsak saját tapasztalatuk, hanem mások megélt élményei, a közösségi narratívák és a „szokásos/elfogadott” technológiahasználat mintái is befolyásolják. Hazai vizsgálatok a megújuló energiákhoz kapcsolódó ismeretek és attitűdök alakulása nyomán jelzik a kollektív tapasztalatok tudatos kommunikációjának és a közösségi értelmezési keretek erősítésének fontosságát. Ezek a tényezők növelhetik a műszaki megoldásba vetett bizalmat és a cselekvési hajlandóságot. Mindez a V2G vonatkozásában közvetlenül a részvételi kritériumok (előnyök, korlátok, védelem) „láthatóvá tételének” elfogadást gyorsító hatásaként azonosítható (Csorba és mtsai., 2020; Fazekas és mtsai., 2018; Szabó és mtsai., 2018). A diffúziós megközelítések egy további tanulsága, miszerint a terjedés gyakran nem lineáris. Társadalmi hálózati hatások és műszaki interakciók együttese gyorsíthatja az elfogadást. Tisztán „egyéni ösztönzőkkel” ezzel párhuzamosan sokszor kizárólag mérsékelt eredmény érhető el. Az ágensalapú (agent-based) modellezési adatok ezzel összhangban a társas befolyás és a rendszerkölcsonhatások kombinációjának gyorsító potenciáljára utalnak. Ez a V2G szolgáltatásdiszajn szempontjából a közösségi legitimitás és a demonstrált, megosztható tapasztalatok stratégiai értékét hangsúlyozza (Amamra & Marco, 2019; Ebrie & Kim, 2022; Hassler és mtsai., 2021; Icaza és mtsai., 2023; Ravi & Aziz, 2022). A felhasználói elfogadást visszafogó tényezők között a szakirodalom következetesen kiemeli az irányításvesztéstől való félelmet, az akkumulátor igénybevételével kapcsolatos bizonytalanságot, továbbá az adatkezelés és a kompenzáció átláthatóságával kapcsolatos kockázatterzetet. Ezek a gátak jellemzően nem egyszerű „információhiányként” azonosíthatók. Sokkal inkább a bizalom, a kockázateszlelés és a kontrollérzet egymást erősítő struktúrájába rendeződnek. A kisütési korlátok, az akkumulátorvédelmi mechanizmusok és az ellentételezés viszonyítási alapjának előzetes ismerete nélkül a részvételi döntés jellemzően az elutasítás felé billen (Bohdanowicz és mtsai., 2022; Diaz-Londono és mtsai., 2024; Maeng és mtsai., 2020). A Netbeheer Nederland ajánlásai ezért a degradációval és rugalmasságvesztéssel kapcsolatos aggályok célzott kezelését (például garanciális és ösztönző konstrukciók, világos felhasználói beállítási lehetőségek) a bevezethetőség kritikus elemének tekintik, és felhasználói felmérések alapján azonosítják a leggyakoribb elrettentő tényezőket (Abdelmotteleb és mtsai., 2024; Bakhuis és mtsai., 2025). Ezzel összhangban több kutatás azt jelzi, hogy az átlátható kommunikáció, a

célzott edukáció és az élményalapú kipróbálás képes mérsékelni a „rejtett kockázatokkal” kapcsolatos percepciókat, és érdemben javíthatja az elfogadási hajlandóságot, különösen akkor, ha a felhasználó a saját mobilitási igényei mellett tapasztalja meg a részvétel biztonságos működését (Jiang és mtsai., 2023; T. Liu és mtsai., 2023; W. Wang és mtsai., 2023).

A pilotprogramok empirikus értéke ebben a fejezetben a korábban azonosított elfogadási tényezők – kiemelten a hasznosság és erőfeszítés észlelése, a kontrollérzet, továbbá a bizalom–kockázat viszony – valós használati környezetben történő megfigyelhetőségében rejlik. Így a „részvételi hajlandóság” nem elméleti feltételezésként, sokkal inkább tényleges üzemviteli korlátként azonosítható. Az utrecht Utrecht Energetic (MyWheels) demonstráció a folyamatok egyszerűsítése és az automatizált azonosítás (Plug and Charge, PnC) révén a szolgáltatásdíjazn szerepét hangsúlyozza az elfogadásban (Hu és mtsai., 2025). A Parker projekt és a Sciurus pilot tapasztalatai ezzel párhuzamosan jelzik a felhasználói komfort és a beállítható részvételi korlátok – kifejezetten az alkalmazásalapú paraméterezhetőség – kulcsszerepét a részvétel fenntarthatóságában (Andersen és mtsai., 2019; Foley, 2024). A példák közös tanulsága szerint a részvétel tartóssága nem a technológia pusztá rendelkezésre állásán, hanem a kontrollálhatóság és az értelmezhetőség minőségén múlik. A viselkedési ösztönzők hatása következőképpen kizárólag a szolgáltatás üzemviteli logikájába épülve stabil. Módszertani következményként a felhasználói heterogenitás a V2G értékelésének kombinált eszköztárral történő kezelését indokolja. A kvalitatív módszerek a kockázateszlelés, a bizalom és a normák strukturált feltárását támogatják. A szimulációs és modellezési megközelítések – elsősorban a sokszereplős, dinamikus keretek – ezzel szemben a preferenciák és ösztönzők hálózati szintű következményeinek kezelésére alkalmasak (Ciabattini és mtsai., 2021; Maeng és mtsai., 2020; Milas és mtsai., 2020; Song & Potoglou, 2020; Taljegard és mtsai., 2021). Ezek a szakirodalmi irányok egybehangzóan az ösztönzők hatásosságának összetett jellegére utalnak. Ez nem kizárólag a kompenzáció szintjének függvénye, sokkal inkább az időzítés, a kommunikálhatóság, a felhasználói korlátokkal való összeegyeztethetőség és a társadalmi beágyazottság együttes eredője. Ebből következően a V2G bevezetésének sikeressége a gazdasági, műszaki és viselkedési tényezők együttes működéséből áll össze. A műszaki üzemképesség és a szolgáltatásminőség csökkenti a használati súrlódásokat. A kompenzáció és az ár–érték észlelése értelmezhetővé formálja az előnyöket. A bizalom és kontrollérzet pedig stabilizálja a részvételt. A pilóták és empirikus vizsgálatok tanulságai nyomán következőképpen az az ösztönző- és szolgáltatásdíjazn tekinthető hatékonyak, amely egyszerre kezeli a

kockázateszlelést, az információs aszimmetriát és a felhasználói heterogenitást. További kritérium mindezen tényezők értelmezhetősége a társadalmi normák és tanulási folyamatok kontextusában (I. Ahmed és mtsai., 2023; Bhundar és mtsai., 2023; Gonzalez Venegas és mtsai., 2020).

2.4 Regionális alkalmazhatóság és magyar kontextus

A BEV-ek és a jármű-hálózat integrációs megoldások európai elterjedése a dekarbonizáció és a hálózati rugalmasság szempontjából stratégiai jelentőségű. A műszaki eszközök elérhetősége azonban önmagában nem garantálja a bevezethetőséget. A V2G alkalmazhatóságát a regionális sajátosságok kombinációja alakítja. Ebben a mátrixban az infrastruktúra fejlettsége, a jövedelmi és ökonómiai adottságok, továbbá a szabályozási és intézményi környezet egymást erősítő módon határozza meg a gazdasági életképességet és a tömeges alkalmazhatóságot. A különbségek kiemelten markánsan érvényesülnek a közép- és kelet-európai térségben. A régióban a jövedelmi viszonyok, az elektromobilitási hozzáférés és a szabályozási kiszámíthatóság gyakran eltér a nyugat-európai mintázatoktól (I. Ahmed és mtsai., 2023; Christensen és mtsai., 2021; Sadhu és mtsai., 2022; Sultan és mtsai., 2022; Sun és mtsai., 2020). A fejezet ezért először EU27 szinten rögzíti azokat a szerkezeti dimenziókat, amelyek mentén a V2G összehasonlíthatósága módszertanilag megalapozható, ezt követően a fókusz Közép-Európára szűkül, végül a magyar kontextus elemzése jelöli ki a későbbi kutatási keret értelmezéséhez szükséges konkrét korlátokat és feltételeket.

2.4.1 EU27 szerkezeti különbségek és összehasonlítási lehetőségek

A V2G terjedésének EU27 szintű értelmezése több léptéken indokolt. A megvalósíthatóság és a gazdasági életképesség ugyanis nem kizárólag a kétirányú töltés műszaki lehetőségéből következik. Meghatározó tényező az energiarendszer intézményi felépítése, a kereskedelmi hozzáférés szabályai, a töltési hozzáférés szerkezete és a digitális kompatibilitás együttállása. Az európai közösség a globális elektromobilitási átmenet egyik legnagyobb és leginkább szabályozott ökonómiai terepe. Az Európai Autógyártók Szövetsége (European Automobile Manufacturers' Association, ACEA) regisztrációs adatai nyomán az új személyautó-regisztrációkban a BEV részaránya 2025-ben is folyamatosan emelkedett. A tagállami volumen- és dinamika-különbségek azonban fennmaradtak, ami már az alapkereslet oldalán is heterogén V2G-kimeneteket valószínűsít (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), 2025). Ez a keresleti heterogenitás önmagában is indokoltá formálja a piacsabályozási különbségek strukturált összevetését. A kereskedelmi méret tehát

szükséges, de nem elégséges kritérium. Az európai értékelések következetesen jelzik a V2G rendszerértékének széles körű elismertségét. A tömeges üzleti alkalmazás ezzel szemben jellemzően még célzott programokhoz és demonstrációs ökoszisztémákhoz kötődik. A felfutás sebességét végső soron a piaci-intézményi keret dönti el (Eurelectric, 2025). Bár az egységes piac közös kereteket biztosít, a tagállami különbségek eltérő implementációs pályákat eredményezhetnek. Az infrastruktúra, a szabályozás, a jövedelmi adottságok és a szolgáltatói ökoszisztéma szintjén jelentkező eltérések következménye kettős. A V2G egyes országokban piacépes rugalmassági szolgáltatássá, másutt tartósan pilot jellegű megoldássá válhat (Briguglio & Formosa, 2023; The Mobility House Energy, 2025; Zahler és mtsai., 2025). E kettősség magyarázó kulcsa uniós szintű összevetésben a szabályozási környezet felemassága. Az uniós villamosenergia-kereskedelmi keretek a keresletoldali rugalmasság és az aggregáció irányába nyitnak. A „piaci átfordulás” operatív követelményrendszere ezzel szemben tagállami szinten differenciálódik. A piacnyitás és az aggregáció elvi kereteit a 2019-es belső villamosenergia-piaci csomag rögzíti (European Union, 2019b) A kiegyenlítési piacok részvételi és eljárási logikáját a Villamosenergia-kiegyenlítési Iránymutatás (Electricity Balancing Guideline, EBGL) konkretizálja (European Commission, 2017).

A V2G gazdasági értéke kizárólag a rugalmassági piacok (beleértve a kiegyenlítő és szabályozási szegmenseket) aggregált, kisméretű erőforrások számára biztosított hozzáférhetősége esetén konvertálható bevétellé és hálózati értéké. Kritikus tényező, hogy a mérési–elszámolási kritériumok ne zárják ki a lakossági és flottaszintű belépést (European Commission, 2017). Ennek megfelelően uniós szintű összevetésben a „kereskedelmi hozzáférés” dimenzió kizárólag három, egymástól elválasztható rétegre építve értékelhető teljeskörűen. Az első réteg a V2G-bázisú rugalmassági funkciókban való részvétel jogi lehetőségét, és a szerepkörök – kiemelten az aggregátor – szabályozott státuszát vizsgálja (European Union, 2019a). A második szint a gyakorlati belépési és üzemviteli küszöbfeltételekre fókuszál. Ezek az adminisztratív, műszaki és pénzügyi korlátok mentén országonként eltérő hozzáférési pályákat rajzolnak ki. A harmadik réteg a mérési–elszámolási és felelősségi szabályokból fakadó implementációs súrlódásokat fedi le. Az elszámolási időfelbontás, a hiteles mérés, az adat-hozzáférés és a kockázatviselési rend közvetlenül befolyásolja a bevételi bizonyosságot. A három kérdéskör összhatása határozza meg a „kereskedelmi átfordulási arányt”, vagyis ettől függ, hogy az elvileg rendelkezésre álló rugalmasság tényleges bevétellé és hálózati értéké formálódik, esetleg tartósan demonstrációs jellegű marad (Energeia, 2024; Hecht és mtsai., 2023; Høj és mtsai., 2018).

A szakirodalomban leírt demonstrációk következőképpen nem önmagukban, sokkal inkább az általuk feltárt piacszerkezeti és szabályozási keretrendszer kontextusában értelmezhetők. A magasabb bevételt realizáló projektek – például a Parker és az ACT REVS – többnyire támogató intézményi környezetben működtek. Itt a kiegyenlítő és szabályozási piacokhoz való hozzáférés, továbbá az aggregált részvétel eljárási és megfelelési követelményei kedvezőbbek voltak a kisméretű rugalmassági erőforrások számára. Más tagállami kontextusokban ezzel szemben a kereskedelmi design és a szabályozói keretek korlátozó jellege lassíthatja a széles körű integrációt. Ez a hatás a kezdeményezéseket pilot-státuszban tarthatja (Andersen és mtsai., 2019; Hecht és mtsai., 2023; Zahler és mtsai., 2025). Uniós szintű összevetésben a „kereskedelmi hozzáférés” vizsgálata kizárólag a konkrét rugalmassági termékekhez kötött részvételi és elszámolási szabályrendszer fókuszba helyezése esetén válik összehasonlíthatóvá. Az általános engedélykérdés vizsgálata nem elégséges, ugyanis a monetizálhatóság operatív korlátait és lehetőségeit az országspecifikus szabályok határozzák meg.

A strukturális dimenziók az EU27 összehasonlításban nem izoláltan működnek, sokkal inkább olyan kölcsönhatási rendszerben érvényesülnek, amely a V2G bevezethetőségét és tömeges alkalmazhatóságát tagállamonként eltérő módon formálja. Az infrastruktúra-hozzáférés szerkezete például nem pusztán ellátottsági kérdés, sokkal inkább a kereskedelmi integráció közvetlen inputja. Azokban az esetekben, amikor az otthoni, munkahelyi, esetleg más rendszeres csatlakozás feltételei gyengébbek, a csatlakozási mintázat kevésbé tervezhető. A bizonytalanság rontja a rendelkezésre állás időbeliségét, ezáltal korlátozza a szolgáltatásminőséget, végső soron pedig a bevételképességet. A nem tervezhető rendelkezésre állás ugyanis gyengíti a szolgáltatási teljesítések megbízhatóságát és az aggregátori menedzsment hatékonyságát (Briguglio & Formosa, 2023; Leal Filho és mtsai., 2021; Pan és mtsai., 2023). A hálózati csatlakozási feltételrendszer és a díjszerkezet az infrastruktúra ehhez kapcsolódó, EU27 szinten releváns „közvetítő csatornája”. A csatlakozás költség- és díjelemei, továbbá az elszámolási logikák közvetlenül befolyásolják a V2G értékajánlatának stabil, előre kommunikálható üzleti modellre való lefordíthatóságát (Council of European Energy Regulators (CEER), 2025). Az EU27 sajátossága a V2G nem csupán műszaki innovációként történő pozicionálása, sokkal inkább dekarbonizációs és rendszerintegrációs eszközként való megítélése. Az ambiciózus klímacélok és a megfelelési rendszerek (például akkumulátor-fenntarthatósági és ellátásilánc-követelmények) ezzel párhuzamosan többletfeltételeket és költségoldali nyomást is helyezhetnek a gazdasági szereplőkre.

A kereskedelempolitikai eszközök a külső versenyfeltételekhez kapcsolódóan szintén alakíthatják az uniós átmenet költség- és elérhetőségi környezetét. Illusztratív példa erre a Kínából származó akkumulátoros elektromos járművekre vonatkozó végleges kiegyenlítő intézkedések uniós bevezetése. A következtetés itt nem normatív piacvédelmi állítás. A V2G üzleti modellek feltételrendszere EU27 szinten sokkal inkább a dekarbonizációs célok, a megfelelési követelmények és a piacszerkezeti design tagállami implementációinak együttesében azonosítható. Az összehasonlításban következőképpen elkerülhetetlen az ország-specifikus (tagállami) gyakorlati leképezés. Az EU27-szintű keret módszertani hozzáadéka a különbségek összehasonlíthatóvá válása a fenti csatornák – piacnyitottság és terméklogika, hozzáférési szerkezet és díjkörnyezet, digitális elszámolhatóság és bizalmi stabilitás – nyomán. A bemutatott struktúra egyben átvezetést is ad a közép-európai fókuszhoz. A régió és a nyugat-európai magországok között ugyanis éppen azok a dimenziók mutatnak a legnagyobb szórást, amelyek a V2G üzleti modelljeinek „átfordulási pontjait” meghatározzák (European Union, 2023b).

2.4.2 A közép-európai elektromobilitási sajátosságok

Az alfejezet a V2G piaci integráció általános feltételeit közép-európai kontextusba helyezi, és értelmezési keretet ad a későbbi indikátor- és szcenárióalapú elemzésekhez. A „Közép-Európa” kifejezés alatt a dolgozatban elsődlegesen a visegrádi országok (Csehország, Lengyelország, Magyarország, Szlovákia) és a velük összevetett, földrajzilag közeli, eltérő fejlettségű tagállamok értendők, az adott empirikus rész országhoz igazítva. Közép-Európában a jármű-hálózat üzemszerű piaci integrációját az határozza meg, hogy a járműállomány bővülése, a ténylegesen használható csatlakozási helyzetek minősége és a rugalmassági piacokhoz való hozzáférés milyen mértékben illeszkedik egymáshoz. A térség elektromobilitási pályáját három, egymást erősítő szerkezeti vonás jellemzi: a jövedelmi szintekhez kapcsolódó árérzékenység, a töltési hozzáférés minőségi és területi korlátai, valamint a szabályozási–piaci megvalósítás országonként eltérő gyakorlata (Icaza és mtsai., 2023; Leal Filho és mtsai., 2021; Manso-Burgos és mtsai., 2021; Ravi & Aziz, 2022; Ritter & Schanz, 2021). Az EU tapasztalatai jelzik a kétirányú töltés technikai rendelkezésre állásának önmagában való elégtelenségét. A kereskedelmi működéshez aggregálható járműállomány és aktivitás szükséges. Elengedhetetlenek továbbá az előre jelezhető csatlakozási idők, az érett mérési–elszámolási és adatkezelési háttér, kiegészülve a rugalmassági termékekhez való intézményi hozzáféréssel (ACER & CEER, 2024). A peremfeltételek közép-európai sajátossága,

hogy ugyanazok a követelmények kisebb, heterogénebb piacokon jellemzően hamarabb bizonyulnak korlátozónak.

A makrogazdasági környezet a térségben közvetlenül visszahat a V2G szempontjából releváns állománykülöbök elérésére. A BEV-ek terjedését egyszerre fékezik a fizetőképességi korlátok és a belépési kiadások relatív terhei. Ez a tényező a bővülési ütemet mérsékli, így az aggregátorok számára rendelkezésre álló rugalmassági volumen és annak stabilitása is korlátozottabbá formálódik. Az Eurostat vásárlóerő-egység (Purchasing Power Standard, PPS) és vásárlóerő-paritás (Purchasing Power Parity, PPP) bázisú összevetései számos elemzett ország vonatkozásában az EU-átlag alatti PPS-alapú egy főre jutó bruttó hazai terméket (Gross Domestic Product, GDP) és fogyasztási szintet jeleznek. A felzárkózás üteme ezzel párhuzamosan országonként eltér (Eurostat, 2025a). Ebben a kontextusban a részvételi hajlandóság hangsúlyozottan érzékeny a bevételi mechanizmus érthetőségére és a szabályozási környezet kiszámíthatóságára. Ennek oka a felhasználói oldalon azonosítható jellemzően rövidebb megtérülési elvárás és az erősebb kockázatérzékelés (Manso-Burgos és mtsai., 2021). Ez az aggregátori oldalon a rendelkezésre álló kapacitás volatilitását és a bevételi előrejelezhetőség kockázati felárát is növelheti. V2G-szempontból a szekunder állomány bővülése egyszerre jelenthet lehetőséget (nagyobb bázis) és kockázatot (heterogénebb akkumulátor-állapot, eltérő garanciális és felhasználói kockázatvállalási profil), ami a szerződéses konstrukciók és ösztönzők kialakítását érzékenyebbé teszi.

A térség elektromobilitási karakterének meghatározó eleme az állománybővülésben a szekunder, azaz másodlagos BEV-piac domináns szerepe. A hozzáférhetőségük javulása a belépési terhek mérséklése révén keresletélénkítő csatornát képez. A tendencia a BEV-állomány növekedésével párhuzamosan a V2G szempontjából hasznosítható, aggregálható bázist is szélesíti. A növekedési pálya társadalmi és területi szempontból azonban heterogén mintázatot mutathat (Horváth és mtsai., 2023).

A csatlakozási oldal értékelésében a térségben kiemelt jelentőséggel bír a V2G-hez szükséges hosszabb csatlakozási idők magán- és munkahelyi koncentrációja. Számos empirikus eredmény nyomán kijelenthető a korai BEV-használók többségének elsődleges otthontöltési preferenciája. Megbízható otthoni, esetleg munkahelyi töltés megléte esetén a nyilvános töltés inkább kiegészítő funkciót lát el (Falchetta & Noussan, 2021). A V2G üzleti logikája következőképpen szorosan kapcsolódik az otthontöltés elérhetőségéhez. A magánszférában biztosítható a leghosszabb parkolási-csatlakozási idő. A háztartási tarifákhoz kötődő árelőny továbbá a BEV-használat megtérülési kereteit is erősíti. A társasházi és többlakásos

épületállomány, kiegészülve a parkolási infrastruktúra intézményi korlátaival, ezzel szemben számos országban jelentősen szűkítheti az otthontöltés terjedését (Hall & Lutsey, 2020).

A töltési infrastruktúra gyakorlati relevanciáját a fentieknek megfelelően a darabszám helyett a minőségi csatlakozások aránya fejezi ki. Minőségi csatlakozás alatt az a rendszeresen elérhető töltési helyzet értendő, ahol a kétirányú energiaáramláshoz hiteles kétirányú mérés és elszámolást támogató adatminőség társul. További követelmény az adatkapcsolati és kiberbiztonsági kritériumok teljesülése. Az Alternatív Üzemanyagok Európai Megfigyelőközpontja (European Alternative Fuels Observatory, EAFO) indikátorai nyomán látható a területi koncentráció és a szolgáltatásminőségi szórás negatív hatása. A két tényező együttesen rontja a kihasználható csatlakozási ablakokat. A jelenség az aggregáció szervezési és működtetési terheit növeli (European Commission, 2017).

A szabályozási és ökonómiai környezet közép-európai sajátossága, a tényleges piacra lépési és működtetési paraméterek erős tagállam-specifikus jellege a jogharmonizációs keretekkel kiegészülve értelmezhető. A kisebb, eltérő fejlettségű piacokon e tényezők relatív súlya nagyobb. A rugalmassági piacokhoz való hozzáférést a belépési küszöbök alakítják. A minimális ajánlati méret, az engedélyezési–megfelelési eljárások és a mérési időfelbontás gyakorlata a régióban kiemelten érzékeny pont. Kisebb aggregálható volumenek esetén ugyanaz a küszöb aránytalanul erős korlátként jelentkezhet.

Az aránytalanság mechanizmusa többnyire a fix megfelelési és tranzakciós terhekben ragadható meg. A belépés és működtetés „fix” elemei kisebb volumenre oszlanak, így a fajlagos teher nő.

Az alternatív üzemanyag-infrastruktúra rendelet e közegben az átláthatóságot és az adatszolgáltatási rendet erősíti. A jogszabály középtávon támogathatja a menedzselhető csatlakozások arányának növekedését, feltéve, hogy az adatszabványosítás és az üzemeltetési gyakorlat konzisztensen valósul meg (European Union, 2023b). Az EBGL közös keretet ad, a konkrét termékkialakítás és részvételi követelmények eltérései azonban továbbra is mérhető belépési terhet jelentenek. Ezt az állítást a Villamosenergia-átviteli Rendszerirányítók Európai Hálózata (European Network of Transmission System Operators for Electricity, ENTSO-E) értékelése is alátámasztja (ENTSO-E, 2024b).

A kétirányú energiaáramlás hiteles, automatizálható kezelésére a működtethetőséget a mérés és elszámolás oldalán az okosmérési rendszerek és az adatcsere alkalmassága határozza meg. A kereskedelmi integráció gyakorlati tapasztalatai nyomán látható, hogy számos piacon adminisztratív akadályok, mérési hiányosságok és a szerződéses komplexitás fékezik a

keresletoldali rugalmasságot. Az okosmérési képességek fejlettsége és funkcionális egységessége ezzel párhuzamosan heterogén. Ez a sokszínűség sok esetben gátolja a V2G tömeges, automatizált elszámolását (ACER & CEER, 2024).

A bemutatott összefüggések tükrében a régióban a korai alkalmazások várhatóan a tervezhető csatlakozási időkkel és nagyobb volumenre osztható megfelelési terhekkel rendelkező szegmensekben azonosíthatók először. A koncentrált használati profilú flották felé mutató tapasztalatok alátámasztják a fenti következtetést (ACER & CEER, 2024). A lakossági körben az elterjedés kulcsa ezzel párhuzamosan az otthoni és munkahelyi töltési helyzetek elérhetősége. E helyszínek biztosítják ugyanis a hosszabb csatlakozási időket, és a költségoldali megtérülési logikát is itt stabilizálják (European Automobile Manufacturers' Association (ACEA), 2025; Transport & Environment, 2024). Az üzleti bevételek realizálhatóságát végül a rugalmassági termékekhez való hozzáférés tagállami paraméterei és az elszámolást támogató mérési–adatkezelési infrastruktúra együttesen alakítják. A tényezők összehangoltsága kiemelten meghatározó a közép-európai, eltérő fejlettségű piacokon (ACER & CEER, 2024; Agency for the Cooperation of Energy Regulators, 2023; ENTSO-E, 2024b; European Commission, 2025a).

2.4.3 A magyar piac szerkezeti, szabályozási és technológiai adottságai
Magyarország az elektromobilitás közép-európai terjedésében kettős szerkezetű pályát mutat: miközben a termelési oldal gyorsan integrálódik a járműipari és akkumulátor-értékláncokba, a belföldi kereslet élénkülése tartósan érzékeny marad a háztartási jövedelmi korlátokra, az energiaár-környezetre, valamint a támogatási és szabályozási ösztönzők kiszámíthatóságára. (European Commission, 2025b, 2025c; Eurostat, 2025b; Horváth és mtsai., 2023; International Energy Agency, 2024). Ebben a konfigurációban az ipari beruházások és beszállítói kapcsolódások lokális koncentrációja és regionális fejlesztési hatása egyszerre értelmezhető felzárkózási mechanizmusként és függőségi kockázatként, amennyiben a stratégiai döntési központok és a technológiai standardok dominánsan a régió kívül maradnak (Molnár és mtsai., 2020, 2022). A keresleti oldal sajátosságai a teljes birtoklási költség szemlélete nyomán ragadhatók meg. A beszerzési ár és a finanszírozási kondíciók dominanciája a régió más országaiban is ismert, kifejezetten a középjövedelmű háztartások esetén és a költségérzékeny vállalati szegmensekben. Magyarországon azonban ez a tényező gyakran társul a másodlagos piac felértékelődésével és a támogatások „küszöbhatásával”. A TCO-versenyképesség következőképpen nem pusztán műszaki paraméterek (energiafogyasztás, szervizigény) függvénye. A kérdés sokkal inkább

programtervezési jellegű. A meghatározó elem a keresletet aktiváló ösztönzők célcsoport-képzése, a kondíciók jellege és a kiszámíthatóság mértéke (Correia Sinézio Martins és mtsai., 2024; European Commission, 2025b; Horváth és mtsai., 2023; Muehlegger & Rapson, 2022; Sierzchula és mtsai., 2014).

A támogatáspolitikai V2G-fókuszú értelmezésében a hangsúly a beszerzési és az üzemviteli fázisban realizálható ösztönzők arányán és egymásra épülésén van. A beszerzési támogatások javíthatják a belépési pozíciót. A kétirányú töltés bevezethetősége szempontjából a kritikus tényező azonban a felhasználói oldalon azonosítható, szabályozott rugalmassági bevételi logika megjelenése. Ide tartozik a kereskedelmi hozzáférés, a kiszámítható tarifajel és az intézményesített értékesítési út. A kritériumok hiányában a V2G felhasználói nézőpontból nem költségoptimalizáló megoldásként, sokkal inkább többlet-komplexitásként és többlet-kockázatként azonosítható (International Energy Agency, 2024; Muehlegger & Rapson, 2022). Magyarországon ezt a kockázátészlelést erősíti a lakossági villamosenergia-árak és tarifastruktúrák társadalmi és szabályozási érzékenysége. A szabályozott árkörnyezet és a határköltségek távolsága ugyanis a megtérülési narratívát is torzíthatja (Eurostat, 2025b). Magyarországon és a régióban a háztartási energiaárak gyakran szabályozottak (rezsicsökkentés, hatósági árak). Ez alapvetően torzíthatja a V2G gazdasági ösztönzőit, mivel a felhasználók nem érzékelik a valós idejű piaci árjelzéseket. Ennek következtében, a nemzetközi modellek (pl. dinamikus árazás) itt nem alkalmazhatók közvetlenül (Amamra & Marco, 2019). A hazai adaptáció során ezért nem a tisztán piaci alapú (price-based), hanem a központi vezérelt, kapacitásalapú (incentive-based) konstrukciók (pl. aggregátori fix díjak) lehetnek célravezetőek. A vállalati szegmensben ezzel szemben a döntések tipikusan formalizáltabbak, a töltés szervezése kontrolláltabb. A V2G üzletileg reprodukálható tömeges elterjedése magyar viszonyok között következésképpen inkább szervezett flották és aggregált portfóliók felől válhat kézzelfoghatóvá, a spontán lakossági diffúzió helyett (International Energy Agency, 2024; Magyarország Kormánya, 2024).

A szabályozási keretek értékelésénél indokolt az uniós kötelező megfelelési pálya elválasztása a nemzeti végrehajtás kereskedelmi és technikai részletszabályaitól. Az Alternatív Üzemanyag-infrastruktúra Rendelet (Alternative Fuels Infrastructure Regulation, AFIR) a Transzeurópai Közlekedési Hálózat (Trans-European Transport Network, TEN-T) nyomvonalán kötelező, számszerűsített infrastruktúra-ellátottsági elvárásokat állít. A jogszabály a felhasználói oldal felől is minimumokat rögzít. Ide tartozik az ad hoc használatot támogató, széles körben alkalmazott elektronikus fizetési eszközök biztosítása, kiegészülve a töltési árinformációk és az üzemeltetési állapotadatok szolgáltatásával (European

Union, 2023b). A V2G szempontjából a döntő kérdések jelentős része ezzel szemben a nemzeti végrehajtás és a villamosenergia-piacszervezési szabályozás „finomszerkezetében” dől el. A hálózathasználati díjlogika kezelhetősége, az aggregáció üzleti szerepének és felelősségi rendjének tisztázottsága, továbbá az okosmérési és adat-hozzáférési kötelezettségek gyakorlati implementációja ide sorolható. Az uniós villamosenergia-kereskedelmi keret ugyan definiálja az aggregációt, az önálló aggregátort, az átjárhatóságot és az okosméréshez kapcsolódó kötelezettségeket, a tényleges működőképességhez azonban a tagállami implementáció koherenciája és a piacra lépés gyakorlati kritériumai szükségesek (European Union, 2019a). Az AFIR ebben az értelemben inkább szükséges, mint elégséges feltétel. A rendelet gyorsíthatja a töltőinfrastruktúra bővülését és standardizálhatja a felhasználói szolgáltatási minimumot. Önmagában azonban nem teremti meg a kétirányú funkciók piacát. A V2G bevételi csatornáit ugyanis a villamosenergia-piacokhoz kapcsolódó, szabályozott rugalmassági mechanizmusok és azok nemzeti hozzáférési szabályai teszik tömeges megvalósításra alkalmassá (European Commission, 2017).

A hazai energiamixben a fotovoltaikus (PV) kapacitások aránya kiemelkedően magas és gyorsan növekszik. Ez sajátos feladatot ró a V2G-re: Magyarországon a technológia elsődleges szerepe várhatóan nem a frekvenciaszabályozás (mint az angol E-Flex projektben), hanem a feszültség szabályozás és a napközbeni tárolás lesz. A napi fogyasztási görbe kisimítása, azaz a déli termelési csúcsok eltárolása és az esti fogyasztási csúcsokba való betáplálása jelenti a legnagyobb rendszerértéket. Megoldást igényelnek továbbá a csatlakozási pontok térbeli egyenetlenségeiből fakadó hálózati feszültségek (Pintér és mtsai., 2022). A hálózatüzemeltetési és statisztikai adatsorok nyomán a rugalmassági funkciók és a tárolási opciók szerepe felértékelődik. Az elosztói hálózat fejlesztési üteme és a digitális háttér kiépítettsége ezzel szemben nem mindenhol követi a termelési-fogyasztási mintázatok gyors változását a Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. (MAVIR) szerint (MAVIR, 2024). A háztartási árkörnyezet és a piaci árjelzések észlelhetősége a megtérülési narratívák keretét is befolyásolja, ami összehasonlítható EU-s adatokból is követhető (Eurostat, 2024). Ezzel a V2G nem kizárólag közlekedéspolitikai eszközként, hanem a rendszerüzemhez kapcsolódó rugalmassági portfólió elemeként értelmezhető (ENTSO-E, 2024a; International Energy Agency, 2022).

A külföldi tapasztalatokra alapozva, a V2G hazai elterjedésének vélhetően egyik legérzékenyebb kritériuma a kiegyenlítőenergia- és tartalékpiacon való tényleges, rutinszerű hozzáférés. A belépési küszöböt a hiteles mérés és ellenőrizhető elszámolás képezi, kiegészülve az aggregátori koordinációval. E tényezők kombinációja biztosítja a teljesítmény és a

pénzügyi elszámolás reprodukálhatóságát (Nespoli és mtsai., 2023b; Muqbel és mtsai., 2024; Figgener és mtsai., 2022; Zhang és mtsai., 2025). A hazai adaptáció ütemét következésképpen alapvetően a piac- és hálózatrányítási integráció érettsége határozza meg. Rövid távon a pilotok és célzott konstrukciók dominanciája racionális átmeneti állapotnak tekinthető. A tömeges kiterjesztés ezzel szemben a platformszintű belépési kritériumok rutinszerű teljesíthetőségéhez kötődik (MAVIR, 2025). Ebben a keretben a MARI és PICASSO az mFRR és aFRR termékek platformlogikájú aktiválásán és elszámolásán keresztül a nemzeti szereplőknek technikai és folyamatszintű illeszkedést kell biztosítaniuk (ENTSO-E, 2025a, 2025b). Következésként, a hazai adaptáció ütemét érdemben a piac- és rendszerirányítási integráció érettsége határozza meg, így rövid távon a pilotok és célzott konstrukciók dominanciája racionális átmeneti állapotnak tekinthető, míg a skálázás a platformszintű belépési feltételek rutinszerű teljesíthetőségéhez kötődik (MAVIR, 2025; Zhang és mtsai., 2025; Zhu és mtsai., 2024).

Magyarországi fogyasztói mintázatok alapján a magántöltéshez való hozzáférés hiánya és a nyilvános töltési opciók korlátozottsága érzékelhető akadályként jelenik meg, ami közvetlenül visszahat a kétirányú szolgáltatások társadalmi elfogadottságára és kockázatteretére (EAFO, 2024). A lakótelepi és társasházi környezetben a magántöltés gyakorlati elterjedése tipikusan tulajdonosi döntéshozatali, csatlakozási korlátokba ütközik, és ezek az akadályok európai kontextusban is az otthoni töltés egyik legmarkánsabb hozzáférési problémájaként jelennek meg (International Energy Agency, 2024). Az uniós épületenergetikai szabályozás a társasházi akadályok csökkentését és a parkolóhelyekhez kötött töltési infrastruktúra irányait is kijelöli, míg a magyar helyzetben a beruházási tranzakciós költségek és a hozzáférés lehet releváns (European Union, 2024a). A szakpolitikai összefoglalók is hangsúlyozzák, hogy a tagállami végrehajtás minősége meghatározza a tényleges könnyítések mértékét (ICCT, 2024). Ezzel párhuzamosan a vállalati telephelyi töltés és a flották elektrifikációja standardizálhatóbb üzemeltetést tesz lehetővé, ezért a kétirányú töltés első, szélesíthető alkalmazásai várhatóan inkább szervezett portfóliók felől stabilizálódnak (Tuchnitz és mtsai., 2023; Zhu és mtsai., 2024).

A magyar piac jövőbeli irányainak értékelésében a beruházási központ és a felhasználói piac kettőssége együtt kezelendő, mert a járműipari és akkumulátoripari kapacitásbővülés növeli az elektromobilitás láthatóságát és a kapcsolódó szolgáltatói versenyt, miközben a keresleti oldali adaptációt továbbra is a szabályozási koherencia és a piacra lépés intézményi feltételei korlátozzák. A Debrecen térségében megjelenő ipari dinamika és a kapcsolódó ökoszisztéma erősíti a technológiai beágyazottságot, a

Szegedhez kötődő beruházások pedig a régiós ellátási láncok magyarországi szerepét növelik, ami középtávon a töltési hozzáférés bővülését és a felhasználói érdeklődés erősödését is valószínűsíti (Associated Press, 2024; Reuters, 2025). V2G szempontjából az áttörési kritérium azonban nem önmagában a töltőpontok számának növekedése. A döntő tényező sokkal inkább az átjárható kétirányú töltés hozzáférhetősége és a rugalmassági üzleti belépés kereteinek koherenciája, kiemelten a szervezett flották és aggregált konstrukciók vonatkozásában (ENTSO-E, 2025b, 2025a; P3 Group, 2025; Pedersen, 2025, o. 3). A fenti logika nyomán a következő rész kizárólag az ösztönzők tárgyalásának hazai szűk keresztmetszetét érinti. Ide tartoznak a TCO-érzékeny szegmensek és a használtpiaci mechanizmusok, a flottafókuszú programok tömeges kiterjesztése, továbbá a rugalmassági piacokhoz való hozzáférés feltételrendszere (ENTSO-E, 2025a; European Union, 2023b, 2024b). Az eddigiek alapján a hazai elektromobilitási és V2G-alkalmazhatósági korlátok nem írhatók le kizárólag infrastruktúra hiányként vagy technológiai lemaradásként: a műszaki feltételek, a szabályozási finomszerkezet, valamint a piaci hozzáférés intézményi rendje és a felhasználói döntési racionalitás egymásra hatása együtt alakítja a bevezethetőség pályáját. V2G-kontextusban ezért a kritikus szűk keresztmetszetek a kétirányú töltés interoperabilitása, a hiteles mérés és ellenőrizhető elszámolás, az aggregáció működőképes szerepfelfogása, továbbá a rugalmassági piacokhoz való tényleges hozzáférés koherenciája mentén azonosíthatók. Ebből következően a továbblépés olyan integrált kutatási keretet igényel, amely e feltételeket egy rendszerlogikai összefüggésben kezeli, és képes a hazai adaptációval kapcsolatos megvalósíthatósági és fenntarthatósági kérdések konzisztens vizsgálatára.

2.5 Életciklus-alapú környezeti értékelési keretek az elektromobilitás és a V2G kontextusában

Az elektromobilitás környezeti teljesítményének megítélése kizárólag életciklus-értékelési logikára épülő vizsgálat esetén tekinthető megalapozottnak. A fejezet elején rögzíteni szükséges azokat a módszertani választásokat, amelyek az adatok összehasonlíthatóságát és értelmezhetőségét meghatározzák (ISO, 2006a, 2006b). Az európai módszertani keretek ezen követelmények konkretizálásával relevánssá válnak a termékszintű folyamatok és az energiarendszeri összefüggések egyazon értelmezési térben történő megjelenésekor (European Commission, 2010).

A fejezet első egysége a BEV-ek életciklus-szintű üvegházhatásúgáz-kibocsátását helyezi egységes elemzési keretbe. A szöveg feltárja az eltérő

energiamixek és használati profilok függvényében jelentős különbségeket generáló kulcstényezőket (Bieker, 2021; International Energy Agency, 2024). A második alfejezet az akkumulátor-életciklus azon folyamataira koncentrálna, amelyek a V2G-hez kapcsolódó üzemi terhelési mintázatokkal párhuzamosan változnak. A tényezők következtetésül a környezeti mérleg szempontjából is relevánsak, különös tekintettel a degradáció és az élettartam-kihasználtság modellezési kezelésére (Preis & Biedenbach, 2023; Temporelli és mtsai., 2020). A harmadik alfejezet a V2G környezeti relevanciáját rendszerszinten vizsgálja. A fókuszban a hálózati funkciók és az akkumulátor-oldali többlet-igénybevétel együttesének valid, robusztus környezeti következtetésekhez vezető kritériumai állnak (Bishop és mtsai., 2013; European Commission, 2021; European Union, 2023a).

2.5.1 Az elektromos járművek életciklus-alapú üvegházhatásúgáz-kibocsátási profilja

A BEV-ek környezeti teljesítményének tudományos értékelése az életciklus-elemzés (life cycle assessment, LCA) keretrendszerére támaszkodik, amely a termékrendszer teljes életútján – nyersanyag-kitermeléstől a gyártáson és használaton át az életciklus végi kezelésig – számszerűsíti a környezeti hatásokat. A BEV-ek és az ICEV összehasonlításában az üvegházhatású gáz (ÜHG) életciklus-profilja kiemelten érzékeny a funkcionális egység megválasztására, a rendszerhatárra, az allokációs elvekre és az adatminőségre. A szakirodalmi adatok következtetésül kizárólag ezen módszertani paraméterek egyértelmű dokumentáltsága esetén tekinthetők összevethetőnek (ISO, 2006a, 2006b). A közúti járművek vonatkozásában a funkcionális egység a gyakorlatban tipikusan 1 jármű-kilométer, amelyhez élettartam-futásteljesítmény-feltevés kapcsolódik. A nemzetközi LCA-összevetésekben a 200–250 ezer km nagyságrend gyakori bázistartományként tűnik fel, kifejezetten közép kategóriás személygépkocsik kapcsán (Bieker, 2021). A gyártási fázis egyszeri kibocsátási terhei a teljes élettartam-kilométerszámon „oszlának el”. Az élettartam rövidülése következtetésül a fajlagos (gCO_{2e}/km) eredményeket mechanikusan rontja, a hosszabb kihasználás javítja.

A BEV–ICEV életciklus-összehasonlításokat vizsgálva alapvető különbség, hogy a kibocsátási profil súlypontja technológiánként eltérő szakaszra esik. ICEV-eknél az ÜHG-terhelés domináns hányada a használati fázisban keletkezik, az üzemanyag-ellátási lánc és az elégetés komponensei révén, míg BEV-eknél a kibocsátási tömegközéppont részben az előállítási szakaszba tolódik. A gyártási fázis ÜHG-intenzitásának meghatározó hányadát a tipikusan elemzett rendszerhatárok kontextusában az akkumulátorgyártás, azon belül is az alapanyag-előkészítés (lítium,

kobalt, nikkell) és a cellagyártás adja (Astudillo & mtsai., 2022; Bieker, 2021). A jelenséget gyakran „gyártási hátizsák” fogalmával említik. A kifejezés a használati fázis potenciális emisszió-előnyének egy kezdeti gyártási többlet teher „ledolgozásával” történő realizálódására utal.

A BEV-ek környezeti „megtérülésének” közismert indikátora a karbon-paritás (környezeti megtérülési pont). A legfrissebb összehasonlító adatok nyomán a BEV-ek életciklus-kibocsátása már a jelenlegi energiamix kontextusában is szignifikánsan alacsonyabb a benzines járművekénél. Európában ez a megtakarítás 66–69%, az Amerikai Egyesült Államokban (USA) 60–68%, Kínában pedig 37–45% körüli (Astudillo & mtsai., 2022; Bieker, 2021). A paritás helye és dinamikája érzékeny a villamosenergia-termelés karbonintenzitására. Kiemelendő a még rendkívül magas szén-részarányú energiamixszel rendelkező régiókban (mint India) is mutatkozó 19–34%-os emisszió-megtakarítás ténye. Ez az adat gyengíti a műszaki előny kizárólag „tisztá” hálózatoknál történő realizálódásának feltevését.

Közép-Európa szempontjából a karbon-paritás futásteljesítményben mért helye az átlagos villamosenergia-mix karbonintenzitása miatt kedvezőtlenebb hálózatokhoz képest későbbre tolódhat. A régióban azonban így is fennmarad a BEV-ek életciklus-előnye. A töltési időzítéshez kötött rendszerhatások ezt a nettó mérleget jelentősen módosíthatják. A megközelítés logikailag a dekarbonizáció erősödő hatására is rámutat. Európában ma ~67% az előny, a hálózatok tisztulásával a 2030-ban forgalomba kerülő modellek vonatkozásában ez az érték várhatóan 74–77%-ra emelkedik. A tendencia bizonyítja a BEV-ek környezeti előnyének dinamikus jellegét (Bieker, 2021). A futásteljesítmény nem semleges háttérparaméter. A paritás helye és dinamikája a publikációk nyomán nem univerzális. A mutató érzékeny a járműszegmensre, az akkumulátorkapacitásra, a valós energiafogyasztásra, az élettartam-kilométerre és – kiemelten – a villamosenergia-termelés karbonintenzitására. A régiós összehasonlítások értelmezése következőképpen kizárólag egységesített módszertani keretek alkalmazása esetén konzisztens. A régiós összehasonlítások Európában jellemzően jelentős életciklus-előnyt jeleznek a BEV-ek javára. Az elemzések ezzel párhuzamosan következetesen feltárják a gyártási fázis kibocsátásának BEV-eknél jelentkező többletét. A használati fázis „kompenzációs” képessége következőképpen döntően a töltéshez rendelt energiamix függvénye (Bieker, 2021; International Energy Agency, 2024). A villamosenergia-oldali robusztusságot globális mintán is alátámasztja az időben változó energiamixeket figyelembe vevő regionális vizsgálatok eredménye. Az elektromos autók a régiók döntő többségében nettó emissziócsökkentést eredményeznek. A tény gyengíti a BEV-ek kizárólag nagyon alacsony karbonintenzitású hálózatok esetén érvényesülő

kedvezőségére vonatkozó egyszerűsítő állítást (Knobloch és mtsai., 2020). A logika regionális kontextusban a magasabb átlagos karbonintenzitás késleltető hatására is rávilágít a karbon-paritás tekintetében. Ugyanazon rendszerben a töltési időzítés és a rugalmassági stratégiák ezzel szemben a marginális kiváltási hatások révén relatíve nagyobb többletelőnyt is termelhetnek. A kettősség az energiarendszeri környezet és a viselkedési-üzemeltetési kritériumok együttes kezelését indokolja (Knobloch és mtsai., 2020; Taljegard és mtsai., 2019).

A használati fázis modellezésében a szakirodalom egyre nagyobb hangsúlyt helyez a dinamikus szemléletre. A villamosenergia-infrastruktúra karbonintenzitása ugyanis időben változik. A töltés időzítése miatt a ténylegesen igénybe vett termelési szerkezet eltérhet az éves átlagtól. Az éves átlagos emissziós faktor alkalmazása sok esetben kizárólag első közelítésként valid. A következményalapú LCA-logika ezzel szemben a Marginális Emissziós Tényezők (Marginal Emission Factor, MEF) és a kiváltási mechanizmusok felől közelíti meg a hálózati hatásokat (Ekvall & Weidema, 2004). A V2G és tágabban a jármű bármely eszközzel való kapcsolata (Vehicle-to-Everything, V2X) funkciók vonatkozásában a kreditálás és az elkerült kibocsátások elszámolása módszertanilag vitatott és modelfüggő. A szakirodalom e területen következőképpen kiemelten kezeli a vizsgálati határok, az allokáció és a hálózatbővítés választásainak transzparens dokumentálását (Ravi & Aziz, 2022). A V2G-architektúrák modellezése és megbízhatósági értékelése az integráció oldaláról szintén megerősíti a kalkulációk érzékenységét a hálózati kondíciókra, a funkció-portfólióra és az aggregációs döntésekre. Ez az összefüggés az életciklus-elemzésekben is azonosítható (Nazir és mtsai., 2021).

Az intelligens töltés és a V2G környezeti vonatkozásai a publikációkban összefüggésben jelennek meg: a megújuló termeléshez és a hálózati terhelésekhez időzített töltés mérsékelheti a fosszilis csúcserőművek igénybevételét, míg a V2G a kétirányú energiaáramlás révén további rendszerszintű rugalmasságot biztosíthat (Barsali és mtsai., 2024; Ravi & Aziz, 2022; Taljegard és mtsai., 2019). Egyre gyakoribb az azon integrált keretek alkalmazása, amelyek a hálózati funkciókból származó előnyöket és az akkumulátorigénybevétel terheit – környezeti és hálózati értelemben egyaránt – együttesen kezelik (Barsali és mtsai., 2024; Ravi & Aziz, 2022).

Az életciklus végi (End-of-Life, EOL) szakasz – újrahasználat, másodlagos felhasználás, újrafeldolgozás és anyagviszanyerés – szintén jelentősen befolyásolhatja az életciklus-mutatókat. A kreditálás és allokáció módszertani megoldásai itt azonban kiemelten meghatározzák a nettó ÜHG-mérleget. A körforgásos gazdasági perspektívát hangsúlyozó európai áttekintések a másodlagos felhasználás és az anyagviszanyerés jövőbeni

akkumulátorgyártás primeranyag-igényét mérséklő hatását emelik ki. Ez a mechanizmus csökkentheti az iparág komplett környezeti terheit. A számszerű adatok azonban erősen függenek a vizsgálati határok választásától és az elszámolási szabályoktól (EEA, 2024). A V2G-hez kapcsolódó kreditálási kérdések ezzel összhangban kizárólag a járműfókuszú (attribúciós) és a villamosenergia-hálózati (következményalapú) hatások világos elkülönítése esetén értékelhetők tudományos konzisztenciával. További követelmény a két dimenzió viszonyának formális definiálása a kiváltási mechanizmus révén (Ravi & Aziz, 2022).

2.5.2 Az EV-akkumulátorok életciklusa: degradáció, szekunder felhasználás és környezeti implikációk

A BEV környezeti teljesítményének megítélése nem korlátozható a használati fázis lokális emissziómentességére. Az üvegházhatásúgáz-kibocsátás és számos más környezeti teher számottevő része ugyanis a gyártási–ellátási láncban, kiemelten az akkumulátor-értékláncban jelentkezik. A hatásstruktúra összehasonlítható értelmezésére az LCA ad koherens módszertani keretet. A metodika a gyártási, a használati és az életciklusvégi folyamatokat egységes rendszerben kezeli.

Európai intézményi és szakpolitikai összegzések nyomán a BEV-ek nettó klímaelőnye az energiamix dekarbonizációjával párhuzamosan növekszik. Az upstream szakasz dominanciája miatt a klímamérleg azonban érzékeny a gyártási helyszínre, az anyagellátási útvonalakra és az EoL-, továbbá körforgásos stratégiák modellfeltevéseire (EEA, 2018; N. Hill és mtsai., 2023; Knobloch és mtsai., 2020). A gyártási terhek számszerű megítélésében a 2010-es évek vége óta hangsúlyos fordulat figyelhető meg. Számos tanulmány rámutatott a korábbi LCA-k egy részének elavult energiaigény-adataira és a kevésbé hatékony gyártási paraméterek torzító hatására. A korszerűbb adatkészletek és a termelési hatékonyságjavulás integrálása következőképpen általában mérsékli az akkumulátorgyártás ÜHG-intenzitását a régebbi, konzervatív becslésekhez viszonyítva (Astudillo & mtsai., 2022; Hoekstra, 2019; Temporelli és mtsai., 2020). A kritikai áttekintések ezzel párhuzamosan az akkumulátor-LCA kalkulációk jelentős szórását is kiemelik. A végső értékeket egyszerre formálja a rendszerhatár (cellagyártás vs. komplett akkumulátorcsomag), a gyártási energiamix, a gyártó ország, a selejtarány és az anyagok ellátási lánc (Temporelli és mtsai., 2020).

A szórás egyik legfőbb oka az akkumulátorgyártás ÜHG-intenzitását alapvetően befolyásoló cellakémiák heterogenitása. A BEV-ek gyártási terhe így nem tekinthető egységesnek, hiszen a nikkel-mangán-kobalt

(NMC) és a lítium-vas-foszfát (LFP) technológiák eltérő nyersanyag-összetétellel, energiasűrűséggel és ellátási lánc-kitettséggel bírnak.

Módszertani szempontból lényeges különbség az LFP és NMC rendszerek viszonylatában kimutatható gyártási ÜHG-eltérés iránya és nagyságrendje. A mutató a rendszerhatár, a gyártási energiamix és a pack-mértékű energiasűrűség függvényében széles sávban változhat. Az LFP-k alacsonyabb energiasűrűsége azonos hatótávolság biztosításához tipikusan nagyobb tömeget és anyagigényt tesz szükségessé (Kallitsis és mtsai., 2024; Temporelli és mtsai., 2020). A kémiai választás a használati fázis felől is releváns. Az akkumulátor degradációja és ciklusállósága az összesített élettartam-kilométer és az esetleges akkumulátorcsere valószínűsége nyomán közvetlenül visszahat a fajlagos életciklus-kibocsátásra. A degradáció LCA-ba történő explicit beépítését vizsgáló elemzések a degradáció-modellezés mellőzésének torzító hatását hangsúlyozzák a BEV-ek életciklus-mutatóiban. A torzítás kiemelten érvényes a ciklusigénybevételt növelő üzemmódokban, illetve az elemzett élettartamon belüli akkumulátorcsere reális forgatókönyve esetén (Preis & Biedenbach, 2023).

A gyártási karbonintenzitás a fentiek tükrében nem tekinthető univerzális paraméternek. A villamosenergia-termelés földrajzi sajátosságai, a hő- és villamosenergia-ellátás műszaki szerkezete, továbbá a nyersanyagok bányászati és feldolgozási útvonalai együttesen határozzák meg a fajlagos kibocsátásokat. Nagy térbeli felbontású LCA-bázisú modellezések nyomán azonos cellakémia esetén is szisztematikus eltérések adódhatnak a fajlagos kibocsátásban a termelési hely és az anyagforrások függvényében. A jelenség a terhelésáthelyezés (burden shifting) kockázatát az értéklánc-szabályozás és a vállalati beszerzés szintjén is relevánssá formálja.

A hivatkozott adatok értelmezésében azonban módszertanilag szükséges a gyártási szakasz gyárkapun belüli (gate-to-gate) kibocsátásainak és a komplett upstream szakaszt is magában foglaló cradle-to-gate rendszerhatárnak a különválasztása. A két megközelítés ugyanis eltérő kérdésre válaszol, így a számszerű kimenetek sem tekinthetők csereszabatosnak (Kallitsis és mtsai., 2024). A fejezetben a fentieknek megfelelően két, egymást kiegészítő normalizálási logika alkalmazható. A gyártási összevetésekben a kapacitásra vetített mutatók dominálnak. A rendszerszintű értelmezésben ezzel szemben elsődlegesen az átadott energiamennyiséghez és az élettartamhoz kötött funkcionális egység szerinti levezetés tekinthető irányadónak.

Az akkumulátorok autóiipari alkalmazásaira fókuszáló életciklus-áttekintések rögzítik a kalkulációk összehasonlíthatóságának erős függését a rendszerhatároktól, az allokációs szabályoktól és az EoL-feltételezésektől.

A módszertani konzisztencia következképpen nem pusztán formai elvárás, sokkal inkább döntéstámogatási kritérium (Q. Dai és mtsai., 2019; Temporelli és mtsai., 2020). A körforgásos stratégiák LCA-beli egységesítését célzó szintézisek külön kiemelik a többfunkciós rendszerek (multifunctionality) kezelésének eltéréseit. Hangsúlyosak továbbá az anyagminőség-veszteségek és az erőforrás-diszipáció mérésének korlátai, továbbá a másodlagos nyersanyagok és a second life alkalmazások standardizált modellezésének szükségessége. Ide kapcsolódik a jóváírási és helyettesítési szabályok szerepe is. A szabályrendszer alapvetően befolyásolja az EoL-opciók komplett életciklus-mérleget módosító hatását (Husmann és mtsai., 2024).

A BEV-ek villamosenergia-rendszeri integrációja nem választható el az akkumulátorok öregedési folyamataitól. Az élettartam tényleges hossza ugyanis közvetlenül meghatározza a gyártási terhek szolgáltatott funkcion történő „eloszlásának” mértékét. A degradáció két alapvető komponense a naptári öregedés és a ciklikus öregedés.

A két tényező arányát a használati mintázat, a hőmérsékleti terhelés, a töltöttségi állapot (State of Charge, SOC), a kisütési mélység (Depth of Discharge; DoD) és a C-ráta együttesen alakítja. Járműalkalmazásra koncentráló vizsgálatok nyomán a degradáció megbízható becslése többtényezős, gyakran kombinált modellesaládokat igényel, tekintettel az öregedés tipikusan nemlineáris jellegére (Han & et al., 2014). A töltési folyamat optimalizálásának elméleti megközelítései – például a lítiumbevonódás kockázatát korlátozó vezérlési logikák – a degradáció minimalizálása, a veszteségek csökkentése és a töltési idő rövidítése közötti szabályozási kompromisszumok szükségességére utalnak. Az összefüggések a jármű-hálózat együttműködés rendszerszintű tervezésében meghatározók (Vincent és mtsai., 2017). Extrém hőterhelésű környezetben a gyorstöltés és a hőmenedzsment összehangolásának jelentősége fokozódhat. Az ilyen adatok értelmezése azonban szükségszerűen vizsgálati beállítás- és paraméterfüggő. Az állítás kiemelten érvényes a cella-, esetleg környezeti hőmérsékleti korlátok általi közvetlen teljesítménylimitálás esetén (Zhang és mtsai., 2025).

A V2G üzleti életképességével kapcsolatos viták gyakran a degradációs költségek eltérő módon történő internalizálásából fakadnak. A módszertani feszültséget bizonyos fokig a műszaki és szakpolitikai fókuszú szintézisek oldják fel. Ezek a degradációmenedzsmentet a piacformálás és a szolgáltatásdizájn központi elemének tekintik (Uddin és mtsai., 2018). A V2G-használat élettartamhatása szolgáltatás- és üzemeltetési profilfüggő. Az öregedési modellek és az energiarendszeri ütemezés összekapcsolása következképpen módszertani kérdés. A degradáció túlzott

leegyszerűsítése torzíthatja a szolgáltatási profilok megválasztását és a költség–haszon mérleget (Preis & Biedenbach, 2023). Az élettartamra kiterjesztett szimulációs megközelítések arra utalnak, hogy a V2G elsősorban a ciklikus degradációt növeli, miközben a naptári komponens a teljes öregedésben továbbra is meghatározó maradhat; ennek megfelelően a kompenzáció nagysága érzékeny a részvételi forgatókönyvekre, az infrastruktúraköltségekre és a piaci feltevésekre. A vizsgált tanulmányokban a kompenzáció tipikusan az egységnyi V2G energiaáramlásra vetített fedezeti igényt jelöli, amelynek tartalma – degradációfedezet vagy szélesebb költségcsomag – modelfüggő (Sagaria és mtsai., 2025). V2G-kontextusban a számszerűsítő elemzések a bevételi oldal fenntarthatóságának kritériumait hangsúlyozzák. Ez a dimenzió kizárólag a ciklusok értéke és a kapacitásvesztés implicit költségének összhangja esetén stabil. További feltétel a kockázatok – így a garanciális kondíciók, a felhasználói elfogadás és az aggregátori szerződések – intézményesített kezelése (D. Wang és mtsai., 2016).

A hálózati előnyök azonban nem kizárólag a kétirányú működésből származhatnak. Nagy penetrációjú BEV-flották vonatkozásában a menedzselt, egyirányú töltés önmagában is számottevő hálózati értéket generálhat. A hatás elsődlegesen a rendszerköltség- és emissziócsökkentési csatornák révén érvényesül, kiemelten a megújuló túltermelési időszakok hasznosításával és a csúcsterhelések mérséklésével. A megkülönböztetés azért lényeges, mivel az egyirányú menedzselt töltés (V1G) és a V2G elválasztó határát gyakran szabályozási és üzleti keretek jelölik ki. A döntő tényező a rugalmasság szolgáltatási besorolása és az ösztönzők kontextusa (Barsali és mtsai., 2024).

A V2G-hez kapcsolódó élettartam- és fenntarthatósági kérdések gyakorlati megalapozásához szükséges az akkumulátor egészségi állapotának (State of Health, SOH) nyomon követése és megbízható becslése. Szisztematikus összegzések nyomán a mérhető jelekre (feszültség, áram, idő, hőmérséklet) támaszkodó módszerek, a modellalapú és adatvezérelt megoldások, továbbá a hibrid eljárások pontossága és transzferálhatósága erősen függ az alkalmazási tartománytól és az adatok minőségétől (Farmann és mtsai., 2020). A degradáció monetizálása és a szolgáltatásdíjazn következképpen nem választható el a diagnosztikai megbízhatóságtól. A kockázati prémium, a garanciális kondíciók és az ütemezési döntések azon SOH-információkra épülnek, amelyek bizonytalansága közvetlenül visszahat a gazdasági és fenntarthatósági mérlegre (Preis & Biedenbach, 2023).

Az életciklusvégi stratégiák oldalán a másodlagos felhasználás és az újrahasznosítás versengő, egyúttal komplementer opcióként is azonosítható. A további hasznosítási alkalmazások környezeti racionalitása

a fennmaradó kapacitás stacionárius profilban történő hasznosulása révén ragadható meg. A folyamat ezáltal primer energiatárolási kapacitást, továbbá anyagigényt vált ki (Castro és mtsai., 2022; Di Natale és mtsai., 2021; Salkuti, 2023). Az EOL küszöbértékek esetén is számottevő teljesítmény maradhat a cellákban. A jelenség megfelelő diagnosztikával és alkalmazásválasztással az élettartamkiterjesztés realitását erősíti (Etxandi-Santolaya és mtsai., 2024). Az EoL akkumulátoráramok kezelése során ezzel párhuzamosan az újrahasznosítás műszaki és gazdasági fenntarthatósága kritikus kérdés, kiemelten az anyag-összetétel változása, a feldolgozási útvonalak eltérő energiaigénye és a visszanyert anyagok minősége miatt. A technikai–gazdasági áttekintések nyomán „ideális” eljárás jelenleg nem azonosítható. A helyzet a szeparációs technológiák és a rendszerintegrált feldolgozás fejlesztését indokolja (Gaines, 2018). LCA-szempontról mindez azért meghatározó, mert az újrafelhasználás és az újrahasznosítás jóváírásai, továbbá terhelésátadási szabályai – kifejezetten erős helyettesítési feltevések kontextusában – jelentősen módosíthatják a komplett életciklus-mérleget (EEA, 2018; Husmann és mtsai., 2024).

A fenti összefüggések energiarendszeri értelmezéséhez egy tágabb rendszerirányítási perspektíva is kapcsolódik. A mikrorácsok hálózatra kapcsolt és szigetüzemi üzemmódja viszonylatában fellépő átmenetek kezelése rávilágít a tárolókra és intelligens vezérlésre épülő megoldásoknál az átmeneti dinamikák, a zavartűrés és az üzemállapot-váltások stabilitásának szolgáltatásminőségi szerepére. A jelenség V2G-környezetben kiemelten az üzemállapot-váltások és védelmi funkciók szempontjából releváns. E tényezők ugyanis a kétirányú csatlakoztatott eszközök szolgáltatásminőségét és alkalmazhatóságát korlátozhatják (Hmad és mtsai., 2023).

A BEV – akkumulátor – villamosenergia - rendszer hármában a fenntarthatósági teljesítmény és a gazdasági életképesség közös metszetét négy, egymással összefüggő feltétel jelöli ki: az upstream kibocsátások mérséklése és a gyártási földrajzi kiterjedés kezelése (EEA, 2018; N. Hill és mtsai., 2023; Kallitsis és mtsai., 2024; Knobloch és mtsai., 2020), a degradáció explicit modellezése és monetizálása a V2G-szolgáltatásdizájnban (Salaria és mtsai., 2025; Uddin és mtsai., 2018), a SOH-alapú üzemeltetés és diagnosztika módszertani megbízhatósága (Farmann és mtsai., 2020; Preis & Biedenbach, 2023), valamint a körforgásos stratégiák konzisztens LCA-kerete a jóváírási és helyettesítési szabályokkal együtt (Q. Dai és mtsai., 2019; Etxandi-Santolaya és mtsai., 2024; Gaines, 2018; Husmann és mtsai., 2024; Temporelli és mtsai., 2020). E keret jelöli ki a dolgozat későbbi számításainak értelmezési tartományát: a V2G értékelése csak a degradációval összekapcsolt gazdasági modellezés és az LCA-credits logika módszertani fegyelme mellett tekinthető

összehasonlíthatónak. Ennek megfelelően, a V2G nem önmagában vett „többletfunkció”, hanem olyan rugalmassági szolgáltatási architektúra, amelynek klíma- és költségelőnye a többletciklizálásból fakadó öregedés kezelésével, a felhasználói ösztönzők és az EoL-stratégiák összehangolt, feltételhez kötött tervezése mellett tartható fenn (Husmann és mtsai., 2024; Kallitsis és mtsai., 2024; Sagaria és mtsai., 2025; Uddin és mtsai., 2018). A ciklusos igénybevétel növekedése túlmutat a tisztán műszaki paramétereken. A hatások életciklus-fókuszú értékelése szorosan összefonódik az akkumulátor degradációjával. A gyakoribb ciklizálás és az ebből fakadó gyorsabb öregedés hatást gyakorol az élettartam során megtehető kilométerek számára, illetve az akkucsomag csereigényére. Következésképpen, a degradáció mértéke az LCA-kimenetek irányát és nagyságrendjét is meghatározza (Preis & Biedenbach, 2023; Ravi & Aziz, 2022).

2.5.3 A V2G szerepe az energiarendszer karbonintenzitásának csökkentésében életciklus-alapú megközelítésben

A V2G-technológia életciklus-fókuszú értékelése kizárólag a közlekedési fázis közvetlen kibocsátásain túlmutató, a villamosenergia-hálózatban kiváltott üzemviteli változásokat is számszerűsítő jellege esetén tekinthető módszertanilag megalapozottnak. A kétirányú energiacserére alkalmas, elosztott akkumulátorkapacitás a terhelési profilok időbeli újrendezése és a kiegyenlítési igény módosítása révén befolyásolja a kiszorított termelés jellegét. A környezeti hatás értelmezése így következmény-logikájú kontextusban kapcsolható legszorosabban a hálózati hatásokhoz. Ebben a megközelítésben a meghatározó tényező az aktiválás időzítése és kontextusa. A vezérelt töltés és a visszatáplálás hatása a termelési mix összetételével, a hálózati korlátokkal és a megújuló termelés változékonyságával párhuzamosan alakul. Kiemelt terület a nap- és szélenergia integrációja (Ravi & Aziz, 2022; Adegbohun és mtsai., 2024). A technológia megfelelő irányítás esetén mérsékelheti a kiegyenlítő energiaigényt és a rendszerüzem karbonintenzitását. A kimenetek nagyságrendje ezzel szemben a rendszerállapot és a szabályozási-kereskedelmi környezet függvénye marad (Darani és mtsai., 2021).

A funkcionális egység kijelölése a vizsgálat céljától függően az egységnyi rugalmas szolgáltatás hálózati hatására, esetleg a részvétel időegységre vetített, aggregált hatására építhető. Ez a lépés a későbbi összehasonlíthatóság kritériumait is meghatározza. Következmény-fókuszú rendszerben a marginális emissziós tényezők alkalmazása illeszkedik a többlethatás megragadásához. Az átlagos tényezők ezzel szemben a rendszerállapotok viszonylatában végzett leíró összevetést támogatják, és eltérő interpretációs tartományt jelölnek ki.

A rendszerhatár kijelölése az üzemviteli hatások és az akkumulátoröregedés következményeinek integrálásával válik teljessé. A hálózati beruházások beágyazott kibocsátásai ezzel párhuzamosan kizárólag azon esetben vezethetők be robusztusan, amikor a csúcsterhelés tartós és helyspecifikus mérséklődése a bővítések időbeli eltolásával összekapcsolható.

Az időbeli felbontás a V2G vonatkozásában a következtetések előfeltétele. A hatásmechanizmus ugyanis az üzemállapotok időbeli szerkezetéhez kötődik. A profilok legalább napi léptékű, szezonális eltéréseket is megkülönböztető kezelése következőképpen jelentősen befolyásolja az eredőket. A degradáció beemelése egyben hozzárendelési problémát jelent. Az öregedésből fakadó többletterhelés a hálózati szolgáltatás és a közlekedési funkció között különböző elvek nyomán osztható meg. Az alkalmazott allokációs szabály az életciklus-mérleg nagyságrendjét is módosítja (Figgenger és mtsai., 2022; Adegbohun és mtsai., 2024).

A villamosenergia-rendszer karbonintenzitásának alakulása a marginális termelés és az üzemvitel időbeli szerveződésének összefüggésében értelmezhető. A vezérelt töltés és a visszatáplálás a terhelési csúcsok mérséklésével és az alacsonyabb terhelésű időszakok kihasználásával olyan üzemállapot-váltásokat eredményezhet, amelyek a kiszorított termelés típusától függően a fajlagos emissziós tényező csökkenéséhez és a megújuló termelés korlátozásának mérsékléséhez vezethetnek. Az integrált energiagazdálkodási megoldásokat bemutató kutatások a járműakkumulátorok rugalmas erőforrásként történő bevonását a fosszilis kiegyenlítés igényének csökkentésével kapcsolják össze, ami az ellátott villamos energia életciklus-kibocsátási mérlegét kedvező irányba mozdíthatja (Habib és mtsai., 2020; Ravi & Aziz, 2022). Városi környezetben az elosztóhálózati csúcsok mérséklése a veszteségek és a kapacitásszűkösség kezeléséhez is hozzájárulhat. A lokális externáliák változása ezzel párhuzamosan kiegészítő társadalmi dimenzióként azonosítható, de nem az energetikai LCA-érvelés elsődleges bizonyítási tengelye (Karon, 2022; Klingert & Lee, 2022). A *smart city* szemléletben a mobilitási és energetikai alrendszerek összekapcsolása következőképpen a szektorok viszonylatában koordináció kérdéseként definiálható (Leal Filho és mtsai., 2021; Stecula és mtsai., 2023).

A V2G további releváns hatásterülete a hálózati rendszerszolgáltatásokhoz kapcsolódik, kiemelten a gyors reagálást igénylő szabályozási feladatok vonatkozásában.

Ilyen alkalmazások kontextusában a hagyományos tartalékok részleges kiváltása a készenléti fosszilis kapacitások üzemeltetésének mérséklése révén közvetett kibocsátáscsökkentést eredményezhet. A kimenetek vizsgálata azonban a marginális emissziós profil és az üzemviteli környezet

együttes figyelembevételét igényli. A frekvenciatartási funkciók kereskedelmi és műszaki feltételeit vizsgáló empirikus elemzések a részvétel gazdasági racionalitását a szabályozási paraméterek változásával kiegészülve értelmezik. Az összefüggés a környezeti mérleg kontextusfüggőségét is alátámasztja (Adegbohun és mtsai., 2024; Figgener és mtsai., 2022).

A hálózati infrastruktúra-igények alakulása a V2G értelmezésében akkor kapcsolható össze érdemi környezeti következtetésekkel, ha a csúcsterhelés mérséklődése tartósan ugyanazon elosztói korlátnál jelentkezik, és ez a bővítési döntések időzítését ténylegesen befolyásolja. A parkolási és hozzáférési mintázatok vizsgálata azt mutatja, hogy a hálózati előnyök érzékenyen függenek az otthoni, munkahelyi és nyilvános csatlakozási lehetőségek arányától, valamint a térbeli-időbeli koncentrációtól, ami a beágyazott kibocsátásokra vonatkozó levezetéseket is feltételes tartományba helyezi (Nagel és mtsai., 2024).

Az életciklus-mérleg alakulását jelentősen befolyásolja az akkumulátor-degradáció. A többletciklusok ugyanis a csereigény időzítése révén a gyártási életciklus-terhek újraeloszlását idézhetik elő. A V2G környezeti értékelése következőképpen a degradáció explicit modellezésével és a hozzárendelési elv rögzítésével formálódik konzisztenssé. A bidirekcionális töltési stratégiák optimalizációja során a degradációs terhek beépítése azon vezérlést támogatja, amely a kereskedelmi célok mellett életciklus-logikai szempontból is kímélő üzemmódokhoz igazodhat (Preis & Biedenbach, 2023). A Jeju-szigeti tapasztalatokra építő elemzések azt jelzik, hogy megfelelő ösztönzők és vezérlési keretek mellett a gyakorlati működés összhangba hozható energiahatékonysági és társadalmi-gazdasági célokkal, ami az öregedési kockázatok kezelhetőségét erősíti (J.-W. Lee és mtsai., 2024). E megközelítésben a degradáció nem kizárólag korlátként, hanem tervezési feltételként értelmezhető, amennyiben az aggregátori üzleti modellek és a szabályozási környezet képesek az öregedés hatásának internalizálására (Adegbohun és mtsai., 2024; Preis & Biedenbach, 2023).

A rendszerszintű környezeti eredők realizálása intézményi és üzleti feltételekhez kötődik. A rugalmassági funkciók tényleges hatása ugyanis az aktiválás jogosultságain, az elszámolási mechanizmusokon és a szereplők koordinációja révén érvényesül. A smart és bidirekcionális töltés szakpolitikai tapasztalatait szintetizáló áttekintések a piacra lépés, az ösztönzőrendszer és a fogyasztói bizalom együttesét tekintik meghatározónak. A tényezők a következmény-alapú értelmezések gyakorlati érvényesülésének keretfeltételeit jelölik ki (Zahler és mtsai., 2024).

Az LCA-fókuszú értelmezés kiterjeszhető a megosztott mobilitás és az energiaközösségek kontextusára is, ahol a környezeti mérleg a kihasználtság, az üzemeltetési paraméterek és a helyi energiamix kölcsönhatásában alakul. A V2G-t integráló carsharing konstrukciók elvi szinten a rendszerhatás kedvező irányú alakítását támogathatják, amennyiben a töltés és a visszatáplálás a helyi megújuló termeléssel és hálózati igényekkel összehangolt (Levin & Richt Hannema, 2024; Vélez, 2023). Az energiaközösségek és az elektromobilitás kapcsolatát elemző empirikus adatok a helyi koordináció és az épített környezethez illesztett energiamenedzsment szerepét hangsúlyozzák. Ez a kapcsolódás a rugalmassági funkciók és a dekarbonizáció lokális összekapcsolását biztosíthatja (Correia Sinézio Martins és mtsai., 2024). Az aggregátori működésről szóló vizsgálatok a fentiekkel összhangban a csoportosított részvételt a tömeges kiterjesztés egyik feltételével hozzák összefüggésbe, amennyiben a kereskedelmi jogosultságok és elszámolási szabályok ezt támogatják (Amamra & Marco, 2019).

A V2G dekarbonizációs potenciálja életciklus-bázisú kontextusban a gyakorlatban kizárólag a funkcionális egység és a scenárió-összevetés világos kijelölése esetén kalkulálható következetesen. További követelmény a marginális emissziós tényezők időbeli és térbeli változékonyságának kezelhetősége, továbbá az akkumulátor-degradáció rendszeroptimalizálási és hozzárendelési szintű integrált érvényesülése (Adegbohun és mtsai., 2024; Preis & Biedenbach, 2023; Ravi & Aziz, 2022)(Ravi és Aziz, 2022; Adegbohun és mtsai., 2024; Preis és Biedenbach, 2023).

A következmény-alapú, órás felbontású és marginális emissziós tényezőkre épülő értelmezés a V2G-hatások elméleti referencia-keretét jelöli ki. A disszertáció empirikus számszerűsítése ezzel párhuzamosan operacionalizált, egyszerűsített megközelítésben közelíti a karbonintenzitás alakulását. A vizsgálat e kontextusban az összehasonlítható indirekt kibocsátási számításokat, az akkumulátoröregedés és az egységnyi energiaszolgáltatásra vetített életciklus-terhek összekapcsolását, továbbá aggregált scenáriók segítségével értelmezett makrohatásokat integrálja. A módszertan biztosítja a környezeti eredő következetes levezetését a rendelkezésre álló adatok alapján.

3. Anyag és módszer

A kutatás módszertani kerete három egymásra épülő szintből áll. A struktúrát a 3.1. ábra foglalja össze. Az alsó szintet a kutatási stratégia, a szisztematikus szakirodalmi háttér és a másodlagos statisztikai, kereskedelmi és hálózati adatbázisok képezik. A középső szint kvantitatív modelljei ezen alapra épülnek. Ide tartozik a régióspecifikus TCO-modell, az elektromos autómegosztás gazdasági fenntarthatóságát vizsgáló benchmarking és Monte Carlo-szimuláció, kiegészülve az EU-tagállamok összehasonlítását lehetővé tevő indikátorrendszerrel és klaszterezési logikával.

A felső szintet az életciklus- és scenárióalapú környezeti értékelési keret, a V2G-technológia mikro- és makroszintű hatáselemzése, továbbá a gazdasági, műszaki és viselkedésalapú ösztönzők elemzési módszertana alkotja. A 3. fejezet struktúrája a háromszintű felépítést követi. A szakasz mind a nyolc tézis módszertani megalapozását strukturált módon rendezi egységbe.

3.1 Kutatási stratégia és adatforrások

Ebben az alfejezetben azoknak az adatforrásoknak és indikátorcsoportoknak az áttekintése szerepel, amelyek a későbbi gazdasági, regionális és életciklus-elemzések közös alapját adják, különös tekintettel a közép-európai és magyar kontextusra. A kutatás háromszintű módszertani keretét a 2. táblázat összegzi.

A kvantitatív elemzések magját olyan, nyilvánosan elérhető, hiteles adatforrások adják, amelyek az elektromobilitás, a töltőinfrastruktúra és az energiarendszer fő jellemzőit rögzítik. Ide tartoznak az európai szintű központi adatbázisok (például EAFO, ACEA, Eurostat), a hivatalos uniós és nemzeti statisztikák, valamint az elektromos járművekre és töltőinfrastruktúrára vonatkozó szakpolitikai stratégiák és cselekvési tervek. A magyar piac sajátosságait hazai szakpolitikai dokumentumok, ágazati jelentések és piaci háttéranyagok egészítik ki. Az ár- és költségadatokat egységesen euróban kerültek feldolgozásra; az eltérő pénznemű források a vizsgálati időszakra jellemző átlagos árfolyamok alapján kerültek átszámításra, az idősoros elemzéseknél pedig egységes bázisév biztosítja az évek közötti összevethetőséget.

Módszertani szint	3. fejezet alfejezet	Rövid leírás	Kapcsolódó tézis(ek)
Felső	3.6 M1: Gazdasági, technológiai és viselkedésalapú ösztönzők elemzésének módszertani kerete	Ösztönzőtípusok tipológiája, kódolása és hatásuk elemzése a V2G-kompatibilis járműflották hálózati részvételére	M1
	3.7 K2, K3: Mikro- és makroszintű környezeti hatáselemzési keret: akkumulátor-degradáció és szektorszintű karbonmegtakarítás	Akkumulátor-degradációs modell (mikroszint) és V2G-flották szektorszintű CO ₂ -megtakarítási potenciáljának értékelése (makroszint)	K2, K3
	3.7 K1, K2, K3: Életciklus- és scenárióalapú környezeti értékelési keretrendszer	BEV/ICEV életciklus-CO ₂ -értékelés, használati scenáriók, energiafogyasztás, villamosenergia-mix és emissziós számítások közös kerete	K1, K2, K3
Középső	3.6 M1: Nemzetközi V2G-pilotprojektek kiválasztása és kvalitatív elemzési kerete	V2G-pilotprojektek adatbázisa, kiválasztási szempontok és kvalitatív elemzési keret	M1
	3.4 R1, 3.5 R2: Az elektromos járműpiac egységes összehasonlítása az Európai Unióban: indikátorrendszer és klaszterezési logika	EV-penetráció, töltőinfrastruktúra-sűrűség és villamosenergia-mix alapján felépített indikátorrendszer és klaszterképzés	R1, R2
	3.3 G2: Az elektromos autómegosztás gazdasági fenntarthatóságának módszertani kerete: benchmarking és Monte Carlo-szimuláció	E-carsharing benchmarking, cash-flow modell és Monte Carlo-alapú sztochasztikus szimuláció	G2
	3.2 G1: Régióspecifikus TCO-modell felépítése	BEV-ICEV TCO modell magyar és régiós paraméterezéssel	G1
Alsó	3.1 Kutatási stratégia és adatforrások	Kutatási stratégia, szakirodalmi háttér és a statisztikai, piaci, hálózati adatbázisok közös kerete	G1, G2, R1, R2, K1, K2, K3, M1

2. táblázat A kutatás háromszintű módszertani kerete Forrás: saját szerkesztés

Az alkalmazott indikátorok a 3. táblázatban találhatóak, amelyek számos, egymással összefüggő csoportba rendezhetők. A járműpiaci és

költségmutatók a modellek és a mobilitási megoldások gazdasági jellemzőit írják le. Ide tartoznak például a járműbeszerzési árak, a maradványértékek, az éves futásteljesítmények, az energiahordozók átlagos fogyasztási értékei és fogyasztói árai. A kategória részét képezik továbbá az adók és díjak, kiegészülve az üzemeltetési és karbantartási terhekkel.

A járműmegosztó konstrukciók vonatkozásában a flottaméret, a járműenkénti kihasználtság, a díjszabási struktúra és a fő költségkategóriák (jármű-, energia-, parkolási és egyéb üzemviteli kiadások) alkotják az indikátorbázist. Az adatsorok néhány, összességében 3–4 közép-európai nagyváros – köztük budapesti – szolgáltatóinak számos évre vonatkozó, nyilvánosan elérhető adatain, szakmai beszámolóin és ágazati háttéranyagain alapulnak.

A regionális és energetikai mutatók alkalmazása teremt alapot az egyes országok elektromobilitási és energiarendszeri fejlettségének komparatív értékeléséhez. Az elektromos modellek elterjedtségét az adott országban forgalomban lévő aktív állomány és a teljes személygépkocsi-flotta aránya reprezentálja.

A töltőinfrastruktúrát a nyilvános töltőpontok száma és sűrűsége (például töltőpont / 100 000 lakos, töltőpont / 100 km²) jellemzi; a mutatók kizárólag a ténylegesen nyilvános, AC és DC töltőpontokat tartalmazzák. Az energiamixet a villamosenergia-termelés források szerinti megoszlása írja le, míg a karbonintenzitást az egységnyi villamosenergia-termelésre jutó üvegházhatásúgáz-kibocsátás jellemzi.

A környezeti életciklus-elemzéshez alkalmazott mutatók a BEV-ek akkumulátorainak gyártásához, használatához és lehetséges másodlagos felhasználásához kapcsolódnak. A modell azon paramétereket integrálja, mint az akkumulátor gyártásához tartozó fajlagos energiafelhasználás és üvegházhatásúgáz-kibocsátás. Ide tartozik a használat alatti ciklusszám és terhelési profil, az egyszerűsített degradációs jellemzők, a szekunder felhasználás és a hálózati rugalmassági szolgáltatásokban való részvétel feltételezett intenzitása. A szekunder felhasználás indikátorai fix telepítésű energiatárolási forgatókönyvekre (például háztartási, esetleg kisipari energiatároló rendszerekre) vonatkoznak.

Az adatbázis felépítésekor alapelv volt az adattisztaság és az összehasonlíthatóság biztosítása. Az egymást átfedő források vonatkozásában konzisztencia-ellenőrzés történt, a nyilvánvaló ellentmondást tartalmazó megfigyelések pedig kizárásra kerültek. A hiányzó értékek pótlása kizárólag azon esetekben történt meg, melyeknél az egyszerű, átlátható eljárások (például rövid időszorra épülő interpoláció, illetve szomszédos kategóriák nyomán végzett becslés) nem torzították számottevően az indikátorok szerkezetét. Az ennél nagyobb

bizonytalansággal terhelt adatok nem kerültek bevonásra a kompozit mutatók számításába. Az egyes indikátorok egységeinek, definícióinak és aggregációs szintjének harmonizálása biztosítja az azonos fogalmi keret érvényesülését az összehasonlító elemzésekben.

Indikátorcsoport	Fő mutatók (példák)	Földrajzi lefedettség	Fő adatforrások	Kapcsolódó elemzési terület
Járműpiaci és TCO-indikátorok	Beszerezési ár, maradványérték, éves futásteljesítmény, energiaárak, adók, díjak, üzemeltetési költségek	EU27, kiemelten Magyarország	EAFO, ACEA, uniós és nemzeti elektromobilitási stratégiák, hazai szakpolitikai és piaci dokumentumok	Elektromos és konvencionális járművek költség-elemzése
Járműmegosztási indikátorok	Flottaméret, járművenkénti kihasználtság, díjszabási struktúra, költségkategóriák	Közép-európai nagyvárosok, Magyarország	Piaci háttéranyagok, szolgáltatói adatok, szakmai beszámolók	Elektromos járműmegosztó szolgáltatások gazdasági vizsgálata
Elektromobilitási terjedési mutatók	EV-penetráció (EV / összes személyautó), éves új értékesítés	EU27, régiós bontás	EAFO, ACEA, hivatalos statisztikák	Országok elektromobilitási pozíciójának összehasonlítása
Töltőinfrastruktúra mutatók	Nyilvános töltőpontok száma és sűrűsége (töltőpont / 100 000 lakos, töltőpont / 100 km ²)	EU27, régiós bontás	EAFO, nemzeti elektromobilitási tervek	Hálózati elérhetőség és infrastruktúra-fejlettség értékelése
Energiamix és karbonintenzitás	Villamosenergia-termelés források szerinti megoszlása, fajlagos üvegházhatásúgáz-kibocsátás	EU27, kiemelten Közép-Európa	Uniós és nemzeti energiastatisztikák, energiapolitikai dokumentumok	Fenntarthatósági és regionális összehasonlító elemzések
Akkumulátor-LCA mutatók	Gyártási fajlagos energia- és emissziós értékek, ciklusszám, terhelési profil, degradációs paraméterek	Nemzetközi, technológia-specifikus	LCA-tanulmányok, gyártói adatok, szakirodalmi források	Elektromos járművek és V2G-szenáriók életciklus-elemzése

3. táblázat A kutatás során alkalmazott indikátorrendszer, az adatforrások és a kapcsolódó elemzési területek összefoglalása Forrás: saját szerkesztés

3.2 G1: Régióspecifikus TCO-modell felépítése

A TCO-modell célja, hogy a BEV és ICEV járművek költségviszonyait egységes, összehasonlítható keretben írja le a személygépkocsik A, B, C és D szegmensében. A modell egységesen 7 éves birtoklási időtávval dolgozik, és három eltérő éves futásteljesítmény-szintet vesz figyelembe (12 000 km, 18 000 km, 40 000 km). A számítási keret az EAFO

kalkulátorának logikájára és a régióspecifikus TCO-számításokat bemutató hazai és nemzetközi szakirodalomra épül. A szegmensekhez konkrét, az EAFO-adatbázisban és a hazai piacon is jellemző típusok kerültek hozzárendelésre; a részletes járműlista az F1. táblázatban található.

A modell paraméterezése az egyes járműkategóriákra vonatkozó, országonként gyűjtött ár- és költségadatokra támaszkodik. A járműbeszerzési árak – új és a használt járműállomány vonatkozásában egyaránt – számos európai ország 24 online használtautó-adatbázisából, gyártói árlistákkal kiegészülve származnak.

A maradványértékek meghatározása a vizsgálati időszakra jellemző másodpiaci árak tükrében történik. Az energia- és üzemanyag-kiadások a nemzeti villamosenergia- és üzemanyagárakból származnak. A karbantartási, biztosítási és adóterhek ezzel párhuzamosan a régióra jellemző benchmarkadatokból és hivatalos díjtételekből kerülnek levezetésre. Az ár- és költségadatok kezelése a 3.1. alfejezetben bemutatott módon, egységes euró-alapon történik. A TCO-számítás alapképlete az összesített birtoklási terhet éves szintre vetítve határozza meg:

$$TCO = \frac{P_0 - P_r}{T} + \frac{C_f + C_m + C_i}{T}$$

ahol:

P_0 jármű induló ára (EUR)

P_r maradványérték a birtoklási időszak végén (EUR)

T vizsgált időtáv (év), a számításokban egységesen $T = 7$

C_f üzemanyag – vagy villamosenergia

– költségek összesített értéke a teljes T időszak alatt (EUR)

C_m karbantartási és szervizköltségek összesített értéke a teljes T időszak alatt (EUR)

C_i biztosítási és adókölségek összesített értéke a teljes T időszak alatt (EUR)

A képlet első tagja az amortizációból adódó évesített tőkeköltséget, a második tag az éves átlagos működési költségeket fejezi ki. A modellben a TCO-értékek egységesen éves szinten kerülnek kiszámításra, és szükség esetén 100 km-re vetítve is értelmezhetők, ami megkönnyíti a különböző járműszegmensek és használati profilok közötti összehasonlítást.

A változók és paraméterek egy része rögzített, más része scenáriófüggő. Fix paraméternek tekintendők például az adott járműtípushoz rendelt induló árak, a maradványérték-arányok, a karbantartási költségprofilok és a biztosítási–adóterhek szerkezete. Scenáriófüggő paraméterek közé tartoznak az éves futásteljesítmények, az energia- és üzemanyagárak, valamint azok a költségtételek, amelyek érzékenyen reagálnak a piaci és szabályozási környezet változásaira. A modell ezekhez a paraméterekhez minden esetben a 3.1 alfejezetben bemutatott adatforrásokból és

indikátorcsoportokból rendeli hozzá a megfelelő értékeket járműszegmensenként és használati profil szerint.

A scenárióstruktúra a járműszegmensek (A–D), a hajtástípus (BEV, ICEV), az éves futásteljesítmény (12 000 km, 18 000 km, 40 000 km) és a 7 éves birtoklási időtáv kombinációjára épül. Az így kialakuló scenáriómatrix biztosítja a TCO egységes szerkezetben történő értelmezhetőségét a különböző járműkategóriák és használati intenzitások függvényében. A keretrendszer elsősorban a közép-európai relatív költségpozíciók feltárását szolgálja, a konkrét jövőbeni ár-, árfolyam-, illetve keresleti pályák előrejelzése helyett.

A TCO-modell felépítése számos egyszerűsítő feltételezéssel él, melyek módszertani korlátként kezelendők. A kiadások aggregálása reálértéken, azonos árszínvonalra hozva történik. A kalkuláció nem alkalmaz expliciten diszkontrátát, a vizsgálat célja ugyanis a hajtástípusok viszonylatában fennálló relatív költségpozíciók összehasonlítása.

A kisebb volumenű, egyszeri adminisztratív költségelemek (például forgalomba helyezési és regisztrációs díjak, kisebb javítások) aggregált „egyéb” kategóriában kerültek elszámolásra. A maradványérték-kezelés az elemzett időszak használati viszonyaira épül, és nem terjed ki minden lehetséges kereskedelmi sokk, esetleg szabályozási változás explicit modellezésére. A fenti feltételezések biztosítják a modell kellő egyszerűségét a régiós összehasonlítások elvégzéséhez. A módszertan mindazonáltal alkalmas a BEV és ICEV modellek költségviszonyainak érdemi, kvantitatív vizsgálatára.

3.3 G2: Az elektromos autómegosztás gazdasági fenntarthatóságának módszertani kerete: benchmarking és Monte Carlo-szimuláció

A G2-modell célja az elektromos autómegosztási rendszerek és homogén EV-flották gazdasági fenntarthatóságának kvantitatív értékelése szolgáltatói nézőpontból. A modell a városi carsharing-szolgáltatások (Budapest, Pozsony, Bukarest) bevételi–költségstruktúráját írja le, és a flotta-szintű cash-flow alakulását vizsgálja. A bemenő ár-, költség- és mennyiségi paraméterek a 3.1 alfejezetben bemutatott adatforrásokra és indikátorokra épülnek (nemzeti statisztikák, energiahordozó-árak, flottabeszámolók, szolgáltatói adatok), kiegészítve a vizsgált operátorok publikus pénzügyi kimutatásaival.

3.3.1 Deskriptív benchmarking és inputparaméterek

A deskriptív benchmarking célja, hogy normalizált kulcsteljesítménymutatók (key performance indicator, KPI) segítségével

összehasonlíthatóvá tegye a közép-európai e-carsharing-szolgáltatók üzleti teljesítményét, és empirikus alapot szolgáltatson a G2-modell paraméterezéséhez. A minta budapesti, pozsonyi és bukaresti szolgáltatókat foglal magában, a vizsgált évek auditált beszámolóí, kiegészítő flotta-információi és működési adatai alapján. A környezeti-keresleti háttérváltozókat (pl. publikus töltőpont-sűrűség, felhasználói penetráció) a 3.1-ben ismertetett európai és nemzeti adatbázisokból származnak.

A benchmarking keretben minden szolgáltató esetében egységes definíciók szerint kerül kiszámításra, néhány kiemelt KPI alapján: az árbevétel járművenként (éves nettó árbevétel/flottajármű), az EBITDA-margin (EBITDA/árbevétel), a járművenkénti átlagos napi bérlésszám (db/nap), a flotta-átlagéletkor (év), a publikus AC/DC töltőpontok sűrűsége (db/100 km²), valamint a regisztrált felhasználók penetrációja (fő/1000 lakos). A mutatók járműre, napra, illetve területegységre vetítve kerülnek normalizálásra, szükség esetén logaritmikus transzformációval a szélsőértékek kezelésére. A normalizált KPI-mátrix a F2. táblázatban található. A G2-modell ezeknek a mutatóknak a tartományaiból és középértékeiből indul ki a bevételi és költségparaméterek kalibrálásához.

3.3.2 Determinisztikus bevétel–költség modell

A carsharing/flotta-modell alapja egy determinisztikus bevétel–költség keret, amely egy járműre vetítve írja le az éves pénzáramokat. A járművenkénti éves árbevétel képlete:

$$R = pt * H + pkm * KM$$

ahol:

$$R = \text{éves árbevétel járművenként} \left(\frac{EUR}{\text{év}} \right)$$

$$pt = \text{időalapú tarifa} \left(\frac{EUR}{\text{perc}} \right)$$

$$H = \text{éves bérlési idő járművenként} \left(\frac{\text{perc}}{\text{év}} \right)$$

$$pkm = \text{kilométeralapú tarifa} \left(\frac{EUR}{\text{km}} \right)$$

$$KM = \text{éves futásteljesítmény járművenként} \left(\frac{\text{km}}{\text{év}} \right)$$

A fix költségek járművenként:

$$C_{fix} = C_{amort} + C_{admin} + C_{parking}_{fix}$$

ahol:

C_{fix} = éves fix költség járművenként $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

C_{amort} = éves amortizáció $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

C_{admin} = adminisztratív és overhead jellegű költségek $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

$C_{parking_{fix}}$ = fix parkolási és engedélyezési díjak $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

A változó költségek járművenként:

$C_{var} = C_{energy} + C_{maintenance} + C_{parking_{var}} + C_{other}$
ahol:

C_{var} = éves változó költség járművenként $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

C_{energy} = töltési energia költsége $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

$C_{maintenance}$ = karbantartási és szervizköltség $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

$C_{parking_{var}}$ = használattal arányos parkolási költségek $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

C_{other}

= egyéb forgalomfüggő költségek (pl. gumiabroncs, tisztítás; $\frac{EUR}{\text{év}}$)

Az éves eredmény (üzemi szintű járművenkénti profit) a következőképpen adódik:

$$P_i = R - (C_{fix} + C_{var})$$

ahol:

P_i = éves üzemi eredmény (profit) járművenként $\left(\frac{EUR}{\text{év}}\right)$

3.3.3 Cash-flow és Monte Carlo-szimuláció

A beruházási döntések értékeléséhez a determinisztikus keretet többéves cash-flow modellel egészíti ki a G2-modell. Az egy járműre vetített nettó jelenérték (NPV) általános alakja:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \left(\frac{CF_t}{(1+r)^t} \right) - I_0$$

ahol:

NPV = nettó jelenérték (EUR)

$Cf_t = a t - \text{edik év nettó pénzárama járművenként} \left(\frac{EUR}{\text{év}} \right)$

$T = \text{vizsgált időtáv (év)}$

$r = \text{diszkontráta (-)}$

$I_0 = \text{kezdeti beruházási költség járművenként (EUR)}$

A modell az NPV-vel kiegészülve kalkulálja a Belső Megtérülési Rátát (Internal Rate of Return, IRR), a megtérülés időpontját jelző break-even évet, továbbá a flottafókuszú EBITDA-marzsot. A gazdasági fenntarthatóság értékelése nemcsak pontbecslések, sokkal inkább eloszlások nyomán valósul meg. A bizonytalan bemenő paraméterekre következésképpen Monte Carlo-szimuláció készül.

A szimuláció a kulcsfontosságú, bizonytalanoknak tekintett paraméterekre terjed ki. Ide tartozik kiemelten a járművenkénti napi bérlésszám, az átlagos percdíj és kilométerdíj, a töltési energiaár, a karbantartási és akkumulátor-degradációs egységköltség. A kihasználtságot leíró H és KM változók esetében a bérlésszám jellemzésére Poisson-típusú eloszlás, az árparaméterekre aszimmetrikus (például lognormális) eloszlás, az energiaárakra pedig idősoros (AR(1)-típusú) struktúrával kombinált valószínűségi eloszlás alkalmazható. Az egyes paraméterek eloszlásait a szolgáltatói történeti adatok és a releváns szakirodalom alapján kalibrált várható érték és szórás jellemzi.

Egy Monte Carlo-szimulációs futtatás során minden iterációban generálódik egy paramétervektor (kihasználtság, tarifa, energiaár, karbantartási egységköltség, V2G-bevétel stb.). A folyamat következő lépése a járművenkénti és flotta-vetített cash-flow pálya képletekre épített meghatározása. A keretrendszer jellemzően számos ezer iterációt alkalmaz, így empirikus eloszlások nyerhetők az NPV, az IRR és az EBITDA-marzs számára. A kockázati profil értékelése a kimeneti eloszlások sűrűségét és kvantilis-szintjeit veszi figyelembe a negatív tartományba forduló projektek valószínűségének megragadása céljából. A vizsgálat különböző gazdasági és szabályozói kondíciók függvényében zajlik.

3.3.4 Szenáriók, érzékenységvizsgálat és módszertani korlátok

A G2-modell három, egymástól jól elkülöníthető szenáriócsoportot alkalmaz a paramétertartományok feltérképezésére. A támogatás-elvonási szenáriók a parkolási kedvezmények, energiaár-plafonok és egyéb implicit támogatási elemek fokozatos megszűnésének hatását vizsgálják a változó költségek és a cash-flow volatilitás alakulására. A tarifa-optimalizálási szenáriók az idő- és kilométerdíjak több szinten történő módosításával írják le a bevételi oldal érzékenységét, míg a kihasználtság-fokozási

scenáriók a járművenkénti napi bérlésszám és futásteljesítmény növekedésének hatását modellezik, például relokációs és dinamikus árazási beavatkozások feltételezése mellett. Minden scenárió esetében determinisztikus paraméterkombinációkhoz kapcsolódnak a Monte Carlo-szimulációs futások, így a projekteredmények eloszlása külön-külön is vizsgálható.

A G2-modell számos egyszerűsítő feltételezéssel él, mely tényezők módszertani korlátként kezelendők. A keretrendszer homogén járműflottát tételez fel, egységes műszaki paraméterekkel és költségprofilokkal. A tarifák és fő ráfordítások scenáriókon belül időben állandónak tekinthetők, a költségfüggvények pedig főként lineárisak a használati intenzitás függvényében. A kalkuláció a modellek folyamatos rendelkezésre állását feltételezi, a szélsőséges kereskedelmi sokkokat, illetve szabályozói ugrásokat pedig kizárólag bizonyos fokig, paramétereltolások formájában reprezentálja.

A modell a fentiekkel összhangban nem komplett ágazati előrejelzésre szolgál. A cél sokkal inkább a közép-európai elektromos autómegosztás és EV-flották gazdasági fenntarthatóságának és kockázati profiljának összehasonlítható, scenárióalapú vizsgálata.

3.4 R1: Az elektromos járműpiac egységes összehasonlítása az Európai Unióban: indikátorrendszer és klaszterezési logika

Az indikátoralapú összehasonlításra és konszenzusos klaszterezési logikára épülő módszertani keret célja az Európai Unió 27 tagállama elektromobilitási teljesítményének egységes, reprodukálható és multidimenzionális struktúrában történő összehasonlíthatóvá tétele. Az elemzési egység a tagállami, a bemenő adatok pedig európai és nemzeti statisztikai forrásokra épülnek, amelyeket a 3.1 alfejezet ismertet. A módszertan három kulcsindikátorra támaszkodik: a BEV-ek lakosságarányos penetrációjára (EV/1000 fő), a nyilvános töltőinfrastruktúra lakosságarányos sűrűségére (töltőpont/100 000 fő), valamint az alacsony karbonintenzitású villamosenergia-termelés arányára. A három dimenzió együttes kezelése biztosítja az országok műszaki adaptációjának, infrastruktúra-hozzáférhetőségének és energiarendszeri dekarbonizációjának ugyanazon értelmezési kontextusban történő összevetését. Az elektromobilitás fenntarthatósági profilja így nem egyetlen mutató mentén, sokkal inkább a három pillér kombinációjaként definiálható (Ghadikolaei és mtsai., 2021; Horváth és mtsai., 2023; International Energy Agency, 2024).

Az indikátorrendszer arányosított mutatókat alkalmaz, hogy az országméretből és piacvolumenből fakadó torzítások mérséklődjenek. Az

EV/1000 fő mutató az elektromos járműállomány társadalmi beágyazottságát közelíti, míg a töltőpont/100 000 fő a töltési infrastruktúra elérhetőségét és a hozzáférési korlátok várható mértékét reprezentálja. Az alacsony karbonintenzitású villamosenergia-arány (%) a villamosenergia-bázisú közlekedés kibocsátáscsökkentési potenciáljának adott energiarendszeri háttér kontextusában történő érvényesülését jelzi. A dimenzió következképpen közvetlenül kapcsolja össze az elektromobilitási teljesítményt az energiamix dekarbonizációjának állapotával. A három indikátor egyenlő súllyal szerepel a kompozit értékelésben, mivel mindhárom dimenzió szükséges, ugyanakkor önmagában egyik sem elégséges feltétele a fenntartható elektromobilitásnak; a kombinált értelmezés csökkenti az egyoldalú indikátoralapú következtetések kockázatát, és egyben támogatja a szakpolitikai beavatkozások differenciált értelmezését (Ghadikolaei és mtsai., 2021; Horváth és mtsai., 2023).

Az indikátorok eltérő skálája és eloszlása miatt az összehasonlíthatóság standardizálási és normalizálási eljárásokkal biztosítható. A statisztikai összevethetőség alapját a z-score transzformáció adja. Ez az eljárás az egyes indikátorok értékeit az EU27-en számított átlaghoz és szóráshoz viszonyítja. A transzformáció eredményeként minden mutató közös skálán, nulla középértékkel és egységnyi szórással kezelhető. Egyik dimenzió sem dominálhat így mesterségesen pusztán mértékegysége, esetleg szórásnagysága miatt. A standardizálás képlete az alábbi formában érvényesül:

$$z_i = \frac{(x_i - \mu)}{\sigma}$$

ahol:

x_i = az adott indikátor nyers értéke az i – edik országra

μ = az indikátor EU27 – en számított adott évi átlaga

σ = az indikátor EU27 – en számított adott évi szórása

z_i = a standardizált érték az i – edik országra

A z-score értékek alapján, egyenlő súlyozással, egy összesített standardizált kompozit is képezhető, amely a három pillér közös pozícióját fejezi ki:

$$z_i = \frac{(z_i^{EV} + z_i^{CI} + z_i^{LC})}{3}$$

ahol:

z_i^{EV} = EV – penetrációhoz (vagy a választott EV mutatóhoz) tartozó z – score az i – edik egységénél

z_i^{CI} = hálózati CO2 intenzitáshoz (carbon intensity, CI) tartozó z – score az i – edik egységénél

z_i^{LC} = töltőinfrastruktúrához (pl. töltőpont – sűrűség) tartozó z – score az i – edik egységénél

A z-score mellett kiegészítő jelleggel min–max normalizálás is készül, amely elsősorban szemléltetési és illusztratív célokat szolgál azáltal, hogy az indikátorértékeket 0 és 1 közé skálázza, mindhárom dimenzió egyenlő súlyozással rendelkezik. Ez a transzformáció a következő alakban kerül megadásra:

$$x_i^{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

ahol:

x_{norm_i} = a normalizált érték az i – edik országra

x_{min} = az adott indikátor minimuma az EU27 országai között

x_{max} = az adott indikátor maximuma az EU27 országai között

A klaszterezés és az adatok értelmezése azonban nem egyetlen számítási logikára támaszkodik. A robusztusságot a három, egymást kontrolláló megközelítés párhuzamos alkalmazása biztosítja. A módszerek mindegyike önálló besorolást eredményez, majd a végső klasztercímke ezekből többségi egyezés nyomán formálódik.

A relatív pozíciók stabilitását egy rangsor alapú kompozit pontszám is ellenőrzi. A mechanizmus mindhárom indikátorra EU27-rangsor felállításával indul, majd a ranghelyek összege adja az összesített rangkompozit értéket. A rangsor alapú összegzés előnye a szélsőértékek hatásának mérséklése. A módszer közpolitikai szempontból intuitív, relatív helyzetképet ad. A rangkompozit definíciója:

$$Score_i^{rank} = Rank_i^{EV} + Rank_i^{CI} + Rank_i^{LC}$$

ahol:

$Score_i$ = összesített fenntarthatósági pontszám az –edik országra

$Rank_{EV/P}_i$ = az EV/P indikátor ranghelye az i – edik országra

$Rank_{CI/P}_i$ = a CI/P indikátor ranghelye az i – edik országra

$Rank_{RES\%}_i$ = a RES% indikátor ranghelye az i – edik országra

Az alacsonyabb Score_i érték magasabb elektromobilitási fejlettséget jelez, mivel a kedvezőbb indikátorértékek a rangsor elején helyezkednek el (Ghadikolaie és mtsai., 2021; Horváth és mtsai., 2023; International Energy Agency, 2024; Máthé és mtsai., 2025).

A klaszterezési logika célja azon országcsoportok kialakítása, amelyek az EV-penetráció, az infrastruktúra-hozzáférés és az energiarendszeri dekarbonizáció kombinációja mentén jól elkülöníthető fenntarthatósági mintázatokat képviselnek. A besorolás nem gépi tanulással algoritmusokra épül, sokkal inkább a három párhuzamos eljárásból (z-score-bázisú, min-max-fókuszú, rangsor-alapú) származó klasztercímkek összevetésével és konszenzusos kijelölésével készül:

$$C_i^{(maj)} = \text{mode}(C_i^{(z)}, C_i^{(mm)}, C_i^{(r)})$$

A módszerek viszonylatában fennálló konzisztencia országonként az egyező klasztercímkek számával jellemezhető, melynek értéke 3, 2, esetleg 1 lehet a három eljárás által adott azonos klasztercímkek számának függvényében. Az egyezési szint formálisan a lehetséges klaszterek halmazán belüli leggyakoribb címkeelőfordulás megszámlálásával definiálható a három módszer eredményei között:

$$A_i = \max_{c \in C} \sum_{m \in \{z, mm, r\}} \mathbf{1}(C_i^{(m)} = c)$$

ahol $A_i \in \{1, 2, 3\}$ -edik ország egyezési szintje. A robusztusság összesítő mutatóiként az egyezési szintek darabszámai adhatók meg az EU27-re. Az adatok a tökéletes egyezés, a részleges egyezés és az esetleges komplett széttartás előfordulását kvantifikálják:

$$N_{\{3/3\}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{1}(A_i = 3), \quad \text{quad}$$

$$N_{\{2/3\}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{1}(A_i = 2), \quad \text{quad}$$

$$N_{\{1/3\}} = \sum_{i=1}^N \mathbf{1}(A_i = 1)$$

E definíciók módszertani szerepe, hogy előre rögzített ellenőrzési logikát adnak a klaszterek stabilitásának értékeléséhez, és lehetővé teszik a határesetek elkülönítését az országcsoportok érdemi, szerkezeti különbségeitől. A végső klaszterstruktúra négy, szakpolitikai szempontból is értelmezhető csoportot különít el (fejlett piacok, gyorsan fejlődő piacok, magas potenciálú fejlődő piacok, feltörekvő piacok), amelyek a három pillér kombinációiból levezethető eltérő fenntarthatósági profilokat képeznek.

3.5 R2: V2G-hatás becslése a regionális termelés–fogyasztás kiegyenlítésében

A V2G regionális kiegyenlítő hatásának számszerű értékelése a 3.4 fejezetben rögzített hálózati kontextusok és a 3.7 fejezetben definiált energiamix-szenáriók közös keretében, egységes indikátorrendszer alkalmazásával történik. A gazdasági dimenzióban a felhasználói bevételindikátor (€/jármű/év) a primer frekvenciaszabályozási szolgáltatásokra vonatkozó, nemzetközi szakirodalomban és demonstrációs projektekben megfigyelt tipikus tartományok tükrében kerül meghatározásra. A rendszerszintű kiegyenlítési költségváltozás (€/MWh) ezzel szemben a szenáriókhöz illeszthető irodalmi becslésekből képzett költségproxyként szolgál. A hálózati dimenziót a csúcsterhelés-változás (%) és a rugalmassági index (%) írja le, amelyek a V2G-részvétel szenárióparamétereikhez rendeltelen jelennek meg; a részvétel ebben az értelemben a flotta csatlakoztatottságának és szolgáltatási rendelkezésre állásának aggregált kifejezője. A környezeti dimenziót a CO₂-intenzitás változása (% és gCO₂/kWh) reprezentálja, amelyet az energiamix-szenáriók időben változó karbonintenzitásához illetően, a V2G által kiváltott fosszilis kiegyenlítő termelés mérséklődésének logikájával szükséges értelmezni.

Az adatok konzisztenciáját a közös szenáriókeret biztosítja. A becslések érvényessége azonban feltételes: a bemutatott értéktartományok régió-, részvételi arány- és kereskedelmi hozzáférésfüggők. A számok következképpen nem tekinthetők egy adott hálózati topológia determinisztikus pontbecsléseinek. A módszertan célja ehelyett azon, irodalmi és modell-logikai szempontból koherens nagyságrendi hatások azonosítása, melyek az elemzett kontextusokban rendszerszinten releváns következményekkel járnak.

Az alkalmazhatóság gyakorlati korlátját a V2G ökonómiai és intézményi integrációja adja. A mérés, az elszámolás és az aggregáció működőképessége, továbbá az elosztóhálózati üzemviteli és szabályozási kritériumok teljesülése nélkül a technikai potenciál kizárólag korlátozottan fordítható át realizálható rendszerhatásokká.

3.6 M1: Nemzetközi V2G-pilotprojektek adatbázisa és kvalitatív elemzési kerete

A fejezet a nyilvánosan hozzáférhető V2G/V2X pilotprojektek dokumentációjára támaszkodó feldolgozási megközelítést rögzíti. A kialakított eljárás célja, hogy az adatok kinyerése és szervezése előre rögzített lépések mentén, követhető módon történjen, és a projektekben megjelenő, közpolitikai szempontból értelmezhető tapasztalatok egy

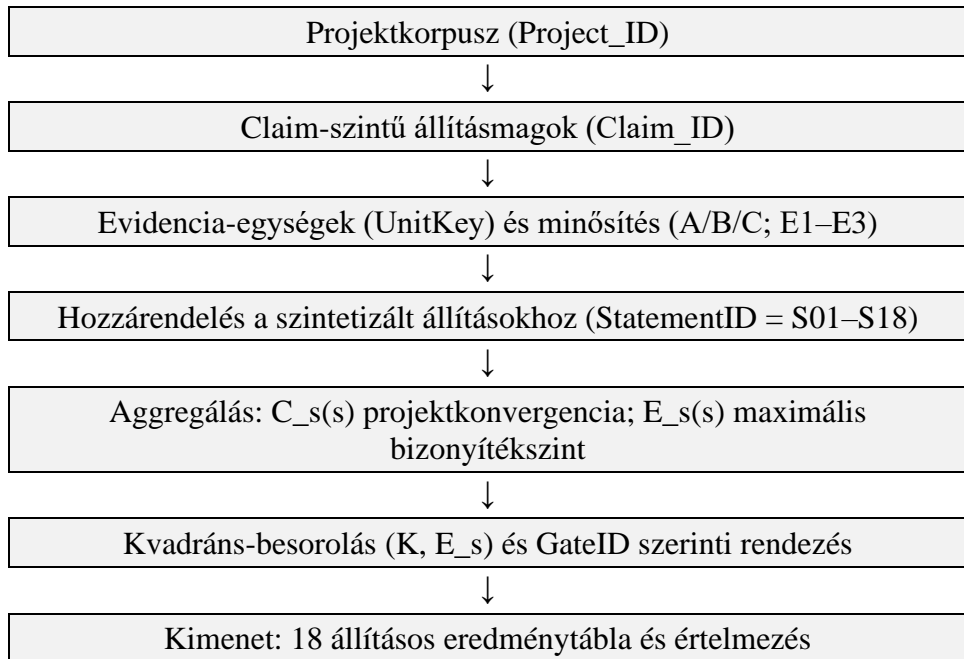
egységes állításkészletben legyenek összefoglalhatók. A feldolgozás kiindulópontját a projektregiszter és a hozzá kapcsolt nyilvános forrásazonosítók adják. A projekt metaadatokat összegző projektregisztert az F3. táblázat, míg a projektek és az elsődleges nyilvános hivatkozások összerendelését az F4. táblázat tartalmazza. A projektregiszter összeállítása kritériumalapú célzott kiválasztással történt, amelyben elsődleges szempontot jelentett a projekt V2G, illetve tágabban V2X relevanciája, az önállóan azonosítható projektleírás, továbbá legalább egy elsődleges nyilvános forrás megléte. A bevont projektek esetében elvárásként jelent meg a térbeli és időbeli beazonosíthatóság, amely a metaadatmezők kitölthetőségén keresztül ellenőrizhető. A nyilvános dokumentáltság, mint beválasztási feltétel szelekciós mechanizmusként is értelmezhető, ezért ennek megfelelően az eredmények külső érvényessége a korpusz összetételéhez kötötten jelenik meg. A projektkorpusz értelmezési határainak rögzítése során a „pilotprojekt” fogalma tágabban került kezelésre: olyan időben és térben azonosítható, dokumentált megvalósítási egységet jelölt, amelyben V2G/V2X-képes szolgáltatási logika, eszközoldali kialakítás vagy intézményi keret tesztelése megjelenik, függetlenül attól, hogy a projekt később részben kiterjesztett (roll-out jellegű) fázisba lépett-e. A „projekt” ontológiai egységét a Project_ID képzésében az különítette el, hogy az adott megvalósítás önálló célkitűzéssel és azonosítható szervezeti/területi kerettel rendelkezzen; olyan esetben, amikor egy program több alprojektből állt vagy több térségben futott, a Project_ID-szintű kezelés a dokumentációban elkülönített megvalósítási egységekhez igazodott. Amennyiben ugyanazon projekt több dokumentumtípusban is megjelent (például sajtóközlemény, programprezentáció, zárójelentés vagy frissített jelentésverzió), a források egy Project_ID alatt kerültek kezelésre, miközben az ismétlődő közlések a kódolás során egységszinten kerültek visszaellenőrzésre annak érdekében, hogy a projektszintű konvergencia számítása ne duplikációs hatást tükrözzön.

A feldolgozás logikáját a projektforrások rögzítésétől az állításmagok és evidencia-egységek elkülönítésén át a szintetizált állításokig vezető lépések soraként az 1. ábra szemlélteti. A projektdokumentumok célzott olvasata során elsőként elkülönítésre kerülnek azok az önállóan értelmezhető megállapítások, amelyek a bevezetés feltételrendszerére vonatkozó információt hordoznak. Ezek állításmagként kerülnek nyilvántartásba, és állításmag-azonosítóval (Claim_ID) kapcsolódnak a projektazonosítóhoz (Project_ID). Az állításmagok elkülönítése harmonizált adatdimenziók, azaz állításcsoportok (claim groups, CG) mentén történik. A feldolgozásban alkalmazott állításcsoportok a kivonatolás harmonizált adatdimenzióit adják, amelyek a projektdokumentumokból kigyűjtött állításmagok (claim-

ek) rendezését támogatják a claim-szinten. E dimenziók közé sorolható a felhasználói elégedettség, a flotta és járműtípus, a generációs besorolás, továbbá az időszak és a kihívások, illetve tanulságok kezelése. Ugyanezen CG-rendszer részét képezik a gazdasági, technológiai és viselkedési ösztönzőkhöz köthető megállapítások, a töltőinfrastruktúra, a protokollok és szabványok, valamint a részvétel és bevonás dimenziója. A költségoldali és rendszerszintű tételek rögzítését a TCO és költséghatás, a hálózati szolgáltatási hatás, a visszatáplált energia, továbbá az éves bevétel járművenként dimenziók támogatják. A harmonizált adatdimenziók teljes körét és rövid hatóköri leírását az F5. táblázat foglalja össze. A CG-k szerepe a modellben input jellegű, mivel a claim-szintű kivonatolás egységes kereteit adják, míg az interpretációs pillérek az output szinten jelennek meg, és a szintetizált állítások tartalmi címkézését támogatják. Az „Időszak” CG a feldolgozásban metaadat-jellegű dimenzióként is értelmezhető, ugyanakkor a claim-szintű összehasonlíthatóság és a projektkimenetek időbeli kontextusba helyezése miatt a harmonizált dimenziók közé került. A CG-besorolás rögzítése során egy állításmag több dimenzióhoz is kapcsolható volt, amennyiben a forrásmegállapítás több hatóköri elemet érintett; ilyen esetben a többdimenziós hozzárendelés a claim-szintű visszakereshetőséget és a későbbi szűrést támogatta, miközben a StatementID-hozzárendelés egységesen a kódkönyvi állításszinten történt. Ezt követően az állításmagok alátámasztására szolgáló forrásrészletek evidencia-egységekre bontva kerülnek rögzítésre; az evidencia-egységek egységkulccsal (UnitKey) azonosított, legkisebb kódolási egységként jelennek meg, és minősítést kapnak a bizonyítéktípus (E1–E3) és a bizonyítékerősség (A/B/C) dimenziók mentén. A claim és az evidencia-egység elkülönítése során az önálló állításmagnak (claim-nek) olyan, a forrásban lokalizálható megállapítás tekinthető, amely önmagában értelmezhető következtetést hordoz a V2G/V2X bevezetés feltételrendszeréről, működtetéséről vagy kimeneteiről. A forráshely meghatározása a dokumentumtípustól függetlenül a minimálisan visszakereshető hivatkozási egységhez igazodott, így tipikusan bekezdés, táblázati sor, ábrafelirat vagy ezek egyértelműen azonosítható részlete szolgált a lokalizáció alapjául. Egy evidencia-egység olyan információdarabként került rögzítésre, amely egyértelműen összerendelhető egy Claim_ID-vel és egy szintetizált állításazonosítóval (StatementID), továbbá a forrásban visszakereshető hivatkozási ponttal rendelkezik. Amennyiben egy forrásrészlet több, tartalmilag elkülönülő állítást támaszt alá, a rögzítés több evidencia-egységre bontással történt, különösen akkor, ha eltérő mérőszámok, időablakok vagy feltételek jelentek meg ugyanazon szövegrészen belül. Olyan esetben, amikor azonos információ több dokumentumtípusban ismétlődik ugyanazon Project_ID

alatt, az egységszintű rögzítés célja az volt, hogy a projektszintű konvergencia számítása továbbra is a független projektek számára, és ne a dokumentumok számára legyen érzékeny.

A minősített evidencia-egységek ezután hozzárendelésre kerülnek a szintetizált állításazonosítókhoz (StatementID), amelyek S01–S18 kóddal jelölt, rögzített állításokként alkotják a kódkönyvi szintet. A hozzárendelés eredménye olyan adatmag, amelyben az állításszintű aggregálás a projektszintű konvergencia (C_s) és a maximális bizonyítékszint (E_s) mutatók mentén értelmezhető, és amely a kapuazonosító (GateID) szerinti rendezéssel együtt az eredménytábla előállításához vezet.



1. ábra A dokumentumalapú feldolgozás folyamata a projektforrásoktól a szintetizált állításokig
Forrás: saját szerkesztés.

Az információk feldolgozása során a projektszintű forrásanyagból először állítások kerülnek elkülönítésre, majd ezek alátámasztása evidencia-egységekre tagolódik. Az evidencia-egység a módszertan legkisebb kódolási egységként értelmezhető: olyan, konkrét projekthez köthető információdarab, amely azonosítható módon összerendelhető a forrásprojekttel és a szintetizált állítással. Az adatmodell hierarchikus rétegződését és a kulcsmezők szerepét az F6. táblázat rögzíti, ahol a projektazonosító (Project_ID), az állításazonosító (Claim_ID), az egységkulcs (UnitKey) és az állításazonosító (StatementID) külön elemzési szinteken jelenik meg.

Az evidencia-egységek minősítése két, egymástól elkülönített dimenzió mentén történik. A bizonyítéktípus (E1–E3) a forrás jellegére és részletezettségére utal, míg a bizonyítékerősség (A/B/C) azt fejezi ki, hogy az evidencia-egység mennyire közvetlenül és önmagában értelmezhető módon támasztja alá a hozzárendelt állítást. A dimenziók kritériumalapú definícióit az F9. táblázat foglalja össze.

A kódolási konzisztenciát a rögzített definíciók és az egységszintű visszaellenőrzések támogatták, amelyek során a minősítések és a StatementID-hozzárendelések a forráshelyekhez visszavezetve kerültek áttekintésre. A visszaellenőrzés a vitás esetek azonosítására és egységesítésére is szolgált: többértelmű megfogalmazás, eltérő dokumentumtípusok közötti részletezettségi különbség vagy hatóköri átfedés esetén a minősítés és a hozzárendelés a rögzített definíciók alapján került finomításra. A kódkönyvi elemek stabilitását az biztosította, hogy az S01–S18 állításkészlet rögzített kódként működött, miközben a projektdokumentumokból kinyert állításmagok és evidencia-egységek ehhez a kódkészlethez illesztve kerültek besorolásra. A kódolói szerepek kezelése a módszertanban egységes döntési protokollt követett: vitás esetben a forráshelyekhez történő visszavezetés és a definíciók szerinti újraértékelés adott feloldási szabályt, amely a kódolási döntések konzisztenciáját támogathatta.

A rangsorolási lépésekben a bizonyítékerősség kategóriái numerikus megfeleltetéssel jelennek meg bizonyítékpontszámként (EvidenceScore). A megfeleltetés a következő formában kerül alkalmazásra:

$$\text{EvidenceScore}(u) = \begin{cases} 3, & \text{ha Evidence_strength}(u) = A \\ 2, & \text{ha Evidence_strength}(u) = B \\ 1, & \text{ha Evidence_strength}(u) = C \end{cases}$$

A szintetizált állításkészlet az állításazonosító (StatementID) mentén kerül rögzítésre, S01–S18 kódolással. Az állítások projektszintű előfordulását és erős evidenciával való megerősítettségét aggregált mutatók írják le: a projektkonvergencia (C_s) a kapcsolódó projektek számát, míg az n_high az erős bizonyítékerősségű (A) alátámasztással rendelkező projektek számát jelzi és a maximális bizonyítékszintet az E_s mutató fejezi ki. Az összehasonlíthatóság értelmezési keretét kiegészíti a KPI-ok megnevezését és mértékegységeit tartalmazó F8. táblázat.

A bevezetési és értelmezési sorrend rögzítésére a kapuazonosító (GateID) kerül alkalmazásra. A GateID olyan rendezési keretet ad, amelyben az állítások a megvalósítás szempontjából eltérő „kapuszintekhez” rendelhetők, és ezáltal a javaslatok egymásra épülése strukturáltan tárgyalható. A kapulógika tartalmi definícióit az F9. táblázat foglalja össze.

Az állítások tartalmi címkézését tíz interpretációs pillér támogatja, amelyek a szintetizált állítások értelmezési egységesítését szolgálhatják. A pillérek a gazdasági, a gazdasági és intézményi, az intézményi, a technológiai, a felhasználói élmény (user experience, UX) és technológia, a viselkedés, a társadalmi, a környezeti, az ökoszisztéma, valamint a Közép-Európa dimenziói mentén kerülnek alkalmazásra. A pillércímke az állítás tartalmi súlypontja alapján kerül hozzárendelésre, miközben a rangsorolás formális számítási lépéseit nem módosítja. A pillércímkézés a feldolgozásban egységes, egycímkés (single-label) logikát követett: minden StatementID-hez egy domináns interpretációs pillér került rögzítésre annak érdekében, hogy a későbbi értelmezés és strukturálás konzisztens és áttekinthető maradjon. A GateID meghatározása az állítás domináns megvalósítási függőségéhez illeszkedik, és olyan esetben, amikor több kapusint is értelmezhetőnek tűnhet, a besorolás a megvalósítás logikai sorrendjét leginkább meghatározó feltételrendszerhez igazodik. A dominancia rögzítését a minimális döntési szabály az adta, hogy a GateID annak a kapusintnek felelt meg, amelynek hiánya esetén az állítás szerinti intézkedés vagy kimenet a projektleírás alapján nem, vagy csak lényegesen korlátozottan valósulhatott volna meg. Ezek a címkék az értelmezést egységesíthetik, miközben a formális rangsorolási számításokat nem módosítják.

A kvadráns-besorolás és a rangsor újraszámíthatóságához a minimálisan szükséges mezők az evidencia-egység rétegben a Project_ID, a StatementID, a bizonyítékerősség (Evidence_strength) és az ebből képzett evidenciapontszám (EvidenceScore), továbbá az állításkódkönyvben rögzített GateID. A számítási sorrendben először a projektszintű konvergencia kerül meghatározásra deduplikált projektazonosító-halmazként, ezt követi az E_s érték képzése maximumoperátorral, majd a kvadráns-besorolás és végül a determinisztikus rendezés. Az állításszintű rangsor három, az evidencia-egységek hozzárendeléséből számítható mutató alapján képezhető. A konvergenciamutató (C_s) azt fejezi ki, hogy az adott állításhoz hány különböző projekt rendelhető. Az erős alátámasztású projektek száma (n_{high}) azt jelzi, hogy az adott állítás esetében hány projektben található legalább egy erős bizonyítékerősségű (A) evidencia-egység. A maximális bizonyítékpontszám (E_s) pedig az adott állításhoz rendelt evidencia-egységek közül a legnagyobb EvidenceScore értéket veszi fel. Az E_s a rendelkezésre álló legmagasabb bizonyítási szint jelzésére szolgálhat, vagyis a „bizonyítási plafont” teszi láthatóvá, nem pedig az evidencia-egységek tipikus vagy átlagos minőségi szintjét. A maximumoperátor ezért ebben a kontextusban a legmagasabb minőségű alátámasztás jelenlétének jelzésére értelmezhető, miközben a n_{high} mutató kiegészítő információt adhat arról, hogy ez a szint hány projektben

jelenik meg erős alátámasztással. A C_s mutató ezzel párhuzamosan a projektek számán keresztül az empirikus előfordulás szélességét teszi láthatóvá, és nem az evidencia-darabszámot. A mutatók definíciói az alábbiak:

A konvergenciamutató (projektkonvergencia) definíciója:

$$C_s(s) = |\{p: \exists u (\text{Project_ID}(u) = p) \wedge (\text{StatementID}(u) = s)\}|$$

Az erős alátámasztású projektek száma:

$$n_{\text{high}}(s) = |\{p: \exists u (\text{Project_ID}(u) = p) \wedge (\text{StatementID}(u) = s) \wedge (\text{Evidence_strength}(u) = A)\}|$$

Maximális bizonyítékszint:

$$E_s(s) = \max_{u: \text{StatementID}(u)=s} \text{EvidenceScore}(u), \quad \text{EvidenceScore} \in \{1,2,3\}$$

Kvadránsok (Q1–Q4):

$$\begin{aligned} Q1: (C_s \geq K) \wedge (E_s = 3), & \quad Q2: (C_s < K) \wedge (E_s = 3), \\ Q3: (C_s \geq K) \wedge (E_s < 3), & \quad Q4: (C_s < K) \wedge (E_s < 3) \end{aligned}$$

A konvergenciaküszöb (K) értéke a jelen eljárásban $K=8$, amely gyakorlati elválasztó értéként értelmezhető a szélesebb projektszintű megerősítéssel rendelkező és a korlátozottabb konvergenciájú állítások elkülönítésére. A küszöb választása a projektkorpusz méretéhez igazított diszkrét döntésként jelent meg: olyan értéket jelölt, amely a konvergencia-eloszlás felső tartományát elkülöníthetően reprezentálja, miközben a kvadráns-besorolás és a determinisztikus rendezés a választott K mellett egyértelműen végrehajtható. A végső sorrend determinisztikus rendezéssel áll elő: elsődlegesen a kapuazonosító (GateID) szerinti növekvő rend érvényesül, ezt követi a kvadránsok szerinti sorrend (Q1→Q4), majd azonos csoporton belül a projektkonvergencia (C_s) csökkenő, végül az erős alátámasztású projektek száma (n_{high}) csökkenő rendje egészíti ki. Teljes egyezés esetén a feloldási szabályt az állításazonosító (StatementID) lexikografikus rendje adja, amely a rendezés determinisztikus jellegét megőrzi. Ezt a rendezési logika olyan kimenetet eredményezhet, amely egyszerre teszi láthatóvá a bevezetési lépések egymásra épülését és az állítások projektszintű alátámasztottságának eltérő mintázatait.

3.7 K1, K2, K3: Életciklus- és scenárióalapú környezeti értékelési keretrendszer

A K1–K3 tézisek közös kerete a BEV-ek életciklus- és scenárióalapú környezeti értékelésére épül. A használati fázis lokális emisszióhiányát a villamosenergia-termelés karbonintenzitásával együtt veszi figyelembe, így

az elektromos és a belső égésű hajtású járművek összevetése egységes bemeneti paraméterekre és számítási logikára támaszkodik.

3.7.1 Közös bemeneti paraméterek és életciklus-számítási alapok

Az alfejezet rögzíti azokat a futásteljesítmény-, fogyasztás- és emissziós paramétereket, amelyekre a K1–K3 tézisek épülnek. A cél az adatok belső konzisztenciájának és összehasonlíthatóságának biztosítása. Két reprezentatív éves futásteljesítmény-szint kerül alkalmazásra nemzetközi felmérések szintézise alapján:

Átlagos használat: 14 000 km/év – átlagos európai személyautó-használati profilként felel meg, a BEV-eknél ez az érték jellemzően enyhén a hasonló ICEV-ek fölött alakul. Intenzív (városi/agglomerációs) használat: 18 000 km/év – újabb vizsgálatok szerint a nagyobb hatótávolságú BEV-ekre jellemző, főként városi–elővárosi használat mellett. A számítások mindkét futásteljesítmény-szintre párhuzamosan értelmezhetők.

Az életciklus-bázisú kibocsátást a valós közúti energiafogyasztás határozza meg. A mutató jellemzően meghaladja a szabványos mérési ciklusok – a könnyű gépjárművekre vonatkozó világszinten harmonizált vizsgálati eljárás (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, WLTP) és az új európai menetciklus (New European Driving Cycle, NEDC) – értékeit. Számos empirikus forrás 19–23 kWh/100 km tartományt azonosít tipikus BEV- flották esetén (De Cauwer és mtsai., 2015; International Energy Agency, 2025; Knobloch és mtsai., 2020; Negri & Bieker, 2025; Weiss és mtsai., 2024). A további számításokhoz 21 kWh/100 km egységes referenciaérték szolgál alapul. A cél ugyanis az EU27 tagállamok viszonylatában fennálló összehasonlíthatóság, az egyedi típusok részletes leírása helyett.

A belső égésű referenciajármű fajlagos CO₂-kibocsátásánál a hivatalos flottaátlag és a valós közúti többletemisszió különbsége érvényesül. Az új személygépkocsik laboratóriumi flottaátlaga ≈ 108 g/km. A valós többlet 15–20% körüli, így a valós fajlagos kibocsátás 125–130 g/km. A számítások egységessége érdekében 130 g/km ICEV-referenciaértékkel kalkulál a modell.

A használati fázis indirekt emisszióját az egyes országok villamosenergia-termelésének karbonintenzitása határozza meg. Az országonkénti CO₂-intenzitások primer forrása az EDGAR adatbázis; az EEA és az IEA adatai kontrollként kerülnek felhasználásra. Az EU-tagállamok villamosenergia-mixének CO₂-intenzitása tág tartományban, megközelítőleg 100–600 gCO₂/kWh között mozog, ami közvetlenül beépül a K1–K3 értékelési kereteibe.

Alap számítási képletek

Az éves energiaigény:

$$E_{ev} = \left(\frac{F_{BEV}}{100} \right) * L_{ev}$$

Ahol:

E_{ev} = éves energiaigény [kWh/év]

F_{BEV} = BEV fajlagos energiafogyasztása [kWh/100 km]

L_{ev} = éves futásteljesítmény [km/év]

Az éves indirekt CO₂-kibocsátás BEV esetén:

$$CO2_{EV_{ev}} = E_{ev} * CI_{ország}$$

Ahol:

$CO2_{EV_{ev}}$ = BEV éves indirekt CO₂ – kibocsátása [kg/év]

$CO2_{EV}$ = BEV fajlagos CO₂ – kibocsátása [g/km]

A BEV-ek használati fázisú fajlagos kibocsátása:

$$CO2_{EV} = CI_{ország} * \frac{F_{BEV}}{100}$$

Ahol:

$CI_{ország}$ = villamosenergia – mix CO₂
– intenzitása az adott országban [kgCO₂
/kWh vagy gCO₂/kWh]

Az EV és ICEV közötti relatív különbség:

$$EV_{ICEV_{arany}} = \left(\frac{CO2_{EV}}{130} \right) * 100$$

Ahol:

$EV_{ICEV_{arany}}$ = BEV/ICEV fajlagos CO₂ – arány [%]

A keret egységes 21 kWh/100 km referenciafogyasztást, két futásteljesítmény-szenáriót és országos átlagos CO₂-intenzitásokat alkalmaz. Ez nem teszi lehetővé egyedi jármű- vagy felhasználó-specifikus előrejelzések készítését, ugyanakkor alkalmas az országok és hajtástechnológiák közötti relatív különbségek egységes bemutatására, ami a K1–K3 tézisek szempontjából elsődleges.

3.7.2 K1: Ország–fogyasztás mátrix és EV/ICEV fajlagos összehasonlítás

A vizsgálat célja az volt, hogy az EU27 tagállamaiban, az országoként eltérő hálózati CO₂-intenzitás figyelembevételével, reprodukálható módon összehasonlíthatóvá váljon a BEV üzemeltetési (fajlagos CO₂-kibocsátása) egy egy átlagos ICEV-hez viszonyítva. Referenciaként $E_{ICEV}=130$ g/km érték került alkalmazásra, amely nagyságrendileg egy benzinüzemű személyautó ~6 l/100 km, illetve egy dízelüzemű személyautó ~5 l/100 km fogyasztási szintjéhez rendelhető, tipikus emissziós nagyságrendként.

Az értékelés ország–fogyasztás mátrixban történt, amelyben az országokénti hálózati CO₂-intenzitás (gCO₂/kWh) az EEA adataira lett alapozva (European Environment Agency, 2025). A mátrix sorai az EU27 tagállamait, oszlopai a BEV fajlagos energiafogyasztásának $\in[14;30]$ kWh/100 km tartományát reprezentálják 1 kWh/100 km lépésközzel. A számítások bemenete országoként a hálózati CO₂-intenzitás CI_i (gCO₂/kWh), valamint a vizsgált fogyasztási érték e . Az egyes cellákban először a BEV üzemeltetési kibocsátása kerül meghatározásra:

$$E_{\{BEV,100\}(i,e)} = CI_i \cdot e$$

majd ez a mennyiség a referencia ICEV $E_{ICEV,100}=13000$ g/100 km értékéhez viszonyítva relatív arányként kerül kifejezésre:

$$R(i, e) = 100 * \frac{E_{\{BEV,100\}(i,e)}}{E_{ICEV,100}}$$

ahol $R(i,e)$ az ICEV-hez viszonyított üzemeltetési emisszió százalékos értéke (ICEV = 100%).

A K1-mátrix eredményei a vizuális áttekinthetőség érdekében hőtérképes formában is megjelenítésre kerültek, amely a relatív EV/ICEV arányokat a 100% alatti, paritásközei és 100% feletti tartományok mentén különíti el. A teljes kombinációs tér numerikus értékei táblázatos formában rögzítésre kerültek; az ábrázolás és a részletes értékkészlet a K1-hez kapcsolódó mellékletekben szerepel.

Az országok közötti összehasonlíthatóság tömörítése céljából a K1-mátrixból származtatásra került a paritási küszöbfogyasztás mutató. Ez országoként azt a fajlagos fogyasztási értéket jelöli, amelynél a BEV üzemeltetési kibocsátása megegyezik a 130 g/km ICEV-referenciával, azaz $R=100\%$. A mutató képlete:

$$e_i^* = \frac{13000}{CI_i}$$

így közvetlenül a hálózati CO₂-intenzitásból és az egységes referenciaemisszióból számítható. A paritási küszöbfogyasztás eredményei

az eredményfejezetben önálló ábrán kerültek bemutatásra, míg a mátrix teljes numerikus leképezése a mellékletekben biztosítja a számítások ellenőrizhetőségét és reprodukálhatóságát.

3.7.3 K2: Akkumulátor-degradáció és akkumulátor-életciklus CO₂

A K2 tézis a V2G-használatból adódó többletciklizálás akkumulátor-élettartamra gyakorolt hatását, továbbá az akkumulátorgyártáshoz köthető kibocsátás élettartamra vetített fajlagos értékének alakulását vizsgálja. A lítium-ion technológia állapotváltozását a modell a ciklikus igénybevétel és a naptári öregedés együttes figyelembevételével kezeli. A keretrendszer scenárióalapon számszerűsíti a V2G-funkció hatását az élettartam során hasznosított energiacyklus-mennyiségre és a gyártásból származó fajlagos életciklus-kibocsátásra. A V2G-scenáriók a hasznosítható töltöttségi sáv bővítését a SoC-ablak szélességével írják le. A paraméter a névleges kapacitás 10–60%-ának megfelelő intervallumban változik. Az ablak pozíciója tipikusan a középtartományban (pl. 20–80% SoC) definiálható a pilotprojekteken alkalmazott gyakorlatokhoz igazodva. A V2G-mentes referencia esetében a modell a közlekedési célú napi ciklusokat veszi figyelembe. A V2G-esetekben ehhez járulnak a hálózati szolgáltatásokhoz kapcsolódó részleges ciklusok. A többletigénybevétel az elemzett profilokban alacsonyabb terhelés kontextusában napi 1–2, intenzívebb frekvenciaszabályozási jellegű használatnál pedig napi 3–4 rövidebb periódust reprezentál a kisütési mélység (depth of discharge, DoD) tartomány scenárióparaméterezésével. Az akkumulátor élettartamra vetített karbonlábnyomát az LC-CO₂ mutató adja meg. Az indikátor az akkumulátorgyártás egyszeri kibocsátását az élettartam során hasznosított energiamentenységgel arányosítja:

$$LC_{CO_2batt} = \frac{(C_{batt} * CI_{prod})}{E_{delivered}}$$

Ahol:

C_{batt} = akkumulátor névleges kapacitása [kWh]

CI_{prod} = akkumulátorgyártás karbonintenzitása [gCO₂/kWh]

$E_{delivered}$

= élettartam alatt ténylegesen szolgáltatott energia [kWh]

A modellben jellemzően egy 60 kWh kapacitású BEV-akkumulátor, 75000–150000 gCO₂/kWh közötti gyártási karbonintenzitás és több tíz- vagy százezer kWh nagyságrendű, élettartamra vetített energiaszállítás szerepel.

Az egyes scenáriókban az $E_{delivered}$ a közlekedési célú energiamennyiség és a V2G-szolgáltatásokhoz kapcsolódó energiamennyiség összegeként kerül meghatározásra:

$$E_{delivered} = E_{trakcio} + E_{V2G}$$

Ahol:

$E_{trakcio}$

= közlekedési célú energiafelhasználás az élettartam során [kWh]

E_{V2G}

= V2G

– szolgáltatásokhoz kapcsolódó, hálózat számára nyújtott energia [kWh]

$E_{trakcio}$ a 3.7.1-ben bemutatott futásteljesítmény- és fogyasztási paraméterekből adódik, E_{V2G} pedig a V2G-szenáriókra jellemző napi ciklusszám, DoD és hasznosítható SoC-ablak alapján kerül meghatározásra. Így minden scenárióhoz egyértelmű, determinisztikus LC-CO₂ érték rendelhető.

$$\Delta SoH = SoH_{ref(10\text{ év})} - SoH_{V2G(10\text{ év})}$$

ahol a SoH_{ref} a csak közlekedési célú használat, a SoH_{V2G} pedig az adott V2G-szenárió melletti állapotot jelöli.

3.7.4 K3: Flotta-szintű V2G-kapacitás és kiváltott hálózati tárolás karbonlábnyoma

Az EU 2030-as tárolási teljesítményigényére és összetételére épülő V2G-szenáriós számítások reprodukálhatóságát a bemeneti paraméterek, jelölések, egységek és min–max. tartományok egységes rögzítését biztosítja a F10. táblázat. A scenáriólevezetés első lépése a rövidtávú tárolási csomaghoz rendelt V2G-résarány és a rövidtávú csomag 2030-as teljesítményének (short-duration package, P_{short_2030}) összekapcsolása. Ezzel adódik a V2G-hozzájárulás teljesítményben (vehicle-to-grid contribution, P_{V2G}):

$$P_{V2G} = s_{V2G} * P_{short_2030}$$

Ahol:

P_{V2G} = V2G hozzájárulás a rövidtávú portfólión belül [GW]

s_{V2G} = V2G résarány a rövidtávú csomagon belül [-]

P_{short_2030} = rövidtávú tárolási csomag teljesítménye 2030-ban [GW]

A teljesítmény (GW) önmagában nem fejezi ki a tárolható energiamennyiséget; az energiamennyiség (GWh) a névleges kisütési idő

(discharge duration, h_{short}) feltételezésével értelmezhető. A rövidtávú portfólió energia-megfelelője, illetve a V2G-vel kiváltott stacioner tároló energia-megfelelője így a teljesítmény és a névleges kisütési idő szorzataként adódik:

$$E_{kivaltott} = P_{V2G} * h_{short}$$

Ahol:

$E_{kivaltott}$ = V2G révén kiváltott stacioner tároló energia-megfelelője [GWh]

h_{short} = rövidtávú tárolás névleges kisütési ideje [h]

A gyártási kibocsátási hatás számszerűsítése a kiváltott stacioner BESS-gyártás elkerült szén-dioxid-egyenérték terhére (carbon dioxide equivalent, CO_{2e}) vonatkozik. A számítás a BESS-ek gyártási karbonintenzitásának (carbon intensity, CI) irodalmi min–max sávját a függelékben van rögzítve, míg a itt a középérték (mid) alapján közölt pontbecslés kerül felhasználásra. A középérték a minimum és maximum számtani átlaga:

$$CI_{mid} = \frac{(CI_{min} + CI_{max})}{2}$$

Ahol:

CI_{min} = BESS gyártási karbonintenzitás alsó értéke [kgCO_{2e}/kWh]

CI_{max} = BESS gyártási karbonintenzitás felső értéke [kgCO_{2e}/kWh]

CI_{mid} = BESS gyártási karbonintenzitás középértéke [kgCO_{2e}/kWh]

Ezt követően az elkerült gyártási CO_{2e} a kiváltott energiamennyiség és a gyártási karbonintenzitás szorzataként adódik. Itt a Mt CO_{2e} egységben szereplő eredményekhez a konverziót egység helyesen kell kezelni: 1 GWh = 10⁶ kWh, míg 1 Mt = 10⁹ kg, ezért a szorzó 10⁶/10⁹ = 10⁻³, azaz /1000. Ennek megfelelően:

$$CO2e_{elkerultMt} = E_{kivaltott} * \frac{CI_{mid}}{1000}$$

Ahol:

$CO2e_{elkerultMt}$ = kiváltott BESS-gyártás elkerült CO_{2e}-terhe [Mt CO_{2e}]

A számítási blokk kimenete scenáriónként egyetlen, középértékkel paraméterezett CO_{2e}_elkerult_Mt mutató, amely közvetlenül a kiváltott energiátárolási kapacitás energia-megfelelőjéből és a rögzített gyártási karbonintenzitásból adódik.

4. Eredmények

A számítások kimenetei egységesített szerkezetben kerülnek bemutatásra. Elsőként az elektromos modellek összesített birtoklási költségéhez és kereskedelmi versenyképességéhez kapcsolódó adatok szerepelnek. Ezt követik az európai fókuszú regionális különbségeket feltáró összehasonlító elemzések. Zárásként az akkumulátorok és a V2G-bázisú energiatárolás életciklus-szemléletű környezeti mutatói következnek. Az alfejezetek sorrendje biztosítja a korábban bemutatott módszertani keretek fokozatos kibontakozását gazdasági, területi és környezeti dimenziók mentén.

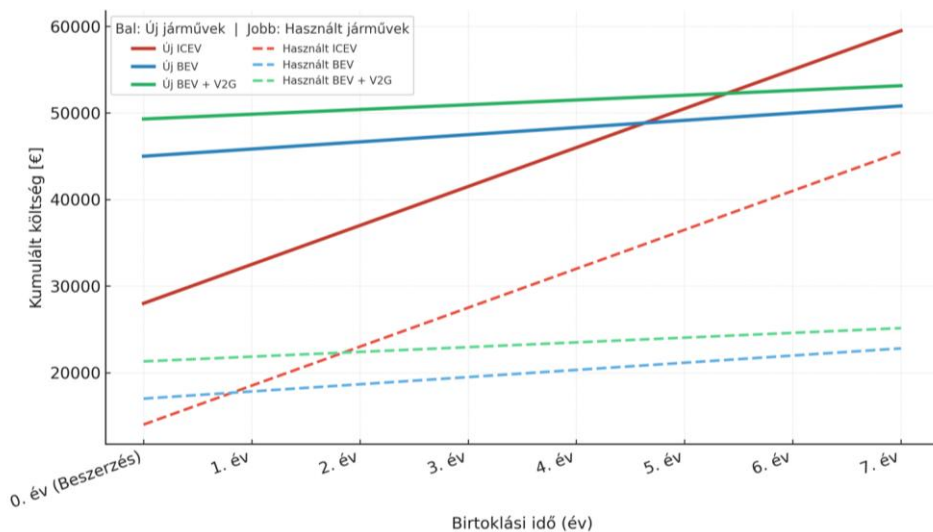
4.1 G1: A BEV–ICEV TCO-elemzés eredményei

A 3.2. fejezetben bemutatott, régióspecifikus TCO-modell kimenetei igazolják azt, hogy az elemzett közép-európai – ezen belül kiemelten magyarországi – kondíciók kontextusában a tisztán elektromos hajtású típusok komplett birtoklási költsége számos használati scenárióban eléri, illetve meghaladja a hasonló kategóriájú belső égésű motoros alternatívák gazdasági versenyképességét.

A modellfuttatások érzékenységet mutatnak a futásteljesítményre, a használati időtáv hosszára, a villamosenergia- és üzemanyagárak alakulására, továbbá a maradványértékre. A tényezők együttesen határozzák meg a BEV–ICEV TCO-görbék metszéspontjait.

A szimulációk tanúsága szerint a BEV-ek költségelőnye elsősorban 7 év feletti használati idő és évi 18 000 km feletti futásteljesítmény függvényében formálódik markánsná. Az összefüggés közvetlenül alátámasztja a G1 tézist.

A régió autópiacon környezetére jellemző az új modellek bekerülési költségének strukturálisan magas szintje. Ezt szemlélteti a „Volkswagen Golf modellek átlagára évjáratonként. A közép-európai használtpiaci árszintek évjáratfüggő alakulását a Golf TSI, Golf GTE, e-Golf és ID.3 példáján a függelék ábrái szemléltetik (lásd F1.-F4. ábra). Amelyek 2013 és 2022 között lényegében trendvonal-szerű áremelkedést jeleznek, többnyire az EU-átlag körüli vagy azt meghaladó szinten. A magyar piac sajátosságait a „Volkswagen E-Golf/ID.3, Golf GTE és Golf TSI modellek árának idősoros változása Magyarországon” F5. ábra ragadja meg: ez alapján az elektromos és plug-in hibrid modellek újkori felára tartósan meghaladja a hagyományos TSI-változat árát, miközben az idősor végéhez közeledve a BEV- és PHEV-modellek maradványértéke magasabb szinten stabilizálódik. A mintázat egyértelműen a BEV-ek vonatkozásában a használat során, nem pedig a beszerzés pillanatában realizálódó gazdasági előnyre utal.



2. ábra BEV és ICEV kumulált teljes birtoklási költsége (új és használt járművek; V2G-s és V2G nélküli scenáriók; 2023–2030). Forrás: saját számítás és szerkesztés.

Az 2. ábra a kumulált TCO-szenáriókat foglalja össze különböző futásteljesítmények függvényében. Az új BEV-ek vonatkozásában a magasabb kezdeti beszerzési ár miatt kizárólag körülbelül a 6. év táján következik be a TCO-paritás az azonos szegmensű ICEV-ekkel. A másodlagos járművekre vonatkozó modellfuttatások azonban azt jelzik, mely szerint a 7 éves időhorizont végére a használt BEV az elemzett scenáriókban egyértelműen a legköltséghatékonyabb alternatívává lép elő, megelőzve az ICEV-et is. Az F6. ábra szegmensenkénti bontásban erősíti meg a tendenciát. Az A–D kategóriák 7 éves TCO-értékei három futásteljesítmény-szint (12 000; 18 000; 40 000 km/év) esetén a BEV-ek egyértelmű költségelőnyét mutatják a nagyobb szegmensekben (C és D), kiemelten magas futásmennyiségnél. Az alsóbb kategóriákban, alacsonyabb éves futásteljesítmény kontextusában a TCO-különbség ezzel szemben mérsékeltebb.

A fajlagos, 100 km-re vetített költségkülönbségeket az F7. ábra szemlélteti. A diagram a 7 éves időtávra értelmezett üzemeltetési költségvonzatot mutatja be, és ezáltal közvetlenebb módon biztosítja a hajtástípusok viszonylatában fennálló eltérések összehasonlíthatóságát a futásteljesítmény függvényében.

Az egyes szegmensekre és futásteljesítmény-szintekre számított fajlagos kiadások tükrében már a legalacsonyabb éves futásteljesítménynél is jellemzően a BEV-ek 100 km-re vetített mutatója a kedvezőbb. A különbség a futásteljesítmény növekedésével tovább emelkedik. A C- és D-szegmensekben 40 000 km/év esetén a BEV-ek 100 km-re vetített terhe jelentősen a belső égésű referencijárművek alatt marad. Az adat a

technológia gazdasági racionalitásának elsődleges megnyilvánulását jelzi az intenzív használatú, hosszabb távra tervezett járműflották vonatkozásában. A szegmens- és futásteljesítményfüggő TCO-eltérések mögött álló fő költségkomponensek – a beszerzési árkülönbség, az üzemeltetési költségkülönbség és az amortizációs hatás összegzését a F11. - F13. táblázatok adják meg.

A Fiat 500e – Toyota Aygo, a Renault Zoe – Toyota Yaris, a Volkswagen ID.3 – Golf 1.5 TSI és a Tesla Model 3 – BMW 520i párokra számított értékek alapján a beruházási árkülönbség (EV–ICE árkülönbözet), az üzemeltetési költségek különbsége és az amortizációs komponens hozzájárulása egyértelműen kvantifikálható. Az alsóbb szegmensekben (Fiat vs. Aygo; Zoe vs. Yaris) a BEV-ek újkori felára 12–13 ezer euró nagyságrendű, amelyet a 7 éves időtávon döntően az alacsonyabb üzemeltetési költség (energia és karbantartás) ellensúlyoz; a működési költségkülönbség 12 000–40 000 km/év között 3 000–19 000 euró közötti tartományban alakul, miközben az amortizációs komponens a teljes megtakarítás 10–20%-át adja. A középkategóriában (ID.3 vs. Golf) a beruházási különbség már kedvezőbb a BEV javára. Az üzemeltetési költségelőny 15 781–19 117 euró között mozog, az amortizáció hozzájárulása pedig 40–50% körüli. A felső-közép kategóriában (Tesla vs. BMW) a TCO-előny továbbra is elsősorban az üzemeltetési ráfordítások különbségéből ered, de az amortizációs profil itt is érezhetően a BEV-ek felé billenti az összképet. Az adatok a BEV-ek gazdasági versenyképességének erős szegmens- és használatfüggőségét jelzik. A nagyobb kategóriákban és intenzívebb használat során jóval markánsabb a TCO-előny, míg az alsóbb szegmensekben, alacsony futásteljesítmény esetén közelebb kerülnek egymáshoz a görbék.

A másodlagos piacra vonatkozó külön elemzés az új BEV-ek és ICEV-ek viszonylatában fennálló jelentős induló árkülönbség markáns mérséklődését mutatja a használt-kereskedelemben. A Golf-szegmensre elvégzett idősoros vizsgálat jelzi a tendenciát. Új állapotban a különböző hajtásláncok ára között több tízezer eurós eltérés figyelhető meg. A futásteljesítmény növekedésével és az életkor előrehaladtával azonban a BEV-modellek maradványértéke relatíve magas szinten marad, így az árkülönbség néhány ezer euróra csökken.

A másodlagos kereskedelmi jellegzetesség közvetlenül beépül a TCO-modellbe. A mechanizmus magyarázza a másodkézből származó BEV-ek legköltséghatékonyabb opcióvá válását 7 éves időtávon.

A TCO-modell kimenetei alátámasztják a tisztán elektromos hajtású típusok gazdasági versenyképességét a közép-európai – és kiemelten a magyar – piacon. A pozíció hosszabb használati időtáv és magasabb éves

futásteljesítmény kontextusában már nemcsak elméleti lehetőség, sokkal inkább számszerűen is igazolható tény. Az előny realizálása mindazonáltal szorosan függ a másodlagos BEV-szegmens hozzáférhetőségétől és a járműárak régiós dinamikájától (lásd Függelék: Volkswagen Golf modellek átlagára évjáratonként hajtástípusonként a közép-európai régióban). A függőség kiterjed a V2G-kompatibilis beruházások finanszírozhatóságára is. A tényező rövid-középtávon inkább mérsékli, mint erősíti a háztartási fókuszú TCO-előnyt.

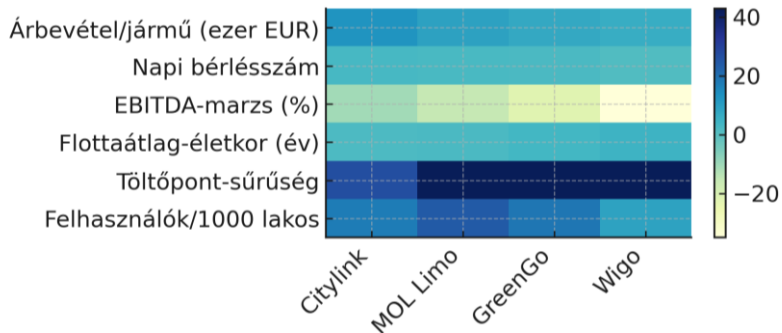
A G1 tézis empirikus megfogalmazása értelmében a közép-európai – specifikusan magyarországi – piacokon a BEV-ek összesített birtoklási költsége 7 éves időtávon és évi legalább 18 000 km futásteljesítmény esetén szisztematikusan alacsonyabb, mint a hasonló kategóriájú ICEV-eké. A régióspecifikus TCO-előny képezi alapját a következő alfejezetekben bemutatott carsharing-, klaszterezési és környezeti elemzéseknek. A vizsgálatokban a G1 blokkra építve az elektromobilitási ökoszisztéma tágabb kontextusába illeszkedik a V2G szerepe.

4.2 G2: Az elektromos autómegosztás gazdasági fenntarthatóságának eredményei

A BEV-ek lakossági TCO-elemzését követően a második eredményblokk a közösségi e-mobilitás – elsősorban Budapest, Pozsony és Bukarest – e-carsharing szolgáltatóinak gazdasági fenntarthatóságát vizsgálta. A 3.3 fejezetben bemutatott benchmarking és Monte-Carlo-alapú cash-flow-szimulációk eredményei azt mutatják, hogy a közép-európai e-carsharing piac jelenlegi üzleti modellje önmagában jellemzően nem biztosít stabil, minden scenárióban pozitív jövedelmezőséget; a hosszú távú működőképesség sok esetben vállalatcsoportos beágyazottsághoz és keresztfinanszírozáshoz kötődik. A blokk így szorosan kapcsolódik a G1 eredményeihez: míg ott a lakossági BEV-használat TCO-előnyének feltételei rajzolódnak ki, itt annak feltételei azonosíthatók, hogy a közösségi e-mobilitás üzleti modellje erre az előnyre építve mikor képesek életképes, nyereséges rendszert kialakítani.

A benchmarking első lépéseként a fő teljesítménymutatók egységes skálára hozására (normalizálására) került sor. A választott KPI-k (árbevétel/jármű, EBITDA-marzs, napi bérlésszám, flottaátlag-életkor, töltőpont-sűrűség, felhasználók/1000 lakos) definícióját és normalizálási logikáját az F14. táblázat összegzi. Így a szolgáltatók közvetlen összehasonlíthatóságát biztosítja, amely alapján Budapest, Pozsony és Bukarest szolgáltatói között jelentős különbségek mutatkoznak mind az árbevétel/jármű, mind a kihasználtsági mutatók, mind pedig a jövedelmezőség tekintetében. A klaszterelemzés két markáns üzleti modellt azonosított: egy skálázható,

hálózatvezérelt csoportot (Citylink, MOL Limo), valamint egy niche, amortizáció-érzékeny csoportot (GreenGo, Wigo), amelynél jellemzően gyengébb EBITDA-marzs és idősebb flotta figyelhető meg az F16. táblázatban. A carsharing szolgáltatók többdimenziós teljesítményprofiljainak vizuális összevetését a 3. ábra mutatja be.



3. ábra KPI hő térkép – közép-európai e-carsharing szolgáltatók
 Forrás: saját számítás és szerkesztés.

Az egységes skálára hozott mutatók tükrében jól kirajzolódik a bővíthető, hálózatvezérelt klaszter szolgáltatóinak előnye. A szereplők magasabb árbevételt és kihasználtságot érnek el, ezzel párhuzamosan fiatalabb, alacsonyabb amortizációs nyomás alatt álló flottával működnek. A jelenlétük azon városi környezetre koncentrálódik, melyben a töltőpont-sűrűség és a regisztrált felhasználók aránya is kedvezőbb. Ezzel szemben a niche, amortizáció-érzékeny modellre alacsonyabb napi bérlésszám, alacsonyabb árbevétel/jármű és számottevően gyengébb EBITDA-marzs jellemző. A KPI-profilok többdimenziós jellegét az F8. ábra szemlélteti. A MOL Limo és a Citylink a vizsgált mutatók többségében az élmezőnybe tartozik, míg a Wigo egyszerre jelez alacsony árbevétel/jármű értéket, csekély kihasználtságot és magas flottaátlag-életkort, ami kedvezőtlen üzleti és amortizációs struktúrára utal.

A benchmarkingre épülő Monte-Carlo cash-flow-szimulációk és a globális érzékenységi vizsgálat összegző eredményeit a 4. táblázat foglalja össze. A szimulációk szerint az e-carsharing üzletág átlagos nettó jelenértéke ugyan pozitív (átlagos NPV \approx 4 600 EUR/jármű), a medián érték azonban negatív (\approx -1 750 EUR/jármű), vagyis a scenáriók többségében a modell veszteséges, és csupán néhány kedvező konfiguráció húzza fel az átlagot. Az NPV szórása közel 25 500 EUR, a break-even év mediánja 1. A leghosszabb megtérülési idők szélsőértékei mindazonáltal akár számos ezer évre is kifuthatnak. A szélsőséges szórás jól jelzi a kockázati bizonytalanságot. A jelenlegi árstruktúra és kihasználtsági szint e bizonytalanság kontextusában önmagában nem tekinthető stabilan fenntarthatónak.

Mutató	Érték
Átlagos NPV (EUR)	4612
Medián NPV (EUR)	-1749
NPV szórása (EUR)	25444
Break-even medián év	1
Break-even maximum év	2600

Változó	Sobol-index
Töltési energiaár szórása	0.38
Napi bérlésszám szórása	0.34
Átlagos bérleti díj variancia	0.17
Támogatás × energiaár interakció	magas

4. táblázat A közösségi e-mobilitási üzleti modell kockázati jellemzői: Monte-Carlo szimuláció és Sobol-érzékenységi analízis összegző eredményei Forrás: saját számítás és szerkesztés.

A kockázati tényezők szerkezetét a globális érzékenységi elemzés világítja meg: az elsőrendű Sobol-indexek alapján a töltési energiaár volatilitása ($S \approx 0,38$) és a napi bérlésszám szórása ($S \approx 0,34$) magyarázza az NPV-variancia döntő részét. Az átlagos bérleti díj varianciája ($S \approx 0,17$) ezzel szemben másodlagos, de nem elhanyagolható tényező. A támogatási szintek és az energiaár-volatilitás interakciós tagja szintén magas indexet mutat, ami arra utal, hogy a szabályozási környezet és az energiapolitika együttesen erősen alakítja az üzleti modell kockázati profilját.

Az eredmények arra mutatnak rá, hogy a gazdasági fenntarthatóság eléréséhez nem elegendő a flottaméret vagy az árképzés izolált optimalizálása: szükség van a bevételi oldalt diverzifikáló, kockázatmegosztó mechanizmusokra is.

A strukturális beavatkozási irányokat a függelékben közölt F17. táblázat foglalja össze. A flottafiataltítás – fiatal járművek 2 éven belüli beszerzése – a szimulációk szerint mintegy 8%-os hatékonyságjavulást hozhat, elsősorban az amortizáció és a karbantartási költségek mérséklése révén. A V2G-integráció, vagyis kétirányú DC-töltők telepítése és a flotta éjszakai hálózati visszatáplálása a vizsgált közép-európai feltételek mellett 8–12%-os többletbevételt generálhat, ami több esetben elegendő a pozitív cash-flow eléréséhez. Rövidebb távon az adatmonetizáció (GDPR-kompatibilis adatértékesítési modellek) és a dinamikus tarifarendszer bevezetése további 4–6%-os hatékonyságjavulást eredményezhet.

A G2 tézis szempontjából mindez azt jelenti, hogy a közép-európai e-carsharing piac jelenlegi formájában önmagában még nem tekinthető stabilan gazdaságilag fenntarthatónak. A V2G-re és egyéb kiegészítő bevételi lábakra épülő, hálózatvezérelt modell ugyanakkor reális opciót

kínál a fenntarthatóság irányába, és a közösségi elektromobilitást a V2G bevezetésének egyik első, gazdaságilag is megalapozott terepévé teheti.

4.3 R1: Az elektromobilitási indikátorrendszer és klaszterezés eredményei az Európai Unióban

Az R1 blokk eredményei azt mutatják, hogy az elektromobilitás fenntarthatósága az Európai Unióban többdimenziós térben értelmezhető, és az EU27 tagállamai a hárompilléres indikátorrendszer alapján jól elkülöníthető országcsoportokba rendezhetők. Az elemzés három kulcsindikátorra épül: az elektromos járművek lakosságarányos penetrációjára (EV/1000 fő), a nyilvános töltőinfrastruktúra lakosságarányos sűrűségére (Töltő/100 000 fő), valamint az alacsony karbonkibocsátású villamosenergia-termelés arányára (Alacsony C-kibocsátás (%)). A klaszterezés célja nem országok „legjobb–legrosszabb” rangsorának felállítása, sokkal inkább azon fenntarthatósági profilok azonosítása, amelyek a műszaki adaptáció, az infrastruktúra-hozzáférhetőség és az energiarendszeri dekarbonizáció együttes állapotát írják le. A módszer ezáltal a V2G-integráció várható mozgásterét is átláthatóvá teszi.

Fejlett	Hollandia, Svédország, Dánia, Belgium, Finnország, Ausztria, Franciaország
Gyorsan fejlődő	Luxemburg, Portugália, Németország, Szlovénia, Spanyolország
Magas potenciál	Szlovákia, Horvátország, Magyarország, Lettország, Írország, Olaszország, Észtország, Ciprus
Feltörekvő	Görögország, Csehország, Románia, Litvánia, Bulgária, Málta, Lengyelország

5. táblázat Az EU27 tagállamainak elektromobilitási klaszterbesorolása az EV/1000 fő, a töltőpont/100 000 fő és az alacsony C-kibocsátás alapján
 Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján

A három indikátor eltérő skálája és eloszlása indokoltta tette, hogy a klaszterbesorolás három, egymást kontrolláló számítási eljárásra épüljön: a rangsor alapú pontszám a relatív pozíciók stabilitását, a min–max normalizálás a 0–1 közé skálázott kompozit értéken keresztül az összehasonlíthatóságot, míg a z-score standardizálás a statisztikai értelemben vett összehasonlíthatóságot biztosította az EV-penetráció (EV/1000 fő), a töltőinfrastruktúra-sűrűség (töltőpont/100 ezer fő) és az alacsony karbonintenzitású villamosenergia-arány dimenzióiban. A standardizáláshoz használt EU27-es z-score paraméterek (μ , σ) és a kategóriaképzéshez alkalmazott kvartilis küszöbértékek (Q1, Q3) az F18

táblázatban szerepelnek. A végső klasztercímkek a három módszer eredményeiből, többségi egyezés nyomán adódtak.

A módszerek viszonylatában a konzisztenciát jelző robusztussági ellenőrzés tanúsága szerint 18 ország vonatkozásában tökéletes (3/3) egyezés adódott. Részleges (2/3) átfedés 9 tagállam kapcsán jelentkezett. Az 1/3 arányú szinkronitás nem fordult elő. A besorolás következképpen összességében stabilnak tekinthető. Az eltérések a határesetek érzékenységi értelmezéseként kezelhetők. Az országokénti besorolások és a három számítási eljárás (z-score, min–max, rangsor) szerinti összevetés részletes táblázatos bontását a F19F19. táblázat Klaszterezési eredmények összevetése: z-score, min–max és rangsor alapú mutatók, többségi klaszterrel (EU27) Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján F19. táblázat Klaszterezési eredmények összevetése: z-score, min–max és rangsor alapú mutatók, többségi klaszterrel (EU27) Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján tartalmazza.

Egyezési szint	Országok száma	Érintett országok
3/3 egyezés	18	Hollandia; Svédország; Dánia; Belgium; Finnország; Ausztria; Franciaország; Luxemburg; Portugália; Németország; Szlovénia; Spanyolország; Szlovákia; Magyarország; Írország; Ciprus; Bulgária; Lengyelország
2/3 egyezés	9	Horvátország; Lettország; Olaszország; Észtország; Görögország; Csehország; Románia; Litvánia; Málta
1/3 egyezés	0	–

6. táblázat Klaszterrobusztusság az EU27-ben: a rangsor alapú, min–max normalizált és z-score standardizált besorolások egyezése Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján

A konszenzusos besorolás négy, fenntarthatósági profiljaiban jól elkülönülő országcsoportot azonosít: fejlett piacokat, gyorsan fejlődő piacokat, magas potenciálú fejlődő piacokat és feltörekvő piacokat. A fejlett klaszter 7 országot foglal magában; a három pillér együttesen magas szintje kiegyensúlyozott, rendszerszinten érett profilt jelez, amelyben a BEV-adaptáció és a töltőinfrastruktúra sűrűsége kedvező alacsony karbon kibocsátással párosul, így a villamosenergia-alapú közlekedés kibocsátáscsökkentési potenciálja nagy valószínűséggel ténylegesen realizálódik. A csoport tipikus korlátja, hogy a további előrelépés már

kevésbé „alapfejlesztési”, inkább finomhangolási és rendszerintegrációs jellegű, vagyis a marginális javulások költsége arányaiban nőhet.

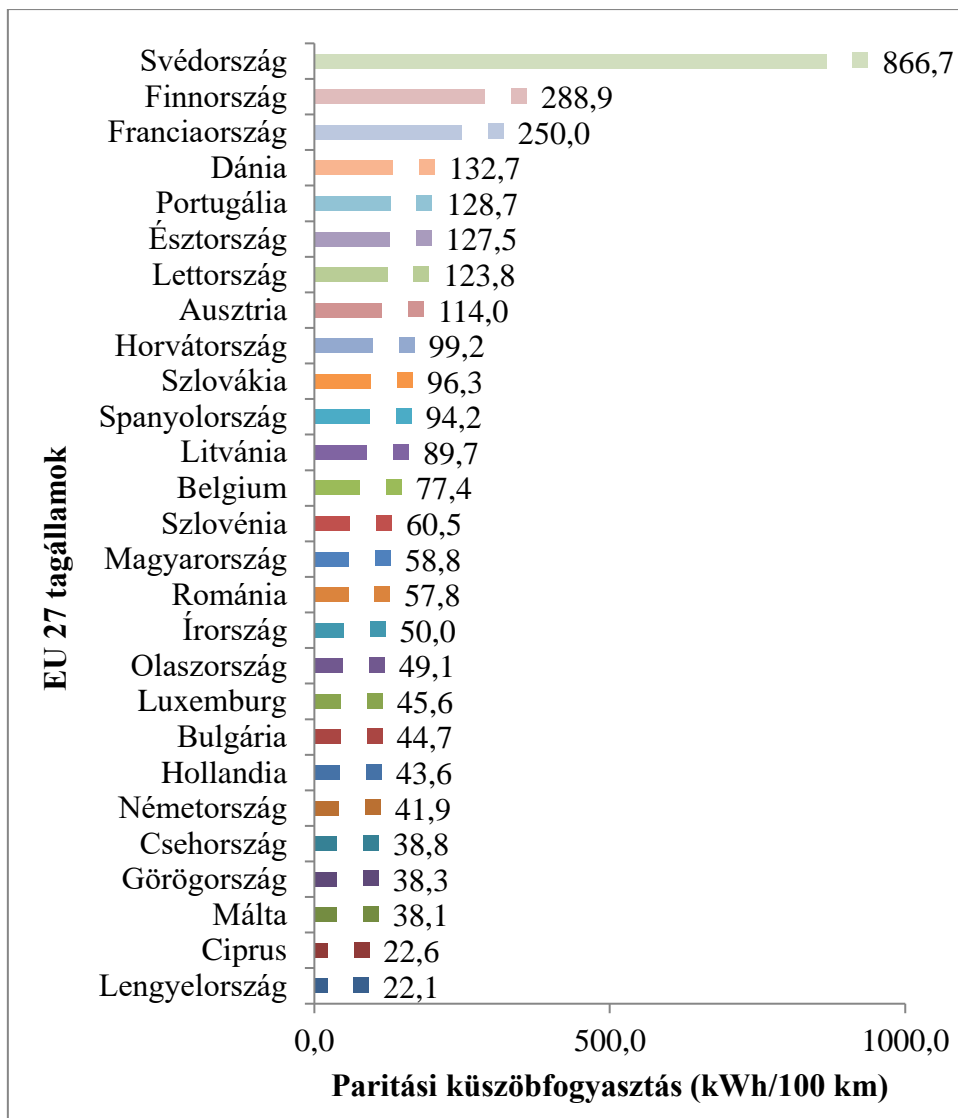
A gyorsan fejlődő klaszterbe 5 ország tartozik. E csoportban legalább egy dimenzió már megközelíti a fejlett szintet, miközben a három pillér közötti egyensúly még nem stabil, ezért a konvergencia ütemét jellemzően a lemaradó dimenzió felzárkózása határozza meg. Tipikus erősség a dinamikus felzárkózás és a célzott beavatkozásokkal gyorsan realizálható konvergenciapotenciál. Ugyanakkor tipikus korlátként a pillérek közötti aszimmetria jelenik meg. Ha az energiamix dekarbonizációja vagy a hozzáférés területi kiegyenlítetttsége elmarad, akkor a technológiai és infrastrukturális eredmények fenntarthatósági hatása aránytalanul tumpul.

A magas potenciálú fejlődő piacok klasztere 8 országot foglal magában. Ezekben az országprofilokban a fejlődés jelei kimutathatók, ugyanakkor több dimenzióban közepes és heterogén teljesítmény figyelhető meg. Ez arra utal, hogy a felzárkózás iránya és üteme szakpolitikai és beruházási eszközökkel érdemben alakítható. Tipikus erősség, hogy a javulási pálya „megfogható”, és gyakran a töltőhálózat bővítése, valamint a piaci ösztönzők erősítése adja a leggyorsabb hatáscsatornát. Ezzel szemben tipikus korlátként az alacsonyabb EV-bázis, az infrastruktúra-sűrűség hiányosságai és/vagy a kevésbé kedvező karbonkibocsátási komponens késleltetheti a fenntarthatósági hatás érvényesülését, illetve a rendszerintegráció várható feltételeit is szűkítheti.

A feltörekvő piacok klasztere 7 országot foglal magába; a három pillérben alacsonyabb kiinduló értékek korai szakaszú fenntarthatósági profilt jeleznek, és azt valószínűsítik, hogy a tömegpiaci elterjedés és a rendszerszintű integráció üteme elsősorban a következő időszak beruházási, szabályozási és energiapolitikai pályájától függ. Tipikus erősség a nagy abszolút fejlesztési tartalék, ugyanakkor tipikus korlát a komplex felzárkózási kényszer: érdemi konvergencia több pillér egyidejű erősítése nélkül csak lassan, széttartó módon várható.

4.4 K1: EV-k használatából eredő CO₂-kibocsátás és a villamosenergia-mix összefüggései

A vizsgálati adatok tükrében a BEV-ek üzemeltetéséhez köthető CO₂-terhelés nem tekinthető egységesen alacsony kibocsátásnak. A fajlagos szennyezés nagyságát az adott ország villamosenergia-termelésének karbonintenzitása és a modell fajlagos energiafogyasztása kombináltan határozza meg. A viszonyítási alapot egy 130 g/km emisszióval rendelkező referencia belső égésű változat jelenti.



4. ábra Paritási küszöbfogyasztás (e*) EU27 tagállamokban (ICEV referencia: 130 g/km)
 Forrás: saját szerkesztés és számítás.

Az EU27 tagállamok karbonintenzitásához illesztett, 14–30 kWh/100 km fogyasztási tartományban a relatív emissziós pozíciók egyértelműen elkülönülnek. Alacsony karbonintenzitású energiamix mellett a BEV-ek üzemeltetési kibocsátása a fogyasztási tartomány nagy részében stabilan a referenciaérték alatt marad, míg magas karbonintenzitás esetén már mérsékelt fogyasztásnövekedés is paritásközeli, illetve paritás feletti tartományt eredményezhet. A teljes kombinációs teret és a hozzá tartozó numerikus értékeket a F20. táblázat tartalmazza.

A hálózatfüggő eredmények országonként egyetlen küszöbmutatóval is összefoglalhatók. A paritási küszöbfogyasztás azt a fajlagos fogyasztási értéket jelöli, amelynél a BEV üzemeltetési kibocsátása megegyezik a 130 g/km-es referencia ICEV kibocsátásával. A 4. ábra azt mutatja, hogy alacsony karbonintenzitású rendszerekben ez a küszöb magas értékre tolódik, így a BEV-ek üzemeltetési előnye széles tartományban fennmarad. Ezzel szemben magas karbonintenzitású villamosenergia-termelés mellett a paritási küszöb alacsony, ami szűkíti azt a fogyasztási sávot, ahol az elektromos hajtás üzemeltetési előnye érvényesül.

Az eredmények összegzése szerint az elektromobilitás üzemeltetési dekarbonizációs hatása az EU-tagállamokban elsődlegesen a villamosenergia-rendszer kibocsátási szerkezetének függvénye. A paritási küszöbmutató a függelékben szereplő kombinációs térrel együtt országonként összehasonlítható, kvantitatív alapot ad a fejezet későbbi környezeti és szabályozási következtetéseire.

4.5 R2: A V2G-technológia szerepe a regionális villamosenergia termelés–fogyasztás kiegyenlítésében

A 3.4 fejezet hálózati kontextusai és a 3.7 fejezet energiamix-szenáriói nyomán számszerűsíthető: a V2G-kompatibilis BEV-flották regionális léptékben képesek mérsékelni a termelés–fogyasztás egyensúlytalanságait. A számítások értelmében már közepes V2G-részvételi arány esetén is kimutatható csökkenés jelentkezik a csúcsterhelési helyzetekben. Javul a rendelkezésre álló rugalmasság aránya. Enyhül a hálózat átlagos karbonintenzitása is. Ez kiemelten érvényes az azon közép-európai régiókra, melyekben az időjárásfüggő megújuló termelés ingadozása hálózati korlátokkal kombináltan fokozott kiegyenlítési igényt generál.

A dimenziók mentén rendszerezett, becsült eredménytartományokat összefoglaló indikátormátrix a F21. táblázatban szerepel. Gazdasági dimenzióban a V2G-hatás a szabályozási szolgáltatásokból származó bevételi potenciálon és a kiegyenlítési kiadások csökkenésén révén érvényesül. A nemzetközi demonstrációs tapasztalatokkal összhangban egy 5–10 kW névleges teljesítményű, rendszeresen szolgáltató egység nagyságrendileg 1000–1800 euró/év bevételt generálhat a primer frekvenciaszabályozási piacokon. Ezzel szemben a kiegyenlítési energia átlagos költsége tipikusan 4–5 €/MWh mértékben mérséklődhet. A csúcsterhelések csökkenése a hálózatfejlesztési igények időbeli kitolásának irányába hat. Ez mérsékli a kritikus kapacitásbővítések kényszerét.

A hálózati stabilitás és rugalmasság dimenziójában a kétirányú üzemmódhoz köthető hatás a feszültségprofil javulásában és a rugalmassági mutatók kedvező elmozdulásában ragadható meg. A szimulációs kimenetek

tükrében a feszültség-ingadozások amplitúdója 3–4%-kal tompítható. A kritikus városi és elővárosi szakaszokon 15–20%-os igénybevételi maximum-csökkenés érhető el. A rugalmassági index 25–35%-os javulása a részvételi arány növelésével párhuzamosan jelentkezik. Főként ott mutat erősödő hatást, mely pontokon a fotovoltaikus és széltermelés koncentrált, továbbá a hálózati szűk keresztmetszetek korlátozzák a rugalmas betáplálást.

Energia- és klímapolitikai dimenzióban a V2G a fosszilis kiegyenlítő kapacitások igénybevételének visszafogásán és a megújulók hasznosításának javításán által fejt ki hatását. A kielemezett scenáriókban az infrastruktúra átlagos CO₂-intenzitása 20–25%-kal redukálható. Ez például 380 gCO₂/kWh körüli értékről mintegy 295 gCO₂/kWh nagyságrendre történő mérséklést jelent. A megújuló energiaforrások kihasználtsága 15–20%-kal javulhat. A napközbeni fotovoltaikus többlet átmenetileg a járműakkumulátorokban tárolható. Később a kora esti fogyasztási csúcs idején hasznosítható. Ez mérsékli a termelés-korlátozás szükségességét.

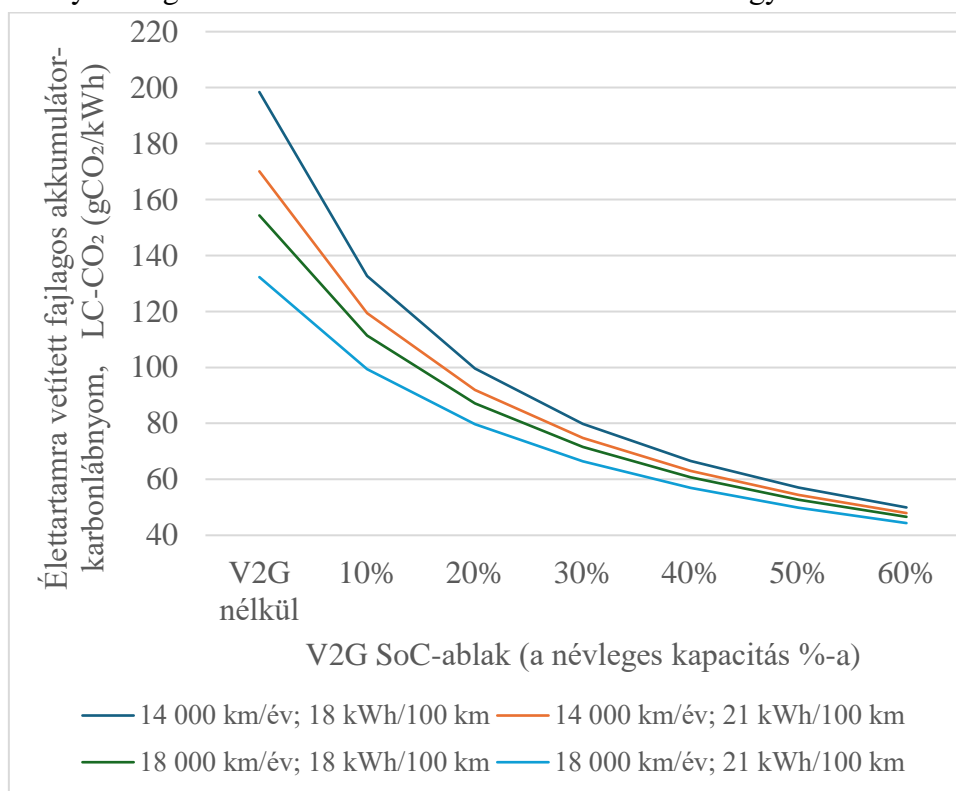
A műszaki vizsgálatok alapján a szabályozott V2G-üzem során az akkumulátor-degradáció nem mutat szükségszerű romlást a hagyományos, egyirányú vételezéshez képest. Ez akkor igaz, amennyiben a vezérlés a terhelési és állapotöltöttségi korlátoknak megfelelően történik. Emellett, a kétirányú töltőinfrastruktúra kihasználtsága a rögzített paraméterek fennállásakor növekszik, ami ezáltal kedvezően befolyásolja a kapcsolódó beruházások költség–haszon viszonyát.

4.6 K2: A V2G-használat hatása a hasznos energiacyklusokra és az akkumulátor fajlagos életciklus-karbonlábnyomára

A mikroszintű scenárióelemzés adatai igazolják: a V2G-részvétel elsődleges, kvantifikálható következménye az akkumulátor-kihasználtság növekedésében érhető tetten. Ezen a csatornán révén módosul az élettartam alatt teljesíthető hasznos energiaszolgáltatás volumene, illetve az élettartamra vetített fajlagos akkumulátor-karbonlábnyom (LC-CO₂). A becslések két éves futásteljesítmény-scenárióra (14 000 és 18 000 km/év) és két fajlagos fogyasztási szintre (18 és 21 kWh/100 km) épültek. A V2G-intenzitást a szolgáltatásra rendelkezésre bocsátott SoC-ablak 10–60%-os tartománya reprezentálta. A V2G nélküli referenciaesetben a napi kapacitásigény az elemzett kombinációkban 19–29% között maradt.

A SoC-ablak fokozatos bővítésével a napi igénybevétel számos scenárióban 70–80% fölé emelkedett. Ez azonos akkumulátorkapacitás fennállásakor a rendszerintegrált üzemhez rendelhető hasznos energiacyklus-mennyiség érdemi növekedésére utal. Ennek számszerű

összefoglalását a F22. táblázat tartalmazza. Ezzel konzisztens módon a V2G nélküli üzemhez tartozó élettartamra vetített fajlagos akkumulátor-karbonlábnyom 132–198 gCO₂/kWh tartományban adódott, miközben a SoC-ablak lépésenkénti nyitásával az értékek a vizsgált szélső esetekben 44–50 gCO₂/kWh sávig csökkentek; a kapcsolódó becsléseket az F23 táblázat rögzíti. A scenáriók egyik markáns mintázata: a SoC-ablak növelésével párhuzamosan mérséklődik a futásteljesítmény és a fajlagos fogyasztás okozta eltérés az LC-CO₂ értékekben. Alacsonyabb V2G-intenzitásnál a használati profilok relációjában a különbségek még jól elkülönülnek. Nagyobb SoC-ablaknál azonban a számok konvergálnak. A használati paraméterek hatása egyre kisebb mértékben mutatkozik meg a fajlagos életciklus-mutatóban. Ezt a konvergenciát a 5. ábra szemlélteti, amelyben a görbék a SoC-ablak bővítésével közelítenek egymáshoz.



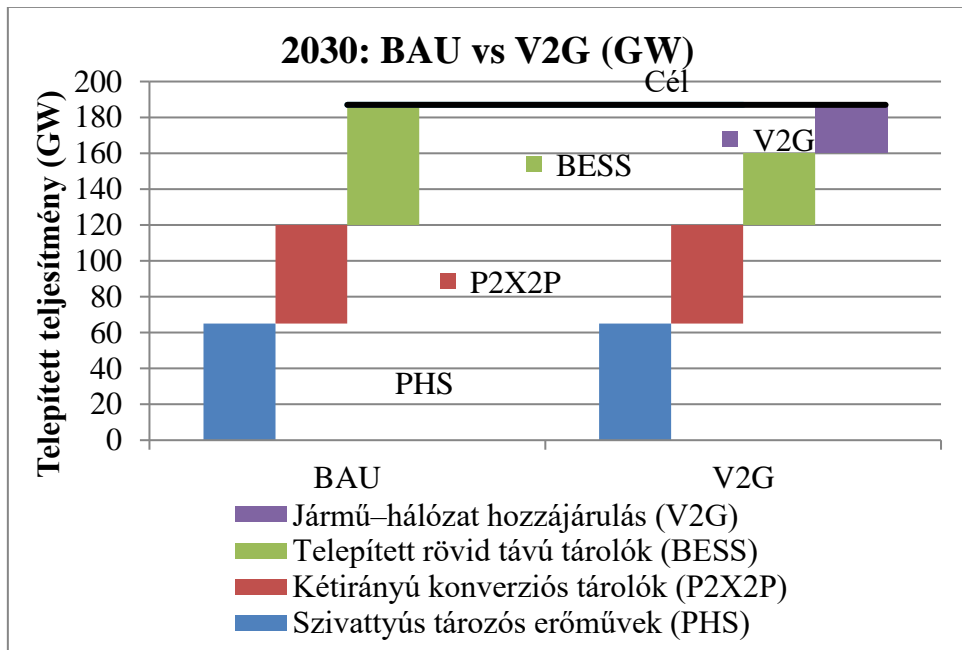
5. ábra Az akkumulátor élettartamra vetített fajlagos karbonlábnyomának (LC-CO₂) alakulása a V2G SoC-ablak függvényében Forrás: saját szerkesztés és számítás

A V2G-intenzitás növelése a napi akkumulátor-kihasználtság érdemi emelkedését eredményezi. Ezzel párhuzamosan a fajlagos LC-CO₂ mutató jelentős mérséklődést mutat. A kimeneti következtetés a K2 tézis szempontjából az alábbi. A V2G-üzem a hasznos energiaciklusok bővítésének útján alkalmas a gyártásból származó, egyszeri akkumulátor-

karbonterhet számos élettartam alatti energiaszolgáltatásra „szétteríteni”. Ezzel egyidőben a használati paraméterek (futásteljesítmény, fogyasztás) hatása a SoC-ablak nyitásával fokozatosan enyhül.

4.7 K3: A V2G felhasználása szektorszintű karbonmegtakarítási potenciálja

Az EU 2030-as tárolási teljesítményigényének (gigawatt, GW) technológiai összetételét az 6. ábra két szerkezeti állapotban szemlélteti: az alapforgatókönyvben (business as usual, BAU), majd a jármű-hálózat integrációt figyelembe vevő esetben. A bemeneti paraméterezés azt rögzíti, hogy a 2030-ra vonatkozó teljes tárolási teljesítményigény 187 GW, amelynek meghatározott része szivattyús-tározós energiatárolásként (pumped hydro storage, PHS) és kétirányú konverziós energiatárolásként (power-to-x-to-power, P2X2P) teljesül, míg a rövidtávú csomag a stacioner akkumulátoros energiatárolók (battery energy storage system, BESS) és a V2G-megoldások viszonyát teszi értelmezhetővé (European Association for Storage of Energy (EASE), 2022).



6. ábra Az EU 2030-as tárolási teljesítményigényének összetétele BAU és V2G forgatókönyvben, a 187 GW-os célértékhez viszonyítva.

Forrás: (European Association for Storage of Energy (EASE), 2022 alapján saját szerkesztés)

A V2G hozzájárulása nem a teljes igényszintet módosítja, hanem a rövidtávú portfólión belül szerkezeti átrendeződést jelez: a V2G által nyújtott rugalmasság a dedikált stacioner BESS igényének egy részét

kiváltja, miközben a célértékhez viszonyított összesített tárolási teljesítményigény változatlan marad. Ez a megjelenítés eredményoldalon azért lényeges, mert az értelmezési fókusz a „mennyit kell telepíteni összesen?” kérdésről a „mely technológiai elemek viselik a rugalmassági szolgáltatások terhét?” kérdésre helyezi át. A V2G-részvételi szintek eredményoldali kimeneteit 7. táblázatössze három scenárióban (pesszimista–átlagos–optimista). A scenáriók között a meghatározó különbség a V2G részarányának (s_V2G) változása, amely a V2G-hozzájárulás teljesítményében (P_V2G, GW) és a kiváltott stationer tárolókapacitás energiában kifejezett megfelelőjében (E_kiváltott, gigawattóra, GWh) is monoton növekedést eredményez. A táblázatban szereplő értékek azt jelzik, hogy a V2G részarány 0,3-ról 0,5-re történő emelése a V2G-hozzájárulást 20,1–33,5 GW sávba tolja, miközben a kiváltás energiamegfelelője 40,2–67 GWh közé emelkedik.

Egység	Scenáriók		
	Pesszimista	Közepes	Optimista
s_V2G	0,3	0,4	0,5
P_V2G (GW)	20,1	26,8	33,5
E_kiváltott (GWh)	40,2	53,6	67
CO₂ elkerült gyártás (Mt CO_{2e}, középérték)	3,518	4,690	5,863

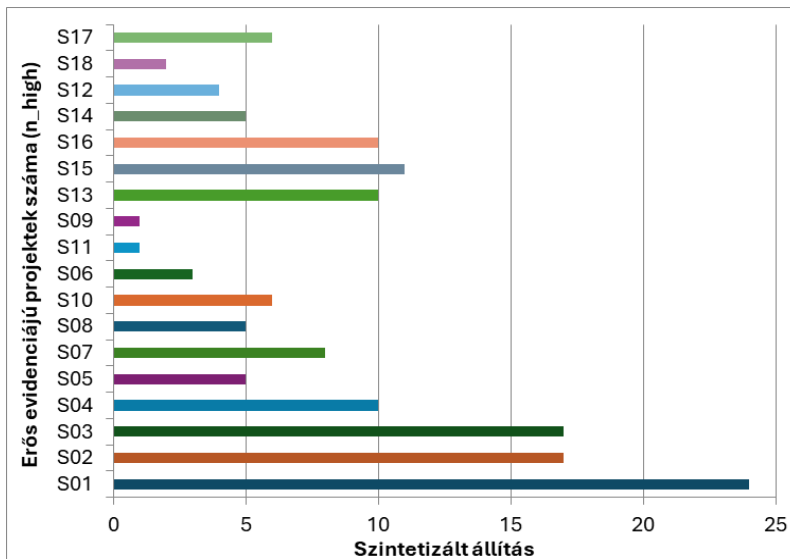
7. táblázat V2G-részvételi scenáriók Forrás: saját szerkesztés és számítás

A kiváltott stationer tárológyártás elkerült szén-dioxid-egyenérték-terhelése (carbon dioxide equivalent, CO_{2e}) az eredmények alapján az elkerült gyártási teher 3,518 Mt CO_{2e}-ről 5,863 Mt CO_{2e}-re növekszik a pesszimista és optimista scenárió között. A pontbecslések mögötti összefüggés lineáris, és a táblázatban szereplő trendekkel konzisztens: a magasabb V2G-részarány nagyobb kiváltott stationer tárolókapacitást implicál, ami a gyártási karbonintenzitás rögzített középértéke mellett szükségszerűen nagyobb elkerült CO_{2e}-terhelést eredményez. A kimenet értelmezésekor érdemes hangsúlyozni: az itt közölt CO_{2e}-értékek kizárólag a kiváltott BESS-gyártásra vonatkoznak. Következésképpen a rendszerüzemi üzemeltetési hatások és az emissziók időbeli dinamikája nem része a szóban forgó eredményegységnek. Ez a lehatárolás csökkenti a módszertani átfedések kockázatát. Egyértelművé teszi világossá, miszerint a táblázat a „kiváltott gyártás” mechanizmusának nagyságrendi, scenáriófüggő kimenetét dokumentálja.

4.8 M1: Gazdasági, technológiai és viselkedésalapú ösztönzők hatása a V2G-flották hálózati integrációjára

A 35 releváns V2G és V2X projekt harmonizált claim-korpuszában összesen 546 strukturált állítás került azonosításra és egységes rendszerben rögzítésre. Az evidenciaerősség szerinti megoszlás 153 erős, 271 közepes és 122 gyengébb alátámasztottságú tételt jelez, ami azt mutatja, hogy a több projekten át stabilan dokumentált állításréteg érdemben jelen van, ugyanakkor a korpusz egészét nem kizárólag ez a réteg határozza meg. A pillérenkénti evidenciaerősség-eloszlás áttekintése az F9. ábrán szerepel, míg az A-erősségű állítások claim-csoportonkénti koncentrációját az F10. ábra összegzi. E két függeléki vizualizáció alapján a korpusz szerkezete olyan mintázatot rajzol ki, amelyben az erős evidenciák meghatározott témacsomópontok köré rendeződnek, miközben a dokumentáció típusa és részletezettsége projektenként heterogén marad, ezért a következtetések a konzisztensen ismétlődő, több projekten át visszatérő megállapításokra épülnek.

A szintézis a korpuszból képzett 18 szintetizált állítást alkalmaz, amelyek kapustruktúra szerinti rendezése az eredmények interpretációjának szervező elvét adja. A szintetizált állításokhoz rendelt, erős evidenciát mutató projektek számát jelző n_high mutató 1 és 24 közötti tartományban változik, ami röviden rögzíti, hogy a korpusz mely pontokon jelez több projekten át kifejezetten erős dokumentáltságot, és hol jelenik meg szűkebb projektszámra épülő, de tartalmilag koherens megállapítás.



7. ábra Erős evidenciát mutató projektek száma (n_high) az S01–S18 szintetizált állítások szerint
Forrás: saját szerkesztés és számítás

A rövidített állításcímek és azonosítóik áttekintése a 8. táblázatban jelenik meg.

Rang	ID	Rövidített állításmegfogalmazás
1.	S01	Kétirányú mérés, mérőcsere és adatelérés a bevezetés működési minimuma, enélkül az elszámolás és a minőség nem ellenőrizhető.
2.	S02	A jogcímek és felelőségek tisztázása, a kettős elszámolás kockázatának csökkentésével, a skálázás előfeltételeként jelenik meg.
3.	S03	Szabványosított kommunikáció és rendszerkapcsolat hiányában tartósan magas maradhat a súrlódás és hibaarány, ezért kompatibilitási minimum szükséges.
4.	S04	A csatlakozó-ökoszisztéma és járműportfólió országonként eltér, ezért célzott programtervezés és méretezési érzékenység kezelése indokolt.
5.	S05	Időben behatárolt, korlátozott pilot-keretek gyorsíthatják a tanulást, és átmeneti eltéréseket, valamint rendezett adatmegosztást tehetnek szükségessé.
6.	S07	Lokális hálózati érték akkor realizálható, ha a hálózati szereplő értékeli és elszámolja, ami célzott tarifa-logikát és pontos mérést igényel.
7.	S08	A dinamikus és időfüggő tarifák részvételnövelő hatása transzparens elszámolás és korlátozott felhasználói költségkitettséggel mellett érvényesül.
8.	S10	A rendelkezésre állás díjazása csökkentheti a részvételi kockázatot, ha a mérés és a szolgáltatásminőség auditálható, különben a fegyelem romolhat.
9.	S06	A frekvenciaszabályozási termékek korai, mérhető értékcsatornát jelentenek, ha a belépési és teljesítménykövetelmények teljesíthetők és összehangoltak.
10.	S11	A kiegyenlítő piaci küszöbök és az aggregációs hozzáférés alakítja a részvételt, ezért az intézményi torlódások a skálázás korlátjai lehetnek.
11.	S09	A programértékelésben a műszaki teljesítmény és az elszámolási működés elkülönítése indokolt, mert eltérő hibakockázatot és beavatkozási pontot jelez.
12.	S13	A minimális töltöttségi szint és az indulási igény korlátozza a flexibilitást, ezért a paraméterezés a kontroll- és kockázatérzethez illesztendő.
13.	S15	A töltési és visszatáplálási eseményekről, valamint a pénzügyi következményekről adott transzparens tájékoztatás csökkentheti az elutasítást.
14.	S16	Környezeti és rendszerhasznossági visszajelzések önmagukban ritkán elegendők, de határesetben befolyásolhatják a döntést, ezért rövid pilot indokolt.
15.	S14	A felhasználóbarát alkalmazás és az automatizált csatlakozás, kilépés és hibakezelés támogathatja a részvétel fenntarthatóságát és a stabil működést.
16.	S12	A kétirányú töltőberendezés költsége és kompatibilitási bizonytalansága csökkentheti a nettó ösztönzőhatást, ezért célzott költségmérséklés indokolt.
17.	S18	Az adminisztratív árbeavatkozások ronthatják a programkörnyezet kiszámíthatóságát, ami gyengítheti az ösztönzők hitelességét és a beruházási hajlandóságot.
18.	S17	A használt BEV-import magas aránya minőségi heterogenitást és kockázatot növelhet, ezért hiteles akkumulátor-állapot mérés és tesztinfrastruktúra szükséges.

8. táblázat Az S01–S18 szintetizált állítások rangsora és rövidített megfogalmazása
Forrás: Saját szerkesztés

Az állításokhoz kapcsolódó kulcsmutatók (Gate-besorolás, kvadráns, projektkonvergencia C_s, maximális bizonyítékszint E_s, valamint n_high) az M1 módszertanban rögzített definíciók szerint kerülnek előállításra és értelmezésre. A kapustruktúra szerinti értelmezésben az előfeltételi csomópontok olyan, több projekten át erősen visszatérő mintázatokkal írhatók le, amelyek a mérhetőséghez, az adathozzáféréshez és a technológiai illesztéshez kapcsolódnak. E körben az S01 állítás kiemelkedő n_high értéke azt jelzi, hogy a kétirányú mérés, a mérőcsere és az adatelérés követelménye a projektdokumentációkban ismétlődően olyan minimumfeltételként jelenik meg, amelyhez az elszámolás ellenőrizhetősége és a szolgáltatásminőség követhetősége kapcsolódik. A Gate 1-hez sorolt állítások további része azt a képet erősíti, hogy a kompatibilitási minimumok és a rendszerkapcsolati illesztés hiánya a részvételi súrlódások tartós fennmaradásával együtt jelenik meg, továbbá a járműportfólió és a csatlakozó-ökoszisztéma országonként eltérő szerkezete olyan bevezetési teret hoz létre, amelyben a programméretezés érzékenysége és a célzott tervezési megoldások igénye visszatérően dokumentált. Az előfeltételi körben megjelenő, korlátozott körű pilot-keretekre vonatkozó állítás a projektek ismétlődő jelzései alapján olyan megközelítésként értelmezhető, amelyben az időben behatárolt tesztelés a tanulási ciklus gyorsításával és rendezett adatmegosztási feltételek kialakításával kapcsolódik a bevezetés gyakorlati kockázatainak mérsékléséhez.

A közvetlen beavatkozások kapujában a korpusz olyan összefüggéseket rögzít, amelyek a monetizálható értékcsatornák, a tarifális konstrukciók és a részvételt befolyásoló programparaméterezés együttes szerepére utalnak. A lokális hálózati értékhez kapcsolódó megállapítások azt jelzik, hogy a V2G akkor válik ténylegesen realizálható hálózati erőforrássá, ha a hálózati szereplő az értéket értékeli és elszámolja, és ehhez olyan díjstruktúra társul, amely a mérési pontosságot és az elszámolási logikát is illeszti. A dinamikus és időfüggő tarifák hatását leíró állítások a projektdokumentációk alapján tipikusan olyan feltételekhez kötődnek, amelyek a transzparens elszámolást és a felhasználói költségkivettség korlátozhatóságát emelik ki. A rendelkezésre állás díjazása több projektben a részvételi kockázat mérséklésének lehetséges eszközeként jelenik meg, ugyanakkor az összkép szerint ennek stabilitása a mérés és a szolgáltatásminőség ellenőrizhetőségéhez kapcsolódik. A frekvenciaszabályozási termékek és a kiegyenlítő piaci hozzáférés kapcsán a korpusz olyan korai, mérhető értékcsatornákat azonosít, amelyeknél a belépési feltételek, a teljesítménykövetelmények és az aggregációs hozzáférés intézményi küszöbei érdemben befolyásolják a részvételi arány alakulását, és így a skálázás gyakorlati korlátjaként jelenhetnek meg.

A szükséges intézményi keretek kapujában az eredmények egy olyan stabilizáló csomópontot rajzolnak ki, amelyben a jogcímek tisztázása, a felelősségi körök rögzítése és a kettős elszámolás kockázatának kezelése több projekten át következetesen a skálázhatósághoz kapcsolódó feltételrendszerként jelenik meg. A programok értékelésére vonatkozó állítások azt jelzik, hogy a műszaki teljesítmény és az elszámolási működés elkülönített kezelése a projektekben nem pusztán definíciós kérdésként, hanem eltérő hibakockázatok és eltérő beavatkozási pontok azonosításának feltételeként jelenik meg. A felhasználói paraméterezéshez kapcsolódó megállapítások, így a minimális töltöttségi szint és az indulási igény feltételrendszere, következetesen arra utalnak, hogy a rendelkezésre álló flexibilitás nagysága és a részvétel fenntarthatósága együtt mozog a felhasználói kontrollérzet és kockázaterzet kezelésével, ami a programkonstrukciók stabilitási dimenzióját erősíti.

A rendszerszintű kiterjesztés kapujában a korpusz olyan érzékenységi pontokat rögzít, amelyek a programkörnyezet kiszámíthatóságához, a részvételi döntések tartósságához és a minőségkontrollhoz kapcsolódnak. Az adminisztratív jellegű árbeavatkozásokra vonatkozó állítás a projektek jelzései alapján úgy értelmezhető, hogy a kiszámíthatóság romlása a programok hitelességét és a beruházási hajlandóságot is gyengítheti, ami a hosszabb távú konstrukciók stabilitásának kockázati tényezőjévé válhat. A használt BEV-import magas arányához kapcsolódó megállapítás nem általánosítható regionális törvényszerűségként, hanem egyes piacokra jellemző heterogenitási tényezőként kerül rögzítésre, és ebben a keretben a minőségi szórás, valamint a teljesítménykockázat mérséklésének feltételét az akkumulátor-állapot hiteles méréséhez és a tesztelési infrastruktúrához kapcsolja. A részvétel fenntarthatóságához kapcsolódó kommunikációs és visszajelzési állítások azt jelzik, hogy a töltési és visszatáplálási eseményekről és pénzügyi következményekről adott transzparens tájékoztatás reputációs feltételként jelenik meg, miközben a környezeti és rendszerhasznossági visszajelzések önmagukban tipikusan nem elegendők, ugyanakkor határesetben képesek lehetnek a döntést befolyásolni, ami rövid, ellenőrizhető pilot-formák indokoltságát támaszthatja alá. A felhasználóbarát alkalmazási környezet, az automatizált csatlakozási és kilépési folyamatok, valamint a hibakezelés a korpusz alapján a részvétel fenntarthatóságát és a stabil működést támogató tényezőként jelenik meg, míg a kétirányú töltőberendezések beruházási költsége és kompatibilitási bizonytalansága több projektben a nettó ösztönzőhatás csökkenésének lehetséges forrásaként kerül leírásra, ami célzott költségmérséklési és egységes követelményrendszeri megoldások irányába mutat.

5. Diszkusszió és következtetések

Az alábbiakban az egyes témakörökhöz kapcsolódó főbb összefüggések, valamint a gazdasági, regionális és környezeti hatások integrált értékelése kerül sorra, kitekintéssel a gyakorlati alkalmazhatóságra és a további kutatási irányokra.

5.1 Az eredmények szintézise és értelmezése

A disszertáció központi kérdésfelvetése arra a problémára irányult, hogy a BEV-technológia és a V2G-funkció mennyiben tekinthető gazdasági, környezeti és intézményi értelemben életképes megoldásnak a közép-európai régió sajátos feltételrendszerében. Ez a felvetés kiemelten vonatkozik Magyarországra. A vizsgálat négy, egymással szorosan összefüggő dimenzió mentén adott választ erre. Az első (G1–G2) a magánhasználatú BEV-ek és az elektromos autómegosztás (carsharing) teljes körű birtoklási költsége és gazdasági fenntarthatósága. A második (K1–K3) a BEV-ek életciklus-bázisú környezeti lábnyoma. A harmadik (R1–R2) az elektromobilitás regionális fenntarthatósági mintázatait vizsgálja az Európai Unióban (EU-27). Végül a negyedik (M1) a V2G-flották hálózati integrációját meghatározó ösztönzési és intézményi konfigurációt elemzi. E négy dimenzió együttese rajzolja ki azt a régióspecifikus válaszkeretet, melybe a disszertáció átfogó kutatási kérdés- és hipotézisrendszere illeszkedik.

A gazdasági és használati dimenzió (G1–G2) kimenetei rámutatnak arra, hogy a BEV-ek közép-európai versenyképessége alapvetően feltétel- és scenáriófüggő. A módszertani fejezetben bemutatott modellrendszer értelmében a magánhasználatú BEV-ek kizárólag azon környezetben alkalmasak tartós TCO-előnyre, melyben a futásteljesítmény legalább közepes mértékű. További feltétel, hogy a villamos energia és a folyékony üzemanyagok relatív árrendszere a villamos energia irányába kedvező legyen, a támogatási pálya pedig kellően stabil maradjon. Ilyen konfigurációban egy számjegyű, jellemzően 5–10% tartományba eső BEV-TCO-előny rajzolódik ki a referencia ICE-modellekhez képest. Konzervatívabb kondíciók fennállásakor ez az előny gyakorlatilag eltűnik. A régió sajátossága abban ragadható meg, hogy az új BEV-ek magas árprémiuma miatt a gazdasági racionalitás elsősorban a szekunder piacon érhető el. A másodlagos piaci BEV-ek ára gyorsabban közelít az összevethető ICE-modellekéhez. Következésképpen a TCO-paritás a közép-európai háztartások számára döntően a használtpiac felől lesz elérhető. A carsharing- és flottaoldali modellfuttatások ugyanebbe az irányba mutatnak. A magasabb futásteljesítmény és a flottaszintű működés bizonyos fokokig ellensúlyozza a finanszírozási és kockázati prémiumokat. A

gazdasági életképesség azonban itt is a várospolitikai, parkolási, töltési és potenciálisan a V2G-bevételek együttes konfigurációjától függ.

A környezeti és akkumulátoros dimenzió (K1–K3) adatai az elméleti kontextusban ismertetett életciklus-szemlélettel összhangban állnak. Ezzel szemben régióspecifikus módon árnyalják a BEV-ekkel kapcsolatos elterjedt intuíciókat, és bevezetik a „V2G-paradoxon” fogalmát. Az akkumulátorgyártás a teljes körű életciklus-kibocsátás 30–50%-át is kiteheti, főként a közép-európai termelőkapacitások felfutása esetén. Ez első megközelítésben kedvezőtlen képet fest a technológiáról egy szén- és gázintenzív energiamixben. A módszertani fejezetben részletezett modell mindazonáltal azt igazolja, hogy a közép-európai használati mintázatok fennállásakor, V2G nélküli üzemmódban az akkumulátorkapacitás jelentős hányada kihasználatlan marad. Ezzel egyidőben az élettartamra vetített fajlagos kibocsátás a szóban forgó ténynek megfelelően magasabb. V2G-integrációval – a 20–80% SoC-tartományban, érdemi kapacitáskihasználtság mellett – ugyanazon akkumulátorhoz számos hasznos energiaciklus társul. Ez az életciklusra vetített fajlagos kibocsátást mintegy egyharmaddal csökkentheti. A degradáció eközben nem lineárisan, sokkal inkább mérsékeltebben növekszik. A „paradoxon” lényege abban áll, hogy az akkumulátor többlet igénybevétele megfelelő üzemeltetési ablakban nem lerontja, hanem javítja a fajlagos környezeti szaldót. Ez főként abban az esetben igaz, ha a V2G-részvétel a közép-európai energiamix dekarbonizációját támogatja. A makroszintű V2G-szenáriók erre építve mutatják, hogy egy 10 milliós nagyságrendű V2G-alkalmas flotta 180–300 GWh rugalmassági kapacitást tud nyújtani. Ez számottevően hivatott „kiváltani” a statikus hálózati akkumulátorrendszerek egy részét. Ezáltal az akkumulátorgyártásban és a fosszilis csúcserőművek visszaszorításában is jelentős CO₂-megtakarítást eredményez.

A regionális dimenzió (R1–R2) kimenetei az EU-27 tagállamait három fő indikátor mentén klaszterezik. Ezek a BEV-penetráció, a töltőinfrastruktúra-sűrűség és a megújuló energia részaránya. Ezáltal a G- és K-blokkokban azonosított mintázatokat európai kontextusba helyezik. A klaszterek nem pusztán rangsort, sokkal inkább eltérő adaptációs pályákat jelölnek. Ide sorolhatók a „fejlett piacok”, a „gyorsan fejlődő piacok”, a „fejlődő piacok” és a „feltörekvő piacok”. A magas elektromobilitási teljesítménnyel és tiszta energiamixszel rendelkező csoportban a BEV/V2G-kombináció már a jelenlegi kondíciók fennállásakor is életképes megoldás. Ezzel szemben a „gyorsan fejlődő” klaszter átmeneti helyzetet foglal el. Ebbe a kategóriába számos közép-európai ország, köztük Magyarország is beletartozik.

Itt a modell értelmében a TCO-előny és az életciklus-bázisú kibocsátáscsökkenés elvben elérhető. A megvalósulás azonban a támogatási rendszerek stabilitásának, a szekunder BEV-piac érésének és az energiamix dekarbonizációs ütemének kombinációjától függ. A „fejlődő” és „feltörekvő” klaszterekben a magas CO₂-intenzitás és az infrastruktúra hiánya azon strukturális kötöttséget jelenti, mely esetén a BEV/V2G-előny nagy része rövid távon kizárólag potenciálként marad jelen. A regionális vizsgálat így alátámasztja azt a tényt, hogy a disszertációban azonosított gazdasági és környezeti adatok etérben meglehetősen kondicionáltak.

Az ösztönzési és intézményi dimenzió (M1) az ösztönzőelméleti és diffúziós megközelítésekkel összhangban azt vizsgálja, mely konfiguráció fennállásakor válhat a V2G-részvétel a mindennapi járműhasználat integrált részévé. A módszertani fejezetben bemutatott ösztönzési modell három, egymást erősítő pillért azonosít. Az elsőt a gazdasági ösztönzők alkotják, mint a dinamikus árazás, a bevételmegosztás, a költség- és kockázatallokáció. A másodikat a műszaki előfeltételek jelentik, például az automatizált, felhasználóbarát, „láthatatlan” V2G-részvétel. A harmadikat a viselkedésalapú motivációs tényezők adják, úgymint a gamifikáció, a reputáció és a közösségi narratívák.

Közép-Európában a szabályozási instabilitás, a számlázási és elszámolási gyakorlat komplexitása, illetve az energiaszolgáltatókba vetett bizalom korlátai együttesen szűkítik a V2G-flották skálázásának lehetőségeit. Az M1-megállapítások arra utalnak, hogy ha e tényezők közül bármelyik pillér tartósan hiányos, a részvétel volumene alacsony marad. Ekkor jellemzően szűk, technológiailag affinis felhasználói körre korlátozódik. Ezzel szemben egy koherens, régióspecifikus ösztönző-ökoszisztéma alkalmas lehet a V2G-részvételt racionális döntési környezetbe ágyazni. Ez főként a flották, carsharing-szolgáltatók és vállalati járműparkok vonatkozásában érvényes. Ezáltal a G-, K- és R-blokkokban azonosított potenciált ténylegesen mozgósíthatja.

A négy dimenzió együttes értelmezése a disszertáció kutatási kérdéseire és hipotéziseire is koherens válaszeretet ad. A gazdasági dimenzióhoz kapcsolódó hipotézisek a modell értelmében igazolhatók, melyben a BEV-ek TCO-előnye és a carsharing-flották fenntarthatósága a futásteljesítmény, az energiaárak és a támogatások kombinációjától függ. Ezzel egyidőben a szekunder BEV-piac a közép-európai háztartások számára kulcsszereplővé lép elő.

A környezeti hipotéziseket a „V2G-paradoxon” és a „kiváltott gyártás” kimenetei részben igazolták, V2G-integráció a közép-európai energiamix esetén is alkalmas érdemi életciklus-kibocsátáscsökkenés elérésére. Ennek feltétele az akkumulátorhasználat üzemeltetési ablakának megfelelő

megválasztása. A regionális dimenzióhoz kapcsolódó tételek alátámasztják Közép-Európa sajátos, átmeneti pályáját a „gyorsan fejlődő” klaszter részeként. Ebben a térségben az elektromobilitás és a V2G-integráció sikeressége a makroszintű energiapolitikai és infrastrukturális döntésektől függ. Az ösztönzési és intézményi hipotézisek rámutatnak a V2G-flották hálózati integrációjának komplexitására. A folyamat nem valósítható meg egyetlen ösztönzőtípus dominanciájával. Sokkal inkább a gazdasági, műszaki és viselkedésalapú elemek kiegyensúlyozott kombinációja szükséges.

A vizsgálati adatok tükrében három fő, névvel jelölhető következtetés fogalmazható meg. Az első a feltételes TCO-előny és szekunder piac konklúziója. A BEV-ek közép-európai gazdasági életképessége elsősorban nem az új modellek szegmensében rajzolódik ki, sokkal inkább a szekunder piacon válik láthatóvá. Ott is kizárólag meghatározott futásteljesítmény-, energiaár- és támogatási konfigurációk fennállása esetén érvényesül.

A második a V2G-paradoxon régióspecifikus értelmezése. A V2G-részvétel a megfelelő üzemeltetési tartományban nem gyorsítja aránytalanul az akkumulátor-degradációt. Ugyanakkor a közép-európai energiamix meglétekor is tud érdemi fajlagos LCA-csökkenést és „kiváltott gyártási” CO₂-megtakarítást eredményezni.

A harmadik az ösztönző-ökoszisztéma és klaszterhez kötött pályák összefüggése. A BEV/V2G-integráció sikerét alapvetően az elemzett ország klaszterpozíciójához való illeszkedés határozza meg. Kérdés, az állam alkalmas-e azon gazdasági, műszaki és viselkedésalapú ösztönzőrendszer kialakítására, ami kezelni tudja a közép-európai szabályozási és bizalmi sajátosságokat.

Az elemzési adatok így egy összehangolt, régióspecifikus következtetésrendszert alkotnak. Az elméleti kerettel és a módszertani fejezetben bemutatott modellrendszerrel összhangban a disszertáció alátámasztja a BEV/V2G-kombináció közép-európai életképességének korlátait. Ez a megoldás kizárólag abban az esetben tekinthető valóban validnak, ha a TCO-kondíciók, az energiamix dekarbonizáltsága, az infrastruktúra-fejlettség, a szekunder járműpiac és az ösztönzési ökoszisztéma speciális konfigurációt alkot. Ez a rendszer egyidejűleg alkalmas a gazdasági racionalitás, az életciklus-bázisú kibocsátáscsökkentés és a hálózati rugalmasságnövelés biztosítására.

Ez a kép árnyalja a nyugat-európai fejlett piacokra épülő nemzetközi diskurzust, közép-európai régió nem pusztán követőként azonosítható. Sokkal inkább azon átmeneti térként tűnik fel, melyben a megfelelő intézményi és technológiai döntések esetén a BEV/V2G-integráció önálló fejlődési pályát rajzolhat ki.

5.2 Elhelyezés a szakirodalomban

A BEV-ek TCO-jával foglalkozó nemzetközi szakirodalom túlnyomó része egyetértést mutat az elektromos hajtás hosszú távú versenyképességét illetően. Megfelelő futásteljesítmény, kedvező energiapálya és stabil támogatási környezet fennállásakor a technológia elérheti, akár meg is haladhatja, az ICEV-ek költségszintjét. Ezek a modellek jellemzően magas jövedelmű, kedvező finanszírozási feltételekkel és szabályozási stabilitással jellemezhető piacokra épülnek. Ilyenek a nyugat-európai, skandináv illetve észak-amerikai térségek. A kutatások ritkán kezelik külön elemzési egységként a közép-európai régiót. A szekunder BEV-piac, a hosszabb használati ciklus és a jövedelmi sajátosságok rendszerint kizárólag implicit háttérfeltételként szerepelnek. Nem jelennek meg expliciten modellezett tényezőként.

A disszertáció TCO-modellje egyrészt megerősíti a szakirodalom alapállítását a BEV-ek feltételhez kötött gazdasági versenyképességéről. Másrészt rámutat azon közép-európai sajátosságokra, melyek a globális diskurzusban alig kapnak hangsúlyt. A magasabb diszkontráták, a finanszírozási és szabályozási kockázati prémium, a jellemzően idősebb járműállomány és a másodlagos piaci ICEV-modellek tartós dominanciája kombináltan érezteti hatását. Ennek következményeként a TCO-paritás a régióban később és szűkebb feltételhalmaz esetén lesz elérhető, mint a nyugati országokban.

A modell régióspecifikus újdonsága abban áll, miszerint a BEV-ek gazdasági előnyét nem elsősorban az új típusok szegmensében azonosítja. Sokkal inkább a gyorsan bővülő szekunder BEV-piacon mutatja ki, melyet a nyugat-európai használt állomány beáramlása is formál. Ezáltal a TCO-szakirodalom egy alig kutatott térséggel bővül.

Az elektromos carsharinggel foglalkozó nemzetközi kutatások elsősorban nyugat-európai nagyvárosokra koncentrálnak. A BEV-flották költségstruktúráját a magas kihasználtság, az alacsonyabb energia- és karbantartási kiadások, illetve a várospolitikai támogatások összefüggésében vizsgálják. A V2G-integrációt tárgyaló munkák ezen belül is többnyire kísérleti, kis léptékű pilotprojektekre épülnek. Ezekben az esetekben a rendszer- és üzleti kockázatok jelentős részét közpénzek vagy demonstrációs programok viselik. A közép- és kelet-európai nagyvárosok, illetve a régió sajátos szabályozási és gazdasági feltételrendszere ebben az irodalomban többnyire csupán marginálisan, esetleg egyáltalán nem tűnik fel.

A disszertáció G1–G2 kimenetei egyrészt megerősítik a szakirodalmi tapasztalatot: a BEV-flották a magas futásteljesítmény és a skáláhozadék révén TCO-szempontról kedvezőek lehetnek. Másrészt árnyalják a képet.

A régió nagyvárosaiban a parkolási, közterület-használati és töltési szabályozás instabilitása, a töltőinfrastruktúra heterogén eloszlása és a V2G-bevételek hiánya új típusú kockázatot jelent. A flottaüzemeltetők számára a finanszírozási terhek magasabb szintje, a bizonytalan városi szabályozási környezet, továbbá a hálózati rugalmassági piacok korlátozott hozzáférhetősége azon tényezők közé tartozik, melyek a nyugat-európai üzleti modellek mechanikus átvételét nem teszik megalapozottá. A dolgozat ezáltal az e-carsharing szakirodalom régióspecifikus kiterjesztését kínálja. Rámutat arra a tényre, miszerint Közép-Európában a BEV-bázisú autómegosztás gazdasági fenntarthatósága és V2G-integrálhatósága szorosan függ a helyi önkormányzati, hálózati és támogatási környezet finomhangolásától.

Az akkumulátorokkal foglalkozó LCA-kutatások széles köre hangsúlyozza az akkumulátorgyártás jelentős arányát a BEV-ek teljes körű karbonlábnyomán belül. Az élettartamra vetített kibocsátás ugyanakkor csökkenthető dekarbonizált energiamix és a modellek intenzív használata esetén. A szakirodalomban gyakran megjelenő „battery paradox” arra a feszültségre utal, melyben a gyártási szakasz magas kibocsátása kizárólag abban az esetben kompenzálható, ha a használat során elegendő fosszilis üzemanyag-felhasználást váltanak ki. A legtöbb tanulmány azonban vagy elsődlegesen közlekedési, illetve elsődlegesen hálózati (stacioner) alkalmazásra fókuszál. Ritkán vizsgálja egységes rendszerben a kétféle funkció kombinációját.

A disszertáció K1–K3 adatai azon közös LCA-keretet alkalmazzák, melyben az akkumulátor közlekedési és V2G-használata együttesen szerepel. A vizsgálat kifejezetten a közép-európai energiamix és használati mintázatok kontextusában zajlik. A bevezetett „V2G-paradoxon” fogalma rámutat a jelenlegi régiós használati minták fennállásakor tapasztalható jelenségre. Az akkumulátorkapacitás jelentős része kihasználatlan marad. Ezzel szemben a V2G-részvétel – mérsékelt többletdegradáció mellett – érdemi, 25–35% tartományba eső élelciklus-bázisú fajlagos kibocsátáscsökkenést eredményezhet. A dolgozat ezen a ponton két szakirodalmi szálát kapcsol össze. Egyrészt az akkumulátor-LCA kutatásokat, másrészt a hálózati rugalmassági szolgáltatásokkal foglalkozó V2G-modelleket. Mindezt a közép-európai energiarendszerek magasabb szén- és gázintenzitásának figyelembevételével végzi el. Így új, régióspecifikus értelmezéssel egészíti ki a „battery paradox” köré szerveződő vitát.

Az elektromobilitás regionális diffúzióját vizsgáló tanulmányok többsége az EV-penetráció és a töltőinfrastruktúra-sűrűség összehasonlítására koncentrál. Ez gyakran lineáris rangsor formáját ölti, melyben az EU-

tagállamok az „élenjáróktól” a „lemaradóig” terjedő skálán helyezkednek el. Ezek az elemzések többnyire az EU-átlaghoz, esetleg néhány vezető ország teljesítményéhez viszonyítanak. Ezzel egyidőben kevesebb figyelmet fordítanak az energiamix dekarbonizáltsága, a szabályozási környezet és a gazdasági ösztönzők kombinációjára, illetve arra, hogyan alakítanak ki ezek eltérő, régióspecifikus fenntarthatósági pályákat. Közép-Európa ebben a diskurzusban gyakran egységes „lemaradó” blokkként tűnik fel. A belső heterogenitás vagy a dinamikus felzárkózási mintázatok nem kapnak kellő hangsúlyt.

A disszertáció R1–R2 kimenetei erre a bázisra építve, de azt kiterjesztve, azon három-indikátoros keretet alkalmaznak (EV-penetráció, töltőinfrastruktúra-sűrűség, megújulóenergia-részarány), ami lehetővé teszi az EU-27 tagállamainak klaszterekbe rendezését. A klaszterelemzés eredménye rámutat a közép-európai országok – köztük Magyarország – helyzetére. Nem kizárólag „lemaradóként” azonosíthatók, sokkal inkább egy sajátos „gyorsan fejlődő” csoportot alkotnak. Ebben a csoportban az elektromobilitás terjedése, a szekunder BEV-piac bővülése és az energiamix dekarbonizációja egyszerre van jelen. Mindazonáltal erősen függenek az intézményi és szabályozási stabilitástól. A megközelítés a rangsoroló vizsgálatokat egy klaszteralapú, fenntarthatósági szempontokat integráló értelmezéssel bővíti. Ezáltal árnyaltabb képet ad az EU-27 elektromobilitási térképéről.

A V2G-vel és általában a keresletoldali rugalmassági megoldások ösztönzési mechanizmusaival foglalkozó irodalom két fő irányra bontható. Az elsőt az energiapolitikai és tarifális kereteket, dinamikus árazási sémákat és bevételmegosztási modelleket elemző munkák alkotják. A másodikat a felhasználói elfogadottságot, bizalmat és részvételi hajlandóságot vizsgáló empirikus tanulmányok jelentik. Ezek a kutatások következetesen hangsúlyozzák a műszaki lehetőségek önmagukban való elégtelenségét. A V2G-programok sikere az ösztönzőrendszer átláthatóságán, kiszámíthatóságán és a felhasználói döntési logikával való kompatibilitásán múlik. A legtöbb vizsgálat azon piacokra koncentrál, melyekben a szabályozási stabilitás és az energiaszolgáltatókkal kapcsolatos bizalom magasabb, mint a közép-európai régióban.

A disszertáció M1-hez kapcsolódó ösztönző-ökoszisztéma-kerete e szakirodalmi megállapításokat egyrészt rendszerezi, másrészt a közép-európai intézményi valóságra alkalmazza. A hatszereplős struktúra (állam, jármű- és akkumulátorgyártók, fogyasztók és flottatulajdonosok, DSO/TSO, aggregátorok, hálózati és digitális szolgáltatók) pontosabban tükrözi a V2G-ökoszisztéma komplexitását, mint a hagyományos hármas illetve négyes modellek. A régióspecifikus hozzájárulás lényege a

szabályozási instabilitás, a villamosenergia-számlázás bonyolultsága, a bizalmi deficit és a szekunder járműpiac sajátosságainak explicit kezelése. Így a V2G-integráció feltételei nem csupán elvi síkon érvényesülnek. Sokkal inkább a közép-európai piacokra jellemző, konkrét ösztönző- és kockázatmegosztási konfigurációk mentén írhatók le.

A négy elemzett dimenzió eredményei együttesen igazolják a disszertáció szoros kapcsolódását a BEV/V2G-technológiáról szóló nemzetközi diskurzus fő irányaihoz. Mindazonáltal új szempontokkal is bővítik azt. A TCO- és carsharing-kimenetek a meglévő modellek régióspecifikus kiterjesztését adják. Az akkumulátorokra épülő LCA-megközelítés és a „V2G-paradoxon” új, rendszerszintű nézőpontot kínál az akkumulátorhasználatról szóló vitához. A klaszteralapú regionális elemzés árnyaltabb képet rajzol az EU-27 fenntarthatósági pályáiról. Végül az ösztönző-ökoszisztéma-keret a V2G-integrációt a közép-európai intézményi és gazdasági sajátosságokba ágyazza. Így a dolgozat nemcsak bekapcsolódik a globális BEV/V2G-szakirodalomba. A közép-európai régió következetes fókuszba állításával számottevően hozzájárul annak továbbgondolásához is.

5.3 Kritikai elemzés és korlátok

A dolgozat modellalapú megközelítést alkalmaz. A TCO-, LCA-, V2G- és regionális klasztermodulok szekunder statisztikákra, szakirodalmi paraméterekre és scenárióelemzésre épülnek. Ez a keret jól alkalmas a közép-európai elektromobilitás strukturális sajátosságainak kvantitatív feltárására. Egyúttal összevethetővé formálja az eredményeket a fejlettebb piacokról származó irodalommal. Ugyanakkor egyértelműen behatárolja az állítások érvényességi körét. A modellek pályákat és feszültségpontokat jelölnek ki. Nem determinisztikus jövőképet rajzolnak. Az alábbiakban a legfontosabb módszertani, adat- és értelmezési korlátok, illetve azok következményei kerülnek áttekintésre.

A módszertani keret első, alapvető korlátját a primer adatfelvétel hiánya jelenti. A kutatás nem tartalmaz háztartási kérdőívet, vállalati léptékű, teljes körű pénzügyi adatbázist, terepi mérési programot, akár laboratóriumi degradációs kísérletet. A TCO-kimenetek így a különböző műszaki, használati, finanszírozási és szakpolitikai kombinációk egymáshoz viszonyított pozícióját mutatják. Nem egy konkrét háztartás vagy szolgáltató tényleges pénzáramlatait tükrözik. Az LCA- és V2G-modulok az akkumulátorhasználat és a hálózati rugalmasság lehetséges pályáit vizsgálják. Nem egy „legvalószínűbb” kimenet egyetlen pontbecslését adják. A klaszterelemzés közös mintázatokat azonosít az EU-27 országcsoportjai között. Nem helyettesíti az egyes tagállamok mély,

esettanulmány-bázisú elemzését. A modellek ennél fogva elsősorban strukturális összefüggéseket és érzékenységeket tárnak fel. Kizárólag korlátozottan alkalmasak kauzális hatásbecslésre, esetleg ex post értékelésre.

A modellalapú megközelítés szorosan kapcsolódik az adat- és paraméterbizonytalansághoz. A TCO-modulban alkalmazott járműár-, maradványérték-, biztosítási és karbantartási paraméterek egy közép-európai „átlagos” helyzetet közelítenek. Ezzel szemben a valós gazdasági adatok országonként, városonként és szegmensenként jelentősen eltérhetnek. A carsharing-flottákra vonatkozó kihasználtsági, „dead mileage” és díjszabási feltételezések iparági esettanulmányokra és szakértői becslésekre épülnek. Nem támaszkodnak egységes, publikus vállalati adatbázisra. A jövőbeli energiaárak, támogatási intenzitások és kamatszintek a modellben alternatív scenáriók formájában szerepelnek, nem prognóziként. Éppen az eltérő scenáriók fennálló különbsége mutatja a TCO-pályák érzékenységét ezekre a feltevésekre. Az LCA-paraméterek (akkugyártási emissziók, energiamix, degradációs görbék) szintén széles szakirodalmi tartományban mozognak. A dolgozat a szóban forgó elemek közül konzisztens választ, de nem tudja lefedni az összes lehetséges műszaki variánst. A V2G-modulban használt flotta- és részvételi volumenek (V2G-alkalmas BEV-állomány, SoC-ablakok, elérhető rugalmassági kapacitás) ambiciózus, de hipotetikus feltevések. Ennek következményeként a kimenetek inkább nagyságrendi és irányjelző, semmint pontosan „helyes” pályaként értelmezhetők.

A modellfelépítéshez kapcsolódó tudatos egyszerűsítések tovább szűkítik a levonható technikai következtetések körét. A TCO-modell átlagolt biztosítási díjakkal dolgozik. Aggregált útdíj- és parkolási költségparamétereket használ. A használati profilok homogénebbek, mint a valóságban. A másodlagos piaci BEV-ek degradációja és maradványértéke pedig egyszerűsített, átlagolt feltételezésekre épül. A carsharing-modul éves léptékű TCO- és bevételi struktúrákat alkalmaz. Nem végez órás, illetve negyedórás mikroszimulációt. Ez jól láthatóvá formálja az üzleti modellek fő irányait. Az operatív szintű ingadozásokat és kockázatokat azonban már csupán korlátozottan ragadja meg. Az LCA- és V2G-modulok a hálózati rugalmasságot energiamérleg- és kapacitásszinten kezelik. Nem készül részletes frekvenciaszabályozási, stabilitási vagy konnektivitási modell. Az akkumulátor-degradációt pedig pack-szintű, átlagolt SoH-görbék írják le. Ezek az egyszerűsítések nem teszik érvénytelenné az irányokat. Mindazonáltal egyértelműsítik: a modellek eredményei elsősorban tendenciák és nagyságrendek szintjén értelmezhetők.

Az általánosíthatóság szempontjából a kimenetek elsősorban az EU-27 területére, azon belül a közép-európai régióra vonatkoznak. A TCO-, LCA- és V2G-dinamikák kizárólag korlátozottan vihetők át azon régiókra, melyekben az energiaszerkezet, a szabályozási kultúra vagy a közlekedéspolitikai radikálisan eltér. A közép-európai térségen belül is jelentős különbségek figyelhetők meg a támogatási rendszerek stabilitása, az energiaár-struktúra, a jövedelmi eloszlás és az intézményi minőség tekintetében. A modellek e tényezőket klaszterszinten ragadják meg. Ennélfogva az egyes országokra vonatkozó következtetések típusjellegű mintaként, nem pedig részletes országprofilként értelmezendők.

Időbeli értelemben a vizsgálat fő horizontja 2030. A 2040–2050-es műszaki és szabályozási változások (új akkukémiák, olcsóbb energiatárolás, gyorsabb dekarbonizáció, új gazdasági modellek) azon bizonytalanságot hordoznak, ami túlmutat a jelen modellkeret érvényességi tartományán. Az M1-hez kapcsolódó ösztönző-ökoszisztéma normatív jellegű. A V2G-integráció lehetséges konfigurációit írja le. Nem a jelenlegi szabályozási állapotot rögzíti. Az ehhez kötődő következtetések így „adott intézményi feltételrendszer fennállása esetén” típusú állításként értelmezendők.

A fókuszált modellrendszer szükségszerűen számos dimenziót a vizsgálati körön kívül hagy. Nem készül részletes társadalmi igazságossági elemzés. Hiányzik a jövedelmi decilisek mentén történő vizsgálat a hozzáférés, a költség- és haszonmegosztás, illetve a BEV/V2G-technológia elosztási hatásairól. A felhasználói magatartás és elfogadottság kérdésköre elsősorban kvalitatív formában, az ösztönző-ökoszisztéma részeként érvényesül. Mély, kvantitatív viselkedéstudományi modell nem épül be a keretbe. A hálózattechnikai stabilitás, a frekvenciaszabályozás és a tartalékkapacitások részletes elemzése szintén kívül esik a vizsgálat horizontján. Ugyanez igaz a makrogazdasági és iparpolitikai hatásokra. A modellrendszer nem tartalmaz input–output vagy általános egyensúlyi modellt. Így a foglalkoztatási, beruházási akár versenyképességi következmények csupán közvetve értelmezhetők. Ezek az elhagyások fókusz- és terjedelemválasztásból fakadnak. A cél egy egységes, régióspecifikus modellkeret kialakítása volt. Ebben a TCO-, LCA-, V2G- és regionális megállapítások koherensen kapcsolódnak.

A bemutatott korlátok ellenére is egyértelműen azonosítható a stabil következtetések köre. A modellek következetesen igazolják a közép-európai régióban a BEV/V2G-kombináció speciális jellegét. Ez a megoldás kizárólag azon intézményi konfiguráció fennállásakor alkalmas egyszerre gazdasági, környezeti és hálózati előnyök biztosítására, melyben stabil és célzott támogatási struktúra, dekarbonizálódó energiamix, fejlett töltőinfrastruktúra, transzparens ösztönző-ökoszisztéma és működő

szekunder BEV-piac kombináltan van jelen. A kihasználatlan akkukapacitás és a „V2G-paradoxon” problémája a paraméterválasztástól függetlenül megmarad. A klaszteralapú EU-kép tartós regionális heterogenitást jelez. Az ösztönző-ökoszisztéma többszereplős szerkezete pedig azon strukturális adottság, ami a szabályozási részletektől függetlenül is érvényes.

A korlátok tudatos jelölése így nem gyengíti az értekezés fő üzeneteit. Sokkal inkább pontosabban körülhatárolja az érvényességi teret. Egyben kijelöli a további kutatás irányait is. Ide tartozik a felhasználói magatartás és bizalom empirikus vizsgálata, a szekunder BEV-piac hosszú távú alakulásának követése, a V2G hálózati integrációjának részletesebb rendszerszintű modellezése, illetve a társadalmi igazságossági szempontok integrálása a jelenleg elsősorban gazdasági–környezeti -bázisú keretbe.

5.4 Gyakorlati és szakpolitikai következmények

Jelen alfejezet a modellrendszer kimeneteit gyakorlati és szakpolitikai perspektívából értelmezi. Azonosítja a döntési pontokat a háztartások és magánvásárlók, a flották és carsharing-szolgáltatók, a hálózatüzemeltetők és aggregátorok, továbbá a nemzeti, önkormányzati és EU-léptékű szakpolitikai szereplők számára. Az itt megfogalmazott következtetések feltételes érvényűek. A közép-európai, kiemelten a magyar intézményi és gazdasági kontextus adottságai fennállásakor értelmezendők.

Háztartások és magánvásárlók vonatkozásában a TCO-számítások alapján az új BEV kizárólag abban az esetben tekinthető racionális választásnak, ha a futásteljesítmény legalább közepes–magas. További követelmény az energiaár-struktúra tartós versenyképessége a villamos energiával szemben, illetve a vásárlási és üzemeltetési támogatások többéves stabilitása. E kondíciók hiányában a szekunder BEV-piac lép elő elsődleges belépési csatornává a középjövedelmű háztartások számára.

Ilyen helyzetben indokolt lehet a másodlagos piaci BEV-ekre is kiterjedő célzott ösztönzők, illetve az akkumulátor-állapotot tanúsító, szabványosított információs rendszerek alkalmazása. A szóban forgó elemek mérsékelhetik az információs és finanszírozási kockázatot. Egyúttal közelebb vihetik a gyakorlatot a TCO-modellekben azonosított pályákhoz.

A flották és carsharing-szolgáltatók számára készített vállalati és városi TCO-elemzések igazolják a magasabb futásteljesítmény és a professzionális üzemeltetés szerkezeti költségelőnyét a BEV-flották javára. Ennek előfeltétele a parkolási, közterület-használati és töltési szabályozás kiszámíthatósága. Amennyiben a városi közlekedéspolitiká következetesen flotta- és carsharing-barát eszközöket alkalmaz (dedikált parkolási keretek, logisztikailag kedvező töltőpont-elhelyezés, átlátható díjstruktúrák), úgy a

BEV-bázisú üzleti modellek gazdasági fenntarthatósága a közép-európai kontextusban is megerősödhet. Egyszerű, V2G-kompatibilis csatlakozási és elszámolási keretek, továbbá célzott pilotprogramok meglétekor a V2G-integráció elsőként ebben a szegmensben tűnik reálisan megvalósíthatónak. Nem az elszórt lakossági felhasználás jelenti az elsődleges kitérési pontot.

Hálózatüzemeltetők, aggregátorok és energiaszolgáltatók szempontjából az LCA-megállapítások és a V2G-modul a „kiváltott gyártás” logikáját emelik ki. Ha a V2G-alkalmas BEV-flotta mérete, a részvételi arány és a mozgósítható SoC-ablak elér egy kritikus szintet, a meglévő járműflotta akkumulátorkapacitása számottevően kiválthatja a statikus tárolókapacitás egy részét. Ezáltal mérsékelheti az akkugyártáshoz kapcsolódó emissziót.

Ilyen kondíciók esetén indokolt a hálózatfejlesztési és rugalmassági stratégiák explicit kalkulációja a V2G-flottákkal mint tényleges flexibilitási forrással. Szükséges továbbá azon gazdasági termékek (rövid távú rugalmassági aukciók, kapacitás- és kiegyenlítő piacok, lokális flexibilitási platformok) létrehozása, melyekhez az aggregátorok átlátható, kiszámítható bevétel- és kockázatmegosztási szabályok fennállásakor férnek hozzá. Ha a technikai és intézményi paraméterek nem közelítik a modellben feltételezett tartományt, az LCA-ban azonosított életciklus-előny csupán részlegesen képeződik le rendszer-szinten.

Nemzeti és önkormányzati szakpolitika vonatkozásában a kimenetek együttes értelmezése rámutat a BEV/V2G-integráció izolált kezelésének lehetetlenségére. Rövid távon változó, „stop-go” logikájú támogatási rendszerek ellenére a TCO-számításokban azonosított pályák kizárólag korlátozottan realizálhatók. A beruházási döntések halasztódnak. Ha viszont a BEV-támogatási eszközök, a hálózatfejlesztés és a megújulóenergia-célok integrált, középtávon is előre jelezhető kontextusban érvényesülnek, úgy a dekarbonizációs és regionális klasztereredmények által leírt pályák valószínűbbé válnak. Önkormányzati szinten mindez feltételezi a parkoláspolitikát, a töltési infrastruktúra-fejlesztést, a flotta- és carsharing-támogatást, illetve a V2G-pilot zónák kijelölésének egységes helyi energiastratégiává válását. Ennek korlátját a hálózati és költségvetési kapacitások jelentik. EU-s perspektívából a klaszterelemzés abban az esetben indokolja a differenciált eszközrendszert, ha a közös célok mellett a közép-európai TCO- és LCA-sajátosságok explicit módon megjelennek a támogatási és szabályozási keretekben. Nem pusztán az élenjáró országok mintái kerülnek kiterjesztésre.

A modellrendszer gyakorlati és szakpolitikai implikációi azon feltételhalmazra mutatnak rá, melynek fennállásakor a BEV/V2G-integráció Közép-Európában egyszerre alkalmas gazdasági racionalitást, életciklus-bázisú emissziócsökkentést és hálózati rugalmasságnövelést

biztosítani. Amennyiben a támogatási pályák, az energiamix dekarbonizációja, a töltő- és V2G-infrastruktúra, a szekunder BEV-piac transzparenciája és az ösztönző-ökoszisztéma intézményi minősége közelít a dolgozatban feltételezett tartományhoz, a számítások döntéshozói szempontból is releváns pályákat jelölnek ki. Az alfejezet nem részletes szakpolitikai programot vázol fel. Sokkal inkább egy régióspecifikus döntéstámogató keretet kínál, melyhez a különböző szereplők saját eszközeikkel és prioritásaikkal kapcsolódhatnak.

5.5 Jövőbeni kutatási irányok

Az alfejezet a disszertáció kimeneteiből és a korlátokról szóló kritikai elemzésből kiindulva azon további kutatási irányokat jelöli ki, melyek kifejezetten a közép-európai, ezen belül a magyar kontextus sajátosságaira építenek. A cél a jelenleg túlnyomórészt modellalapú számítások kiegészítése primer empirikus vizsgálatokkal és részletesebb műszaki elemzésekkel. Ennek során figyelembe kell venni a posztszocialista energiarendszerek örökségét, a jövedelmi és intézményi struktúrákat, továbbá a régióra jellemző szabályozási ciklusokat.

Az egyik kézenfekvő irány a TCO-modell V2G-integrált keretté alakítása közép-európai kondíciók fennállásakor. A jelenlegi elemzések elsősorban a modellek beszerzési, üzemeltetési és energiaköltségeire, illetve a támogatási struktúrákra koncentrálnak. Tovább lépést jelentene a V2G-kompatibilis töltőinfrastruktúra beruházási és operatív költségeinek, illetve a rugalmassági szolgáltatásokból származó bevételeknek a szisztematikus beépítése a TCO-ba. Ezt háztartási, vállalati és carsharing-szegmensre differenciáltan szükséges elvégezni. Különösen releváns kérdés a V2G-bevételek ellensúlyozó képességének mértéke a magasabb beruházási költségekkel szemben. Ez azon finanszírozási környezetben érdekes, melyben a kamatszintek, a kockázati prémium és az energiaárak bizonyos fókig adminisztratív eszközökkel is befolyásoltak. Ide tartozik a különböző tarifa- és kvótakombinációk számszerű vizsgálata. Szükséges továbbá annak feltárása, mely szabályozási konfigurációk esetén lép elő a V2G-integrált TCO-pálya ténylegesen versenyképesé Magyarországon és a tágabb régióban.

Egy másik, jelenleg döntően konceptuális szinten kezelt terület a felhasználói magatartás, a bizalom és a társadalmi igazságosság vizsgálata a közép-európai társadalomszerkezet sajátosságainak figyelembevételével. A modellkeret feltételezi a háztartások és flották racionális, TCO-bázisú döntéseit. Ezzel szemben a tényleges választásokat jelentősen befolyásolja a történetileg alacsonyabb intézményi bizalom, a kockázatpercepció, a komfortvesztéssel kapcsolatos elvárások, illetve az energiaszegénység és

a jövedelmi polarizáció jelenléte. Érdekes azon kérdőíves, kísérleti vagy viselkedés-gazdaságtani vizsgálatokat tervezni, melyek kifejezetten a közép- és alacsonyabb jövedelmi decilisekre, a vidéki–városi különbségekre és a digitális megosztottságra fókuszálnak. E kutatások választ adhatnak az elfogadható komfort-bevétel kompromisszum szintjére a különböző társadalmi csoportok számára a V2G-részvétel kapcsán. Rávilágíthatnak arra is, miként alakítják e tényezők a BEV/V2G-hozzáférés társadalmi igazságosságát a régióban.

A dolgozatban bevezetett többszereplős ösztönző-ökoszisztéma szintén további kvantitatív modellezést igényel a közép-európai intézményi környezetre szabva. A jelenlegi keret kvalitatívan azonosítja a fő szereplők – háztartások, flották, aggregátorok, DSO/TSO, szabályozó hatóságok, energiaszolgáltatók – ösztönzőit és kockázatait. Dinamikus kölcsönhatásaikat azonban nem becsüli meg. Ígéretes irányt jelenthet játékelméleti, ügynök alapú akár rendszerdinamikai modellek alkalmazása. Ezek alkalmasak megragadni a költség- és haszonmegosztás különböző konfigurációit, a stabil részvételi egyensúlyok kialakulását, továbbá a koordinációs csapdák és bizalmi válságok mechanizmusait. Központi kérdés lehet például a szabályozási instabilitás és a kiszámíthatatlan támogatási ciklusok korlátozó hatása a V2G-flották skálázhatóságára. Vizsgálandó az is, mely intézményi megoldások meglétekor alkalmasak a magyar és régiós szereplők tartós együttműködési pályák kialakítására.

A hálózati szimulációk és a „kiváltott gyártás” részletesebb vizsgálata a műszaki dimenzió elmélyítését szolgálhatja a régió tipikus hálózati konfigurációi fennállásakor. A jelenlegi számítások makroszintű energiamérlegekre és feltételezett rugalmassági volumenekre támaszkodnak. Tovább lépést jelentene azon villamosmérnöki modellek kidolgozása, melyek konkrét magyarországi és közép-európai városi, ipari és vidéki elosztóhálózatokra épülnek. Ennek során figyelembe kell venni a hálózat előregedését, a határkeresztező kapacitásokat és a decentralizált termelés terjedését.

Ezekben a szimulációkban számszerűsíthetővé válna a különböző penetrációjú és részvételi rátájú V2G-flották lokális hálózatfejlesztési beruházásokat kiváltó képessége. Elemezhető lenne továbbá a transzformátor-kapacitások kihasználtságára, a feszültségminőségre és a megbízhatósági mutatókra gyakorolt hatásuk. Felmerül például kérdésként egy adott magyar városi hálózatban a V2G-penetráció kritikus szintje. Mekkora arány esetén lesz érdemben halasztható egy-egy kapacitásbővítő beruházás?

Végül önálló kutatási irányt képez az oktatás, kommunikáció és társadalmi tanulás szerepének vizsgálata. A V2G-adaptáció nemcsak technikai és

gazdasági, sokkal inkább erősen percepcionális kérdés is. Meghatározó a felhasználók találkozási pontja a technológiával, illetve az uralkodó narratívák jellege. Lényeges továbbá a kockázatok és előnyök értelmezése azon környezetben, melyben az energiapolitikai üzenetek, a „rezsivédelem” és az autóiipari munkahelyekhez kötődő diskurzusok kiemelt szerepet kapnak. Empirikus vizsgálatok – például kommunikációs kísérletek – segíthetnek a környezeti, gazdasági, energiabiztonsági és a közösségi keretezés hatásának feltárásában.

Elemezhető a különböző kommunikációs keretezések és narratívák részvételi hajlandóságra és bizalomra gyakorolt hatása. Vizsgálandó az is, hogyan illeszthetők ezen tényezők a közép-európai régió történeti és kulturális tapasztalataihoz. Ide tartozik az oktatási rendszerek, szakmai képzések és civil kezdeményezések hozzájárulásának vizsgálata a BEV/V2G-technológia hosszú távú társadalmi beágyazódásához Magyarországon és a tágabb régióban.

A vázolt kutatási irányok a jelen értekezésben kialakított modellkeretet mélyíthetik el. Egyrészt a TCO-, LCA- és V2G-modulok régióspecifikus továbbfejlesztésével és empirikus validálásával. Másrészt a társadalmi, intézményi és hálózatechnikai dimenziók részletesebb feltárásával. Amennyiben a tervezett kutatások megvalósulnak, Közép-Európa – benne Magyarországgal – a BEV/V2G-integráció területén nem csupán követőként tűnhet fel. Sokkal inkább bizonyos vonásokban aktív formáló szereplővé válhat. Olyan ágenssé, mely saját tapasztalataival és modelljeivel számottevően hozzájárul az európai energiarendszer-átmenetről folytatott tudományos és szakpolitikai diskurzushoz.

6. Összegzés

A közlekedés villamosítása a dekarbonizáció egyik meghatározó alkalmazási területe. Rendszerszintű értelmezése azonban nem szűkíthető le a járműtechnológia szintjére. A BEV-ek töltése a villamosenergia-rendszerben többletterhelést jelent, mindazonáltal az akkumulátorkapacitások megfelelő műszaki és intézményi kondíciók fennállásakor rugalmas, elosztott erőforrásként is aktiválhatók. A kétirányú energiaáramlást lehetővé tevő jármű-hálózat integráció ezen kapacitásokat a rendszerüzemhez kapcsolja. Ennélfogva értékelése gazdasági, műszaki, intézményi és környezeti dimenziók együttes kezelését igényli.

Közép-Európában az energiamix, a töltőinfrastruktúra fejlettsége, a jövedelmi és gazdasági adottságok, illetve a szabályozási és elszámolási keretek heterogenitása speciális feltételrendszert alakít ki. Ebben a közegben a V2G potenciálja nem tekinthető automatikusan realizálódónak.

Az értekezés vizsgálatának tárgya a V2G-hez kapcsolódó rendszerintegráció koherens struktúrában történő értelmezhetősége. Kérdés, mely adottságok esetén definiálható ez a folyamat a felhasználói költség- és kockázati racionalitás, a hálózati rugalmassági igények kielégítése és a környezeti terhelések mérséklése szempontjából. A fókusz különös tekintettel a közép-európai és a magyarországi kontextusra irányul.

A kutatás egymásra épülő operacionalizálást alkalmaz. A gazdasági értelmezési keretből indul, majd regionális összehasonlító dimenzióval bővül. Végül életciklus-bázisú környezeti mérlegekben és a V2G-specifikus öregedési hatások értékelésében teljesebbé válik. A gazdasági megalapozás a TCO szemléletére épül, tekintve, hogy a műszaki átmenet társadalmi terjedését a belépési korlátok, a finanszírozási kondíciók és a használati intenzitás együttesen alakítják. Ezt követően az Európai Unió tagállamainak összevetése azon regionális keretet adja, melyben az energiamix- és infrastruktúrafüggő tényezőcsoportok a V2G értelmezhetőségének részévé válnak.

A záró logikai egység az elektromobilitás környezeti eredőjét az LCA szemléletében rendezzi el. A V2G-hez kapcsolódó döntési csomópontok közül az akkumulátor-degradációt emeli ki mint a nettó mérleg egyik meghatározó tényezőjét. Az elemzések döntően szekunder adatokra és a szakirodalomban rögzített összefüggésekre épülnek. A számítások paraméterezett, transzparens szerkezetben szerepelnek, összhangban a reprodukálhatóság és az összehasonlíthatóság követelményeivel. A módszertani lehatárolás következményeként az értekezés nem diszkrét szintű rendszeroptimalizálást alkalmaz, hanem az adatszínhez és a kijelölt rendszerhatárokhoz illeszkedő, scenárióalapú és érzékenységi logikára épülő következtetési tartományban marad.

A gazdasági számítások tükrében a BEV és az ICEV összevetésében a TCO-paritás Magyarországon nem írható le egyetlen küszöbértékkel. Sokkal inkább futásteljesítmény- és időhorizontfüggő tartományként definiálható. A modellezett paraméterezések értelmében a BEV-ek relatív költségelőnye stabilabban a magasabb használati intenzitás fennállásakor rajzolódik ki. Új jármű esetén jellemzően az évi 18 000 – 40 000 km tartományban lesz jól elkülöníthető. Többéves tulajdonlási időtávon erősödik. A bemutatott időablakhoz tartozó bázis-szenárióban a kumulált költségkülönbség nagyságrendileg is jelentős lehet (például ~31 000 EUR). Alacsony futás esetén a belépési kiadások és a tőkeköltés súlya elnyújthatja, akár korlátozhatja a megtérülést.

A keresletélénkítés értelmezése ezáltal a belépési küszöbök szerepét helyezi előtérbe. A használtautó-piac a hozzáférhetőség bővítésének útján a TCO-bázisú racionalitás társadalmi elérhetőségének egyik gyakorlati

csatornájaként írható le. E megállapítás rendszerintegrációs vetülete a V2G-hez szükséges részvételi volumen és a V2G-kompatibilis járműállomány bővülése kapcsán ragadható meg. A folyamat azon költség- és kockázati pályához kapcsolódik, mely felhasználói szempontból átlátható és vállalható.

A V2G pénzügyi és rendszerintegrációs értelmezhetősége az elemzett kontextusban nem választható el az aktiválás intézményi és műszaki költségfeltételeitől. A bemutatott scenáriók tanúsága alapján a rugalmassági szolgáltatásból származó felhasználói bevétel tipikusan évi néhány száz euró nagyságrendben keletkezik ($\approx 200\text{--}300$ EUR/év). Ez a teljes körű birtoklási költségben számos esetben néhány százalékos ($\approx 5\text{--}7\%$) korrekciót jelenthet. Mindazonáltal a kétirányú töltés belépési költségei érdemi küszöböt képeznek. A példaként szereplő eszközárak $\sim 1\,300$ EUR (alsóbb belépési szint) és $\sim 7\,000$ EUR (felsőbb szint) körül alakulnak. Ennélfogva a megtérülés döntően az elszámolási mechanizmusok, az aggregátori hozzáférés, illetve a hálózatilag releváns időzítési logika függvénye. Következésképpen a V2G a magyarországi kontextusban nem „önmagában vett” megtérülési tételként írható le. Sokkal inkább azon feltételes opcióként, melynek érvényességi tartománya a tarifális és szabályozási környezet, továbbá a részvételt támogató gazdasági intézmények fejlődésével tágítható.

A megosztott mobilitás vizsgálata a gazdasági fenntarthatóságot szolgáltatói nézőpontból tárgyalja. A közép-európai városi példák mentén az üzleti stabilitást a flottafinanszírozás és az üzemeltetés költségűsége, továbbá a kihasználtság és a tarifastruktúra együttesen alakítja. Ezzel szemben a lokális költségkörnyezet és a keresleti méret korlátai érdemi eltéréseket eredményezhetnek. A budapesti szolgáltatók összevetése a jövedelmezőségi korlátokat számszerűen is alátámasztja. Az EBITDA-marzs értékei a következők: MOL Limo $-15,3\%$, GreenGo $-22,1\%$, Wigo $-35,0\%$. A scenárió-elemzések eredményei a költségcsökkentés és a kihasználtság növelését jelölik meg a működőképesség meghatározó elemeiként. E szisztémában a V2G gazdasági relevanciája abban az esetben lesz számottevően értelmezhető, ha a rugalmassági szolgáltatásból származó érték pénzügyi ellentételezése ténylegesen megjelenhet. A szóban forgó bevétel hiányában a V2G a szolgáltatói oldalon inkább feltételes opció, mint alapvető üzleti pillér.

A regionális összehasonlító elemzés az elektromobilitás fenntarthatósági dimenzióinak strukturált leírására irányul. Az értekezés egységes indikátorrendszerrel rendezi össze az EU-tagállamokat az elektromosjármű-penetráció, a töltőinfrastruktúra-sűrűség és a megújuló energia részarányának összekapcsolásával. Ezt követően normalizálási és

csoportosítási logikával azonosítja a heterogenitás mintázatait. Az adatok tükrében az elektromobilitás uniós mintázata nem írható le egyetlen „átlagos” fejlődési pályával. Elkülöníthető országcsoportok azonosíthatók. Ezekben az infrastruktúra és az energiamix kombináltan alakítja a technológiai terjedés feltételeit és a környezeti értelmezhetőséget. Magyarország a bemutatott indikátorok értelmében a középmezőny alsó tartományában helyezkedik el (EV=6,8/1000 fő; töltők=0,34/1000 fő; megújuló részarány=14,5%). Ez a tény a V2G értelmezését eleve feltételes tartományba helyezi, tekintve, hogy az infrastruktúra és a dekarbonizációs háttér nem azonos a nyugat-európai referenciákkal. A keret e ténynek megfelelően nem tételez kontextusfüggetlen szakpolitikai következtetéseket. Sokkal inkább a feltételrendszerek eltéréseit a V2G értelmezési tartományának részeként kezeli.

A környezeti értékelés az LCA-megközelítést helyezi előtérbe. Az elektromos közlekedés nettó környezeti mérlege ugyanis a villamosenergia-termelés karbonintenzitásával és az akkumulátorgyártás beágyazott terheivel együttesen definiálható. A közvetlen helyi emissziók hiánya önmagában nem ad teljes körű képet. A kimenetek tanúsága alapján az indirekt kibocsátások országonként széles tartományban változhatnak. Így azonos jármű és futásteljesítmény fennállásakor is eltérő éves kibocsátási pályák adódhatnak.

A bemutatott példában 14 000 km/év esetén a BEV éves CO₂-terhe Svédországban ~29 kg, Magyarországon ~1470 kg, Lengyelországban ~1911 kg. Ezzel szemben az ICEV referenciaértéke ~1680 kg. Ez a bázisállapot rámutat a dekarbonizációs pálya meghatározó szerepére, mivel a villamosenergia-mix tisztulásával a BEV emissziós előnye számottevően növekszik. Egyúttal indokolja a V2G környezeti állításainak általánosítási tilalmát az energiamix és az aktiválás időzítése nélkül. A villamosenergia-mix dekarbonizációja az említett folyamat következtében a környezeti nyereség szükséges feltételeként szerepel. Ez kiemelten érvényes abban az esetben, amikor a V2G a megújuló integráció és a kiegyenlítés támogatásának eszközeként értelmeződik.

A V2G-specifikus környezeti mérlegben az akkumulátor-degradáció kiemelt jelentőségű. A bidirekcionális üzem többletciklusai ugyanis növelhetik az állapotromlást. Ez a gyártási és csereigényhez kötődő életciklus-terhek időbeli lefutását is módosíthatja. Az öregedési kockázat súlya az alkalmazási intenzitás, a vezérlési stratégia és a használati profil függvényében változik. Az elemzett összefüggések nyomán számszerűsíthető a többlet igénybevétel nagyságrendje és a kapacitásvesztés fennálló kapcsolata. Átfuttatott kumulatív energiamennyiség tekintetében a 10%-os növekményhez ~4%, míg 30%-os

növekményhez ~10% kapacitásvesztés társulhat. Ugyanakkor a modellben alkalmazott V2G-intenzitás tipikusan ~200 ciklus/év. A fenntarthatósági következtetések e rendszerben abban az esetben tarthatók fenn, ha az öregedés költségeinek explicit figyelembevétele beépül a szabályozási és gazdasági keretekbe. Ennek a vezérlési döntésekben is meg kell jelennie. A degradáció így egyszerre korlátozó tényező és azon módszertani csomópont, mely kijelöli a V2G környezeti állításainak érvényességi tartományát.

A V2G rendszerszintű alkalmazhatósága intézményi és viselkedési dimenziókhoz is kötődik, tekintve, hogy a rugalmassági megoldások jellemzően aggregált részvételen révén válnak aktiválhatóvá. A szintézis értelmében a részvételi arány, a gazdasági hozzáférés és a hálózati hasznosíthatóság fennálló kapcsolata feltételes. A technikai lehetőség és a tényleges aktiválás között köztes intézményi mechanizmusok helyezkednek el. Ezekhez ösztönzők, elszámolási egyszerűség, felelősségi és garanciakeretek, illetve szereplői koordináció kapcsolódik. E tényezők a környezeti eredőt is intézményi feltételekhez kötik. Dekarbonizációs hatás ugyanis abban az esetben keletkezik, ha a rugalmasságot a hálózat szempontjából releváns időszakokban és a működtetési céloknak megfelelően mozgósítják.

Az értekezés konklúziója szerint a V2G közép-európai interpretációja csupán akkor tekinthető konzisztensnek, ha a gazdasági hozzáférhetőség, a rendszerintegrációs aktiválhatóság és az életciklus-bázisú környezeti mérleg együttes mérlegelésben szerepel. A gazdasági kimenetek a belépési küszöbök és a használati intenzitás szerepét emelik ki. A regionális összehasonlítás a heterogén energiamix- és infrastruktúrafeltételek következményeit formálja explicitté. A környezeti elemzés pedig igazolja a nettó mérleg függőségét a villamosenergia-termelés dekarbonizációjától és az öregedési kockázat kezelésétől. A V2G tudományos hozzájárulása e többdimenziós összerendezésben ragadható meg. A technológia nem önmagában vett innovációként azonosítható. Sokkal inkább feltételrendszerekhez kötött rugalmassági és dekarbonizációs eszközként tűnik fel. Ennek értelmezési tartománya transzparens, reprodukálható számítási rendszerben határozható meg.

A következtetések érvényességi feltételei nem kiegészítő megjegyzések. Sokkal inkább az értelmezési tartomány integráns részei. A V2G környezeti és rendszerüzemi nyeresége nem választható el a villamosenergia-termelés karbonintenzitásának alakulásától. Függ továbbá az infrastruktúra, a V2G-kompatibilis eszközállomány és az aggregációs–elszámolási intézmények fejlettségétől. E ténynek megfelelően a generalizálhatóság a feltételrendszerek mentén korlátozott. A további kutatási irányok e

keretekből adódnak. A nagyobb időfelbontású rendszerhatás-közelítések, a degradáció és az élettartam-allokáció részletesebb kezelése, továbbá a régiós tapasztalatokra épülő, standardizált teljesítménymutatók integrálása indokolttá formálja a V2G értékelésének további finomítását. Ezáltal hozzájárul a szakpolitikai döntéshozatal tényalapú támogatásához. A disszertáció e fejlesztési irányok számára azon fogalmi és mérési alapot nyújtja, melyben a gazdasági racionalitás, a regionális heterogenitás és az életciklus-jellegű környezeti mérleg egymásra ható összefüggérendszerként definiálható.

7. Summary

The electrification of transport is a key application domain of decarbonisation; however, its system-level interpretation cannot be reduced to the vehicle-technology level alone. Charging battery electric vehicles (BEVs) imposes additional load on the power system, while—under appropriate technical and institutional conditions—battery capacity can also be activated as a flexible, distributed resource. Vehicle–grid integration (V2G), which enables bidirectional power flows, links these capacities to system operation; consequently, its assessment requires the joint consideration of economic, technological, institutional, and environmental dimensions. In Central Europe, heterogeneity in the generation mix, charging infrastructure maturity, income and market conditions, and regulatory and settlement frameworks creates a context in which V2G potential cannot be assumed to be realised automatically. This dissertation therefore examines under which conditions V2G-related system integration can be interpreted coherently in terms of user-level cost and risk rationality, the provision of grid-flexibility services, and the mitigation of environmental burdens, with particular emphasis on the Central European and Hungarian context.

The research applies a sequential operationalisation: it starts from an economic interpretive framework, expands with a regional comparative dimension, and culminates in life-cycle-based environmental balances and the assessment of V2G-specific ageing effects. The economic foundation follows the Total Cost of Ownership (TCO) perspective, since the societal diffusion of the technological transition is jointly shaped by entry barriers, financing conditions, and use intensity. This is complemented by a comparison of European Union Member States, providing a regional frame in which mix- and infrastructure-dependent conditions become integral to the interpretability of V2G. The final logical block structures the environmental implications of electromobility within a Life Cycle Assessment (LCA) perspective and highlights battery degradation—among

the key V2G-related decision nodes—as a major determinant of the net balance. The analyses rely primarily on secondary data and relationships established in the literature; the calculations are presented in a parameterised, transparent form in line with reproducibility and comparability requirements. As a methodological delimitation, the dissertation does not employ dispatcher-level system optimisation (dispatch-based system optimisation), but remains within an inference domain consistent with the data resolution and the defined system boundaries, using scenario-based and sensitivity-driven reasoning.

Based on the economic results, TCO parity between BEVs and internal combustion engine vehicles (ICEVs) in Hungary cannot be described by a single threshold value; rather, it is interpreted as a mileage- and time-horizon-dependent range. Under the examined parameterisations, the relative cost advantage of BEVs emerges more robustly at higher use intensity; for new vehicles it typically becomes clearly distinguishable in the range of approximately 18,000–40,000 km per year and strengthens over multi-year ownership horizons. In the baseline scenario associated with the analysed time window, the cumulative cost differential can be substantial in order of magnitude (e.g., ~EUR 31,000). At lower annual mileage, entry costs and the weight of capital costs may delay or constrain payback. In line with this, demand stimulation is interpreted through the role of entry thresholds: the used-car market can be described as a practical channel for widening accessibility to TCO-based rationality. From a system-integration perspective, this implies that the participation volume required for V2G and the expansion of the V2G-capable vehicle stock are linked to a cost and risk trajectory that must remain interpretable and acceptable from a user standpoint. Within the applied framework, the financial and system-integration interpretability of V2G cannot be separated from the institutional and technological cost conditions of activation. The scenarios indicate that user-level revenues from flexibility provision typically occur in the order of a few hundred euros per year (~EUR 200–300/year), which in many cases may translate into a few-percentage-point adjustment of total ownership costs (~5–7%); however, entry costs for bidirectional charging constitute a material threshold. Illustrative device prices are around ~EUR 1,300 (lower entry level) and ~EUR 7,000 (upper level); consequently, payback is determined primarily by settlement mechanisms, access via aggregators, and grid-relevant temporal activation logic. Accordingly, in the Hungarian context V2G is not characterised as a stand-alone investment with inherent payback, but rather as a conditional option whose validity domain can expand with the evolution of tariff and regulatory environments and of market institutions that enable participation.

The analysis of shared mobility addresses economic sustainability from the provider perspective. Based on Central European urban examples, business stability is jointly shaped by fleet financing and the cost weight of operations, as well as by utilisation and tariff structure, while local cost environments and market size constraints can produce material differences. The comparison of Budapest providers also quantifies profitability constraints (e.g., EBITDA margins: MOL Limo –15.3%, GreenGo –22.1%, Wigo –35.0%). Scenario analyses indicate that cost reduction and improved utilisation are decisive for operational viability. Within this frame, the economic relevance of V2G becomes substantively interpretable only if the value derived from flexibility services can be monetised; in the absence of such remuneration, V2G remains a conditional option on the provider side rather than a core business pillar.

The regional comparative analysis aims to provide a structured description of the sustainability dimensions of electromobility. The dissertation organises EU Member States using a unified indicator system that links electric-vehicle penetration, charging-infrastructure density, and the share of renewable energy, and identifies patterns of heterogeneity through normalisation and grouping logic. The results indicate that the EU electromobility landscape cannot be represented by a single “average” development pathway; distinct country groups can be identified in which infrastructure and the generation mix jointly shape the conditions for diffusion and environmental interpretability. According to the presented indicators, Hungary is positioned in the lower range of the mid-field (EV = 6.8/1,000 inhabitants; chargers = 0.34/1,000 inhabitants; renewable share = 14.5%), which places V2G interpretation into a conditional domain: infrastructure and the background of decarbonisation are not aligned with Western European reference cases. Accordingly, the framework does not assume context-independent policy conclusions; instead, it treats differences in enabling conditions as integral elements of the V2G validity domain.

The environmental assessment prioritises the LCA approach, since the net environmental balance of electric transport must be interpreted jointly with the carbon intensity of electricity generation and the embedded burdens of battery manufacturing; the absence of direct local emissions alone does not provide a complete picture. The results show that indirect emissions can vary across countries within a wide range, leading to different annual emission trajectories even for identical vehicles and mileage. In the presented example, at 14,000 km/year the annual CO₂ burden of a BEV is ~29 kg in Sweden, ~1,470 kg in Hungary, and ~1,911 kg in Poland, while the ICEV reference is ~1,680 kg; this baseline state highlights the decisive role of the decarbonisation pathway, since the BEV’s emissions advantage

increases materially as the electricity mix becomes cleaner, and it also justifies that environmental claims regarding V2G should not be generalised without specifying the energy mix and the timing of activation. Consequently, power-sector decarbonisation appears as a necessary condition for environmental gains, particularly when V2G is interpreted as an instrument supporting renewable integration and balancing.

Within the V2G-specific environmental balance, battery degradation is of particular importance, because additional cycling under bidirectional operation can accelerate state-of-health deterioration and thereby modify the temporal profile of life-cycle burdens linked to manufacturing and replacement needs. The weight of ageing risk varies with application intensity, control strategy, and use profile. Based on the examined relationships, the linkage between the magnitude of additional utilisation and capacity fade can be quantified: a 10% increase in cumulative energy throughput may be associated with ~4% capacity loss, while a 30% increase may correspond to ~10% capacity loss; the V2G intensity used in the model is typically ~200 cycles/year. Sustainability conclusions can be maintained within this framework only if ageing-related costs are explicitly incorporated into regulatory and market arrangements and reflected in control decisions; thus, degradation functions simultaneously as a limiting factor and as a methodological node that delineates the validity domain of V2G-related environmental claims.

The system-level applicability of V2G is also contingent on institutional and behavioural dimensions, since flexibility services are typically activated through aggregated participation. The synthesis suggests that the relationship among participation rates, market access, and grid usability is conditional: between technical feasibility and actual activation, intermediate institutional mechanisms intervene, including incentives, settlement simplicity, liability and warranty frameworks, and actor coordination. These factors also condition the environmental outcome, as decarbonisation effects arise only if flexibility is mobilised during system-relevant periods and in line with operational objectives.

In summary, the Central European interpretation of V2G can be considered consistent only when economic accessibility, system-integration activatability, and the life-cycle environmental balance are evaluated jointly. The economic results emphasise the role of entry thresholds and use intensity; the regional comparison makes explicit the consequences of heterogeneous generation-mix and infrastructure conditions; and the environmental analysis indicates that the net balance depends on power-sector decarbonisation and on the management of ageing risks. The scientific contribution of the dissertation is captured in this

multidimensional integration: V2G is framed not as an innovation in isolation, but as a flexibility and decarbonisation instrument contingent on enabling conditions, whose validity domain can be specified within a transparent, reproducible computational framework.

The validity conditions of the conclusions are not ancillary remarks but integral parts of the interpretive domain. The environmental and system-operation benefits of V2G cannot be detached from the evolution of electricity-generation carbon intensity, nor from the maturity of infrastructure, the stock of V2G-capable assets, and the development of aggregation and settlement institutions; accordingly, generalisability is constrained by differences in enabling conditions. Further research directions follow from these frames: higher time-resolution system-effect approaches, more detailed treatment of degradation and lifetime allocation, and the integration of standardised performance indicators grounded in regional experience. These refinements are expected to support evidence-based policy-making. The dissertation provides a conceptual and measurement basis for such developments, within which economic rationality, regional heterogeneity, and life-cycle environmental balances can be interpreted as an interdependent system of relationships.

8. Szakirodalmi hivatkozások:

1. Abdelmotteleb, I., De Felice, M., & Ruiz, P. (2024, április 24). *V2G: Transforming electric vehicles into rolling energy storage*. RaboResearch; Rabobank. <https://www.rabobank.com/knowledge/d011424799-v2g-transforming-electric-vehicles-into-rolling-energy-storage>
2. ACER & CEER. (2024). *ACER-CEER Market Monitoring Report 2024: Energy Retail and Consumer Protection Volume*. Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER); Council of European Energy Regulators (CEER). <https://www.acer.europa.eu/publications/acer-ceer-market-monitoring-report-2024-energy-retail-and-consumer-protection-volume>
3. Adegbohun, F., Von Jouanne, A., Agamloh, E., & Yokochi, A. (2024). A Review of Bidirectional Charging Grid Support Applications and Battery Degradation Considerations. *Energies*, *17.0*(6), 1320. <https://doi.org/10.3390/en17061320>
4. Adnan, M., Ghadi, Y., Ahmed, I., & Ali, M. (2023). Transmission Network Planning in Super Smart Grids: A Survey. *IEEE Access*, *11*, 77163–77227. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3296152>
5. Aduama, P., Al-Sumaiti, A. S., & Al-Hosani, K. H. (2023). Electric Vehicle Charging Infrastructure and Energy Resources: A Review. *Energies*, *16*(4), 1965. <https://doi.org/10.3390/en16041965>
6. Agency for the Cooperation of Energy Regulators. (2023). *Demand response and other distributed energy resources: What barriers are holding them back?* <https://www.acer.europa.eu/>

7. Aggarwal, S., Kumar, N., Tanwar, S., & Alazab, M. (2021). A Survey on Energy Trading in the Smart Grid: Taxonomy, Research Challenges and Solutions. *IEEE Access*, 9, 116231–116253. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104354>
8. Agregio Solutions. (2024, október 22). *EVVE: new allies alongside EDF and our electric mobility partner Dreev for V2G deployment*. Press; Agregio Solutions. <https://www.agregio-solutions.com/en/presse/evve-new-allies-alongside-edf-and-our-electric-mobility-partner-dreev-for-v2g-deployment/>
9. Ahmed, I., Rehan, M., Basit, A., Tufail, M., & Hong, K.-S. (2023). A Dynamic Optimal Scheduling Strategy for Multi-Charging Scenarios of Plug-in-Electric Vehicles Over a Smart Grid. *IEEE Access*, 11, 28992–29008. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3258859>
10. Ahmed, M., Abouelseoud, Y., Abbasy, N. H., & Kamel, S. H. (2021). Hierarchical Distributed Framework for Optimal Dynamic Load Management of Electric Vehicles With Vehicle-to-Grid Technology. *IEEE Access*, 9, 164643–164658. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134868>
11. Ahsan, F., Dana, N. H., Sarker, S. K., Li, L., Muyeen, S. M., Ali, Md. F., Tasneem, Z., Hasan, Md. M., Abhi, S. H., Islam, Md. R., Ahamed, Md. H., Islam, Md. M., Das, S. K., Badal, Md. F. R., & Das, P. (2023). Data-driven next-generation smart grid towards sustainable energy evolution: Techniques and technology review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 8(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00319-5>
12. Alanazi, F. (2023). Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation. *Applied Sciences*, 13(10), 6016. <https://doi.org/10.3390/app13106016>
13. Albogamy, F. R., Ashfaq, Y., Hafeez, G., Murawwat, S., Khan, S., Ali, F., Aslam Khan, F., & Rehman, K. (2022). Optimal Demand-Side Management Using Flat Pricing Scheme in Smart Grid. *Processes*, 10.0(6), 1214. <https://doi.org/10.3390/pr10061214>
14. Alfaverh, K., Alfaverh, F., & Szamel, L. (2023). Plugged-in electric vehicle-assisted demand response strategy for residential energy management. *Energy Informatics*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00260-9>
15. Al-Ghaili, A. M., Kasim, H., Aris, H., & Al-Hada, N. M. (2022). Can electric vehicles be an alternative for traditional fossil-fuel cars with the help of renewable energy sources towards energy sustainability achievement? *Energy Informatics*, 5(S4), 60. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00234-3>
16. Altamirano, J. (2025). *The Netherlands Completes V2G Pilot but Public Large-Scale Rollout „Remains Limited”*—*Mobility Portal*. <https://mobilityportal.eu/netherlands-v2g-large-scale-rollout/>
17. Amamra, S.-A., & Marco, J. (2019). Vehicle-to-Grid Aggregator to Support Power Grid and Reduce Electric Vehicle Charging Cost. *IEEE Access*, 7, 178528–178538. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2958664>
18. Amin, A., Tareen, W. U. K., Usman, M., Ali, H., Bari, I., Horan, B., Mekhilef, S., Asif, M., Ahmed, S., & Mahmood, A. (2020). A Review of Optimal Charging Strategy for Electric Vehicles under Dynamic Pricing Schemes in the Distribution Charging Network. *Sustainability*, 12(23), 10160. <https://doi.org/10.3390/su122310160>
19. Anastasiadou, K., & Gavanis, N. (2022). State-of-the-Art Review of the Key Factors Affecting Electric Vehicle Adoption by Consumers. *Energies*, 15(24), 9409. <https://doi.org/10.3390/en15249409>

20. Andersen, P. B., Hashemi Toghroljerdi, S., Sørensen, T. M., Christensen, B. E., Høj, J. C. M. L., & Zecchino, A. (2019). The Parker Project: Final Report. In *The Parker Project: Final Report* [Report]. Technical University of Denmark.
21. ANU Battery Storage and Grid Integration Program. (2025). *Realising Electric Vehicle-to-grid Services*. Battery Storage and Grid Integration Program; Australian National University (ANU). <https://bsgip.com/research/realising-electric-vehicles-to-grid-services/>
22. Arandhakar, S., Jayaram, N., Shankar, Y. R., Gaurav, Kishore, P. S. V., & Halder, S. (2022). Emerging Intelligent Bidirectional Charging Strategy Based on Recurrent Neural Network Accosting EMI and Temperature Effects for Electric Vehicle. *IEEE Access*, *10*, 121741–121761. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223443>
23. Associated Press. (2024). *Chinese EV maker BYD will build electric car plant in Hungary, its first in Europe*. <https://apnews.com/>
24. Astudillo, M. F. & mtsai. (2022). Comparison of Battery Electrical Vehicles and Internal Combustion Engine Vehicles—Greenhouse Gas Emission Life Cycle Assessment. *Applied Sciences*, *12*(1), 1. <https://doi.org/10.3390/app12010001>
25. Australian Renewable Energy Agency. (2020, szeptember 17). *World leading EV-to-grid trial*. Australian Renewable Energy Agency Annual Report 2019-20 (ARENA Showcase); Commonwealth of Australia (Transparency Portal). <https://www.transparency.gov.au/publications/climate-change-energy-the-environment-and-water/australian-renewable-energy-agency/australian-renewable-energy-agency-annual-report-2019-20/arena-showcase/world-leading-ev-to-grid-trial>
26. Bach Andersen, P., Hashemi, S., Sousa, T., Meier Soerensen, T., Noel, L., & Christensen, B. (2019). The Parker Project: Cross-Brand Service Testing Using V2G. *World Electric Vehicle Journal*, *10*(4), 66. <https://doi.org/10.3390/wevj10040066>
27. Bakare, M. S., Abdulkarim, A., Zeeshan, M., & Shuaibu, A. N. (2023). A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: Challenges, solutions, and future direction. *Energy Informatics*, *6*(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00262-7>
28. Bakhuis, J., Barbour, N., & Chappin, É. J. L. (2025). Exploring user willingness to adopt vehicle-to-grid (V2G): A statistical analysis of stated intentions. *Energy Policy*, *203*, 114619. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114619>
29. Bañol Arias, N., Hashemi, S., Andersen, P. B., Træholt, C., & Romero, R. (2020). Assessment of economic benefits for EV owners participating in the primary frequency regulation markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *120*, 105985. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105985>
30. Barone, G., Brusco, G., Menniti, D., Pinnarelli, A., Polizzi, G., Sorrentino, N., Vizza, P., & Burgio, A. (2020). How Smart Metering and Smart Charging may Help a Local Energy Community in Collective Self-Consumption in Presence of Electric Vehicles. *Energies*, *13*(16), 4163. <https://doi.org/10.3390/en13164163>
31. Barsali, S., Ceraolo, M., Pasini, G., & Poli, D. (2024). Managing BEV Charge to Obtain a Positive Impact on a National Power System. *Energies*, *17.0*(2), 348. <https://doi.org/10.3390/en17020348>
32. Baumgartner, N., Kellerer, F., Ruppert, M., Hirsch, S., Mang, S., & Fichtner, W. (2022). Does experience matter? Assessing user motivations to accept a vehicle-to-grid charging tariff. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *113*, 103528. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103528>
33. Bayati, M., Abedi, M., Gharehpetian, G. B., & Farahmandrad, M. (2019). Short-term interaction between electric vehicles and microgrid in decentralized vehicle-

- to-grid control methods. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0118-4>
34. Benysek, G., Waśkiewicz, B., Dylewski, R., & Jarnut, M. (2022). Electric Vehicles Charging Algorithm with Peak Power Minimization, EVs Charging Power Minimization, Ability to Respond to DR Signals and V2G Functionality. *Energies*, 15.0(14), 5195. <https://doi.org/10.3390/en15145195>
 35. Bhundar, H. S., Golab, L., & Keshav, S. (2023). Using EV charging control to provide building load flexibility. *Energy Informatics*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00261-8>
 36. Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars* (White Paper). International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-LCA-passenger-cars-jul2021_0.pdf
 37. Bishop, J. D. K., Axon, C. J., Bonilla, D., Tran, M., Banister, D., & McCulloch, M. D. (2013). Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV. *Applied Energy*, 111, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094>
 38. Bogdanova, O., Viskuba, K., & Zemīte, L. (2023). A Review of Barriers and Enables in Demand Response Performance Chain. *Energies*, 16(18), 6699. <https://doi.org/10.3390/en16186699>
 39. Bohdanowicz, Z., Kowalski, J., & Biele, C. (2022). Intentions to Charge Electric Vehicles Using Vehicle-to-Grid Technology among People with Different Motivations to Save Energy. *Sustainability*, 14(19), 12681. <https://doi.org/10.3390/su141912681>
 40. Boudmen, K., El Ghazi, A., Eddaoudi, Z., Aarab, Z., & Rahmani, M. D. (2024). Electric vehicles, the future of transportation powered by machine learning: A brief review. *Energy Informatics*, 7.0(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00379-3>
 41. Briguglio, M., & Formosa, G. (2023). Sharing Is Caring: An Economic Analysis of Consumer Engagement in an Electric Vehicle Sharing Service. *Sustainability*, 15(6), 5502. <https://doi.org/10.3390/su15065502>
 42. Caban, J., Małek, A., & Šarkan, B. (2024). Strategic Model for Charging a Fleet of Electric Vehicles with Energy from Renewable Energy Sources. *Energies*, 17(5), 1264. <https://doi.org/10.3390/en17051264>
 43. Cadmus Group & Energetics Incorporated. (2023). *Standard Review Projects and AB 1082/1083 Pilots: Evaluation Year 2022 (Year 2) Third-Party Evaluation Report*. California Public Utilities Commission (CPUC). https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/divisions/energy-division/documents/sb-350-te/srp-ab1082_1083-2022-evaluation-report.pdf
 44. Cai, H., Chen, Q., Guan, Z., & Huang, J. (2018). Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0083-3>
 45. Cai, S., & Matsushashi, R. (2021). Model Predictive Control for EV Aggregators Participating in System Frequency Regulation Market. *IEEE Access*, 9, 80763–80771. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085345>
 46. Carplug. (2025). *Wallbox QUASAR - CHAdEMO 7,4kW - WiFi & Bluetooth*. <https://www.carplug.eu/wallbox-quasar-quasar-chademo-74kw-wifi-bluetooth>
 47. Castro, J. F. C., Marques, D. C., Tavares, L., Dantas, N. K. L., Fernandes, A. L., Tuo, J., De Medeiros, L. H. A., & Rosas, P. (2022). Energy and Demand Forecasting

- Based on Logistic Growth Method for Electric Vehicle Fast Charging Station Planning with PV Solar System. *Energies*, 15.0(17), 6106. <https://doi.org/10.3390/en15176106>
48. Cenex. (2020a). *A Fresh Look at V2G Value Propositions*. Cenex. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2020/06/Fresh-Look-at-V2G-Value-Propositions.pdf>
 49. Cenex. (2020b). *More than Money? Finding the True Power of Vehicle-to-Grid*. Cenex. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2020/07/True-Power-of-V2G-Webinar.pdf>
 50. Cenex. (2021). *Project Sciurus Trial Insights: Findings from 300 Domestic V2G Units in 2020*. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2021/05/Sciurus-Trial-Insights.pdf>
 51. CHAdEMO Association. (2021, február 12). *Sciurus: The world's largest residential V2G project reports £360/€411 of net energy bill savings per vehicle per year*. CHAdEMO News; CHAdEMO Association. <https://www.chademo.com/sciurus-v2g-energy-bill-savings>
 52. CHAdEMO Association. (2025). *V2G/VGI*. Technology; CHAdEMO Association. <https://www.chademo.com/technology/v2g>
 53. Chapman, N., & Corchero, C. (2019). *Home Grids and V2X Technologies: Final Report (2014-2018)*. IEA HEV-TCP Task 28 (International Energy Agency). https://evtcp.org/wp-content/uploads/2024/09/Task28_Final_Report.pdf
 54. Chen, Y.-A., Zeng, W., Khurram, A., & Kleissl, J. (2024). Cost-Optimal Aggregated Electric Vehicle Flexibility for Demand Response Market Participation by Workplace Electric Vehicle Charging Aggregators. *Energies*, 17(7), 1745. <https://doi.org/10.3390/en17071745>
 55. Christensen, K., Ma, Z., Demazeau, Y., & Jørgensen, B. N. (2021). Methodology for identifying technical details of smart energy solutions and research gaps in smart grid: An example of electric vehicles in the energy system. *Energy Informatics*, 4.0(S2), 38. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00160-w>
 56. Ciabattoni, L., Cardarelli, S., Somma, M. D., Graditi, G., & Comodi, G. (2021). A Novel Open-Source Simulator Of Electric Vehicles in a Demand-Side Management Scenario. *Energies*, 14(6), 1558. <https://doi.org/10.3390/en14061558>
 57. Correia Sinézio Martins, E., Lépine, J., & Corbett, J. (2024). Assessing the effectiveness of financial incentives on electric vehicle adoption in Europe: Multi-period difference-in-difference approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 189, 104217. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104217>
 58. Council of European Energy Regulators (CEER). (2025). *CEER Regulatory Frameworks Report 2024*. CEER. https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2025/02/C24-RBM-09-06_CEER_Regulatory_Frameworks_report_2024.pdf
 59. Csorba, P., Tóth, T., Szabó, G., Fazekas, I., Radics, Z., Teperics, K., Revákné Markóczi, I., Míka, J., Patkós, C., Kovács, E., Ütőné Visi, J., Csákberényi-Nagy, M. T. K., & Bartha, J. (2020). A társadalmi tanulási folyamatok szerepe a megújuló energiahordozókkal kapcsolatos ismeretekben két magyarországi megye példáján. *Debreceni Szemle*, 28(2), 200–211.
 60. Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *Batteries*, 5(2), 48. <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>
 61. Dai, X., Kotter, R., Putrus, G., Wang, Y., Das, R., Bentley, E., Marzband, M., & Van der Hoogt, J. (2020). *Final report—Oslo Operational Pilot: Vulkan Car Parking, Oslo, Norway*. SEEV4-City (Interreg North Sea Region).

- https://pure.hva.nl/ws/portalfiles/portal/17123308/SEEV4_City_Oslo_Operational_Pilot_Final_Report.pdf
62. Dallinger, D., Krampe, D., & Wietschel, M. (2010). *Vehicle-to-grid regulation based on a dynamic simulation of mobility behavior* (No. No. S 4/2010; Working Paper Sustainability and Innovation). Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (Fraunhofer ISI). https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2010/WP4-2010_V2G-Valuation.pdf
 63. Darani, Z. H., Taheri Demne, M., Zanjirani, D. M., & Zackery, A. (2021). Conceptualization of a new generation of smart energy systems and the transition toward them using anticipatory systems. *European Journal of Futures Research*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40309-021-00184-1>
 64. Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340. <https://doi.org/10.2307/249008>
 65. De Cauwer, C., Messagie, M., Heyvaert, S., Coosemans, T., & Van Mierlo, J. (2015). Electric vehicle use and energy consumption based on real-world electric vehicle fleet trip and charge data and its impact on existing EV research models. *28th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2015, EVS 2015*, 645–655. https://cris.vub.be/ws/portalfiles/portal/109810507/EVS28_Electric_vehicle_use_and_energy_consumption.pdf
 66. De Lima, T. D., Franco, J. F., Lezama, F., Soares, J., & Vale, Z. (2021). Joint Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Stations and Renewable Energy Sources Including CO2 Emissions. *Energy Informatics*, 4.0(S2), 33. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00157-5>
 67. Delaney, K. (2022, június 27). *Harnessing the power of parked EVs*. Cisco Newsroom; Cisco Systems, Inc. <https://newsroom.cisco.com/c/r/newsroom/en/us/a/y2022/m06/harnessing-the-power-of-parked-evs.html>
 68. Di Natale, L., Funk, L., Rüdüsili, M., Svetozarevic, B., Pareschi, G., Heer, P., & Sansavini, G. (2021). The Potential of Vehicle-to-Grid to Support the Energy Transition: A Case Study on Switzerland. *Energies*, 14.0(16), 4812. <https://doi.org/10.3390/en14164812>
 69. Diaz-Londono, C., Orfanoudakis, S., Vergara, P. P., Palensky, P., Ruiz, F., & Grusso, G. (2024). A Simulation Tool for V2G Enabled Demand Response Based on Model Predictive Control. *arXiv*. <https://arxiv.org/pdf/2405.11963>
 70. Domènech Abella, A., & Jay East, M. (2020). *Lessons learned from the 10 IMET flagship projects: Intelligent Mobility for Energy Transition—Final report*. European Smart Cities Marketplace. https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-12/Draft_FINAL_REPORT_komplett_0.pdf
 71. Dorji, S., Stonier, A. A., Peter, G., Kuppasamy, R., & Teekaraman, Y. (2023). An Extensive Critique on Smart Grid Technologies: Recent Advancements, Key Challenges, and Future Directions. *Technologies*, 11(3), 81. <https://doi.org/10.3390/technologies11030081>
 72. Dorokhova, M., Vianin, J., Alder, J.-M., Ballif, C., Wyrsh, N., & Wannier, D. (2021). A Blockchain-Supported Framework for Charging Management of Electric Vehicles. *Energies*, 14.0(21), 7144. <https://doi.org/10.3390/en14217144>
 73. Dreev. (2020). *Flexitanie: Smart charging deployment programme in Occitanie*. Dreev. <https://dreev.com/en/flexitanie/>

74. Dreev. (2021). *EVVE: Environmental Valorization of Virtual Electricity storage*. Dreev. <https://dreev.com/en/evve/>
75. EAFO. (2024). *Consumer Monitor 2023: Country Report: Hungary*. https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/system/files/documents/2024-06/Country%20Report%202023%20Hungary_1.pdf
76. Ebrie, A. S., & Kim, Y. J. (2022). Investigating Market Diffusion of Electric Vehicles with Experimental Design of Agent-Based Modeling Simulation. *Systems*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/systems10020028>
77. EEA. (2018, november 22). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives—TERM* 2018. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>
78. EEA. (2024). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>
79. EEI. (2022, szeptember). *SDG&E Unveils New V2G Project Featuring Local Electric School Buses*. Delivering The Future; Edison Electric Institute. <https://www.eei.org/en/delivering-the-future/articles/sdge-unveils-new-v2g-project-featuring-local-electric-school-buses>
80. E-Flex. (2020). *Moving Towards More Sustainable Fleet Management with Vehicle-to-Grid Systems: An industry report on attitudes within the fleet management industry towards electric vehicles, energy provision, environmental sustainability, and vehicle-to-grid technology as a commercially-viable solution in the UK*. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2020/01/E-Flex-Report.pdf>
81. Ekvall, T., & Weidema, B. P. (2004). System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
82. Elmouatamid, A., Ouladsine, R., Bakhouya, M., El Kamoun, N., Khaidar, M., & Zine-Dine, K. (2020). Review of Control and Energy Management Approaches in Micro-Grid Systems. *Energies*, 14(1), 168. <https://doi.org/10.3390/en14010168>
83. Eltamaly, A. M. (2023). Optimal Dispatch Strategy for Electric Vehicles in V2G Applications. *Smart Cities*, 6(6), 3161–3191. <https://doi.org/10.3390/smartcities6060141>
84. Energeia. (2024). *Insights from the Realising Electric Vehicle-to-Grid Services Project—Final Report*. Australian Renewable Energy Agency (ARENA). <https://arena.gov.au/assets/2024/02/ARENA-Vehicle-to-Grid-Insights-Final-Report.pdf>
85. ENTSO-E. (2024a). *Balancing Report 2024*. <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/balancing-report/>
86. ENTSO-E. (2024b). *ENTSO-E Balancing Report 2024*. <https://www.entsoe.eu/publications/market-reports/>
87. ENTSO-E. (2025a). *MARI Project*. ENTSO-E Network Codes: Electricity Balancing. https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/mari/
88. ENTSO-E. (2025b). *PICASSO Project*. ENTSO-E Network Codes: Electricity Balancing. https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/picasso/
89. Erdogan, N., Erden, F., & Kisacikoglu, M. (2018). A fast and efficient coordinated vehicle-to-grid discharging control scheme for peak shaving in power distribution system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(3), 555–566. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0375-z>

90. Escoto, M., Guerrero, A., Ghorbani, E., & Juan, A. A. (2024). Optimization Challenges in Vehicle-to-Grid (V2G) Systems and Artificial Intelligence Solving Methods. *Applied Sciences*, *14*(12), 5211. <https://doi.org/10.3390/app14125211>
91. Etxandi-Santolaya, M., Canals Casals, L., & Corchero, C. (2024). Extending the electric vehicle battery first life: Performance beyond the current end of life threshold. *Heliyon*, *10*(4), e26066. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26066>
92. Eurelectric. (2025). *eVision Report 2025*. Eurelectric. <https://evision.eurelectric.org/report-2025/>
93. European Association for Storage of Energy (EASE). (2022). *Energy Storage Targets 2030 and 2050: Full Report*. European Association for Storage of Energy (EASE). <https://energystorageeurope.eu/publication/energy-storage-targets-2030-and-2050/>
94. European Automobile Manufacturers' Association (ACEA). (2025). *New car registrations: +1.4% in November 2025 year-to-date*. ACEA. https://www.acea.auto/files/Press_release_car_registrations_November_2025.pdf
95. European Commission. (2017). *Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing* [CELEX:32017R2195]. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32017R2195>
96. European Commission. (2021). *Commission Recommendation (EU) 2021/2279 on the use of the Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*. <http://data.europa.eu/eli/reco/2021/2279/oj>
97. European Commission. (2025a). *Commission guidance on the compensation models for flexibility (including demand response through aggregation)*. <https://energy.ec.europa.eu/>
98. European Commission. (2025b). *EAFO incentives & legislation: Hungary*. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/>
99. European Commission. (2025c). *Hungary: Infrastructure (Road transport)*. Alternative Fuels Observatory (EAFO); European Commission. <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/hungary/infrastructure>
100. European Commission, J. R. C. (2010). *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment: Detailed guidance*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/38479>
101. European Environment Agency. (2025, november 6). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe*. European Environment Agency (EEA) - Indicators (ENER038); European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
102. European Union. (2019a). *Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity* [CELEX:32019L0944]. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>
103. European Union. (2019b). *Regulation (EU) 2019/943 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the internal market for electricity* [CELEX:32019R0943]. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0943>
104. European Union. (2023a). *Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries* [CELEX:32023R1542]. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1542>

105. European Union. (2023b). *Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure (AFIR)* [CELEX:32023R1804]. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R1804>
106. European Union. (2024a). *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024L1275>
107. European Union. (2024b). *Directive (EU) 2024/1711 amending Directive (EU) 2019/944 as regards improving the Union's electricity market design*. <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/1711/oj>
108. Eurostat. (2024). *GDP per capita, consumption per capita and price level indices (Statistics Explained)*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=GDP_per_capita,_consumption_per_capita_and_price_level_indices
109. Eurostat. (2025a). *GDP per capita in PPS* [Dataset]. Eurostat. <https://doi.org/10.2908/TEC00114>
110. Eurostat. (2025b, október). *Electricity price statistics*. Statistics Explained; Eurostat (European Commission). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics
111. Evbenata, S., & Jakeman, A. (2023). *UK Roadmap for Residential Vehicle-to-Grid (V2G): Leveraging learnings from the Powerloop V2G Trial*. <https://guidehouse.com/-/media/new-library/industries/cei/documents/2023/uk-roadmap-for-v2g-esi-report-23.pdf>
112. Falchetta, G., & Noussan, M. (2021). Electric vehicle charging network in Europe: An accessibility and deployment trends analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102813. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102813>
113. Farmann, A., Waag, W., Marongiu, A., & Sauer, D. U. (2020). State of health estimation of lithium-ion batteries: A systematic review. *Journal of Energy Storage*, 30, 101490. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101490>
114. Fazekas, I., Szabó, G., Patkós, C., Radics, Z., Csorba, P., Tóth, T., Kovács, E., Mester, T., & Szabó, L. (2018). A lakosság megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos ismereteinek vizsgálata eltérő adottságú kistájokban. In I. Lázár (Szerk.), *Környezet és energia: Hatékony termelés, tudatos felhasználás* (o. 141–146). MTA DAB Földtudományi Szakbizottság. <https://m2.mtmt.hu/api/publication/3358716>
115. Ferko, A., & Geurts, G. (2024, március 19). *Driving Change: Lessons from a Large-Scale Korean V2G Demo*. LinkedIn Pulse; LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/driving-change-lessons-from-large-scale-korean-v2g-demo-ferko-nle1e>
116. Figgener, J., Tepe, B., Rücker, F., Schoeneberger, I., Hecht, C., Jossen, A., & Sauer, D. U. (2022). The influence of frequency containment reserve flexibilization on the economics of electric vehicle fleet operation. *Journal of Energy Storage*, 53, 105138. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105138>
117. Foley, the A. R. E. A. E. (2024). Vehicle-to-grid tech offers potentially lucrative market for EV fleet owners. *Pv Magazine Australia*. <https://www.pv-magazine-australia.com/2024/03/12/vehicle-to-grid-tech-offers-potentially-lucrative-market-for-ev-fleet-owners/>
118. Fu, X., Wu, X., Zhang, C., Fan, S., & Liu, N. (2022). Planning of distributed renewable energy systems under uncertainty based on statistical machine learning. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s41601-022-00262-x>

119. Gadh, R. (2018). *Demonstrating Plug-in Electric Vehicles Smart Charging and Storage Supporting the Grid* (No. CEC-500-2018-020). California Energy Commission. <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2021-06/CEC-500-2018-020.pdf>
120. Gaines, L. (2018). Lithium-ion battery recycling processes: Research towards a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 17, e00068. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00068>
121. García, M. A., García, A. I. M., Karatzas, S., Chassiakos, A., & Ageli, O. (2023). SGAM-Based Analysis for the Capacity Optimization of Smart Grids Utilizing e-Mobility: The Use Case of Booking a Charge Session. *Energies*, 16(5), 2489. <https://doi.org/10.3390/en16052489>
122. Ghadikolaie, M. A., Wong, P. K., Cheung, C. S., Zhao, J., Ning, Z., Yung, K.-F., Wong, H. C., & Gali, N. K. (2021). Why is the world not yet ready to use alternative fuel vehicles? *Heliyon*, 7(7), e07527. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07527>
123. Ghatikar, G., & Alam, M. S. (2023). Technology and economics of electric vehicle power transfer: Insights for the automotive industry. *Energy Informatics*, 6(1), 46. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00300-4>
124. Giannelos, S., Borozan, S., Strbac, G., Zhang, T., & Kong, W. (2024). Vehicle-to-Grid: Quantification of its contribution to security of supply through the F-Factor methodology. *Sustainable Energy Research*, 11(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00125-z>
125. Goh, H. H., Zong, L., Zhang, D., Dai, W., Lim, C. S., Kurniawan, T. A., & Goh, K. C. (2022). Orderly Charging Strategy Based on Optimal Time of Use Price Demand Response of Electric Vehicles in Distribution Network. *Energies*, 15(5), 1869. <https://doi.org/10.3390/en15051869>
126. Gomes, I., Melicio, R., & Mendes, V. (2020). Comparison between Inflexible and Flexible Charging of Electric Vehicles—A Study from the Perspective of an Aggregator. *Energies*, 13(20), 5443. <https://doi.org/10.3390/en13205443>
127. Goncearuc, A., Sapountzoglou, N., De Cauwer, C., Coosemans, T., Messagie, M., & Crispeels, T. (2023). Profitability Evaluation of Vehicle-to-Grid-Enabled Frequency Containment Reserve Services into the Business Models of the Core Participants of Electric Vehicle Charging Business Ecosystem. *World Electric Vehicle Journal*, 14(1), 18. <https://doi.org/10.3390/wevj14010018>
128. Gonzalez Venegas, F., Petit, M., & Perez, Y. (2020). Quantifying the participation of electric vehicle fleets in local flexibility tenders. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2020(1), 258–261. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2021.0323>
129. Gray, R. (2022). First West Coast School Bus V2G Pilot Project to Begin. *School Transportation News*. <https://stnonline.com/news/first-west-coast-school-bus-v2g-pilot-project-to-begin/>
130. Habib, H. U. R., Subramaniam, U., Waqar, A., Farhan, B. S., Kotb, K. M., & Wang, S. (2020). Energy Cost Optimization of Hybrid Renewables Based V2G Microgrid Considering Multi Objective Function by Using Artificial Bee Colony Optimization. *IEEE Access*, 8, 62076–62093. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984537>
131. Hall, D., & Lutsey, N. (2020). *Charging infrastructure in cities: Metrics for evaluating future needs*. International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/publications/EV_charging_metrics_aug2020
132. Han, X. & et al. (2014). Battery degradation and capacity fade in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 251, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.11.029>

133. Haque, M. M., Jones, L., Lucas-Healey, K., & Sturmberg, B. (2022). *Grid Performance of a V2G Capable EV Charger: A Case Study*. Australian Renewable Energy Agency (ARENA). <https://arena.gov.au/assets/2022/03/case-study-grid-performance-of-a-v2g-capable-ev-charger.pdf>
134. Hassan, M. H., Mohamed, E. M., Kamel, S., & Ardjoun, S. A. E. M. (2024). Stochastic Optimal Power Flow Integrating With Renewable Energy Resources and V2G Uncertainty Considering Time-Varying Demand: Hybrid GTO-MRFO Algorithm. *IEEE Access*, *12*, 97893–97923. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3425754>
135. Hassler, J., Dimitrova, Z., Petit, M., & Dessante, P. (2021). Optimization and Coordination of Electric Vehicle Charging Process for Long-Distance Trips. *Energies*, *14*(13), 4054. <https://doi.org/10.3390/en14134054>
136. He, Y., Chen, Y., Yang, Z., He, H., & Liu, L. (2018). A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment. *Protection and Control of Modern Power Systems*, *3*(1), 18. <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0092-2>
137. Hecht, C., Figgner, J., & Sauer, D. U. (2023). Vehicle-to-Grid Market Readiness in Europe with a Special Focus on Germany. *Vehicles*, *5*(4), 1452–1466. <https://doi.org/10.3390/vehicles5040079>
138. Hill, J. S. (2024). EV „batteries on wheels” could save hundreds of billions in grid costs by 2040, report finds. *The Driven*. <https://thedriven.io/2024/11/04/ev-batteries-on-wheels-could-save-hundreds-of-billions-in-grid-costs-by-2040-report-finds/>
139. Hill, N., Albar, F., Agbekodo, M., Tonoli, A., Benders, J., Leonardi, L., & Chaintreau, A. (2019). *Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries Used in Electric Vehicles*. European Commission, Joint Research Centre (JRC); Ricardo Energy & Environment. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batteries_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf
140. Hill, N., Raugei, M., Pons, A., Vasileiadis, N., Ong, H., & Casullo, L. (2023). *Environmental challenges through the life cycle of battery electric vehicles* (No. PE 733.112; Research for TRAN Committee). European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Directorate-General for Internal Policies. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/733112/IPOL_STU\(2023\)733112_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2023/733112/IPOL_STU(2023)733112_EN.pdf)
141. Hirtenstein, A., & Guillaume, G. (2025, június 4). *Dutch car sharing firm adds Renault EVs capable of powering local grid*. Reuters; Reuters. <https://www.reuters.com/business/energy/dutch-car-sharing-firm-adds-renault-evs-capable-powering-local-grid-2025-06-04/>
142. Hmad, J., Houari, A., Bouzid, A. E. M., Saim, A., & Trabelsi, H. (2023). A Review on Mode Transition Strategies between Grid-Connected and Standalone Operation of Voltage Source Inverters-Based Microgrids. *Energies*, *16*(13), 5062. <https://doi.org/10.3390/en16135062>
143. Hoekstra, A. (2019). The Underestimated Potential of Battery Electric Vehicles to Reduce Emissions. *Joule*, *3*(6), 1412–1414. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.002>
144. Høj, J. C. M. L., Juhl, L. T., & Lindegaard, S. B. (2018). V2G—An Economic Gamechanger in E-Mobility? *World Electric Vehicle Journal*, *9*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/wevj9030035>

145. Horváth, G., Bai, A., Szegedi, S., Lázár, I., Máthé, C., Huzsvai, L., Zakar, M., Gabnai, Z., & Tóth, T. (2023). A Comprehensive Review of the Distinctive Tendencies of the Diffusion of E-Mobility in Central Europe. *Energies*, *16*(14), 5421. <https://doi.org/10.3390/en16145421>
146. Hu, Y., Bahamonde-Birke, F. J., & Ettema, D. (2025). Vehicle-to-grid, why not? An interview with battery electric vehicle users with various driving patterns in Utrecht, the Netherlands. *Transport Policy*, *164*, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.02.009>
147. Huang, Z., Fang, B., & Deng, J. (2020). Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system. *Protection and Control of Modern Power Systems*, *5*(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s41601-020-0154-0>
148. Huber, D., De Clerck, Q., De Cauwer, C., Sapountzoglou, N., Coosemans, T., & Messagie, M. (2021). Vehicle to Grid Impacts on the Total Cost of Ownership for Electric Vehicle Drivers. *World Electric Vehicle Journal*, *12*(4), 236. <https://doi.org/10.3390/wevj12040236>
149. Husmann, J., Beylot, A., Perdu, F., Pinochet, M., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2024). Towards consistent life cycle assessment modelling of circular economy strategies for electric vehicle batteries. *Sustainable Production and Consumption*, *50*, 556–570. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.001>
150. Icaza, D., Borge-Diez, D., Galindo, S. P., & Flores-Vázquez, C. (2023). Analysis of Smart Energy Systems and High Participation of V2G Impact for the Ecuadorian 100% Renewable Energy System by 2050. *Energies*, *16*(10), 4045. <https://doi.org/10.3390/en16104045>
151. ICCT. (2024). *EU rules to support access to private charging point installation in apartment buildings take effect this month but member states can do more*. <https://theicct.org/eu-rules-private-charging-apartment-buildings-mar24/>
152. Innovate UK. (2020). *Vehicle-to-Grid Intelligent control (VIGIL)*. UK Research and Innovation (UKRI), Gateway to Research (GtR). <https://gtr.ukri.org/projects?ref=104222>
153. International Electrotechnical Commission. (2024). *Open Charge Point Protocol (OCPP)* (No. IEC 63584:2024). International Electrotechnical Commission (IEC). <https://webstore.iec.ch/en/publication/95734>
154. International Energy Agency. (2012). *Energy Policies of IEA Countries: The Republic of Korea 2012 Review* (Nos. 978-92-64-17150-3). International Energy Agency (OECD/IEA). https://iea.blob.core.windows.net/assets/f95918d7-ed55-44ef-81a7-3609261894db/Korea2012_free.pdf
155. International Energy Agency. (2022). *Hungary 2022: Energy Policy Review*. <https://www.iea.org/reports/hungary-2022>
156. International Energy Agency. (2024, április 23). *Outlook for emissions reductions*. Global EV Outlook 2024; International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/outlook-for-emissions-reductions>
157. International Energy Agency. (2025). *Global EV Outlook 2025* (Expanding Sales in Diverse Markets, o. 1–173). International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
158. International Organization for Standardization. (2014). *Road vehicles—Vehicle-to-Grid Communication Interface—Part 2: Network and application protocol requirements* (No. ISO 15118-2:2014). International Organization for Standardization (ISO). <https://webstore.iec.ch/en/publication/9273>

159. International Organization for Standardization. (2022). *Road vehicles—Vehicle to grid communication interface—Part 20: Network and application protocol requirements* (No. ISO 15118-20:2022). International Organization for Standardization (ISO). <https://webstore.iec.ch/en/publication/26347>
160. ISO. (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.
161. ISO. (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.
162. IT, N. (2022). Nuvve Partners With San Diego Gas & Electric to Allow Electric School Buses to Give Energy Back to the Grid and Prevent Blackouts Through the Emergency Load Reduction Program (ELRP). *NUVVE Holding Corp.* <https://nuvve.com/nuvve-partners-with-san-diego-gas-electric-to-allow-electric-school-buses-to-give-energy-back-to-the-grid-and-prevent-blackouts-through-the-emergency-load-reduction-program-elrp/>
163. JET Charge. (2023). *V2G for Australia: REVS V2G infographic*. JET Charge. <https://jetcharge.com.au/wp-content/uploads/2023/03/REVS-V2G-infographic.pdf>
164. Jiang, X., Wang, S., Zhao, Q., & XuanWang. (2023). Optimized Dispatching Method for Flexibility Improvement of AC-MTDC Distribution Systems Considering Aggregated Electric Vehicles. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 11(4), 1857–1867. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000576>
165. Jimenez Carrizosa, M., Iovine, A., Damm, G., & Alou, P. (2022). Droop-Inspired Nonlinear Control of a DC Microgrid for Integration of Electrical Mobility Providing Ancillary Services to the AC Main Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(5), 4113–4122. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3156693>
166. Jin, Y., Yu, B., Seo, M., & Han, S. (2020). Optimal Aggregation Design for Massive V2G Participation in Energy Market. *IEEE Access*, 8, 211794–211808. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039507>
167. Jones, L., Lucas-Healey, K., Sturmberg, B., Temby, H., & Islam, M. (2021). *The A to Z of V2G* [Report]. Australian Renewable Energy Agency. <https://apo.org.au/node/311127>
168. Jowett, P. (2025). Utrecht energizes vehicle-to-grid car sharing service. *Pv Magazine International*. <https://www.pv-magazine.com/2025/06/12/utrecht-energizes-vehicle-to-grid-car-sharing-service/>
169. Kallitsis, E., Lindsay, J., Chordia, M., Edge, J. S., Offer, G. J., & Korre, A. (2024). Think global act local: The dependency of global lithium-ion battery emissions on production location and material sources. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141725>
170. Karolemeas, C., Tsigdinos, S., Moschou, E., & Kepaptsoglou, K. (2024). Shared autonomous vehicles and agent based models: A review of methods and impacts. *European Transport Research Review*, 16(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s12544-024-00644-2>
171. Karoń, G. (2022). Energy in Smart Urban Transportation with Systemic Use of Electric Vehicles. *Energies*, 15.0(15), 5751. <https://doi.org/10.3390/en15155751>
172. Klaina, H., Guembe, I. P., Lopez-Iturri, P., Astrain, J. J., Azpilicueta, L., Aghzout, O., Alejos, A. V., & Falcone, F. (2020). Aggregator to Electric Vehicle LoRaWAN Based Communication Analysis in Vehicle-to-Grid Systems in Smart Cities. *IEEE Access*, 8, 124688–124701. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007597>
173. Klingert, S., & Lee, J.-W. (2022). Using real mobility patterns to assess the impact of 100% electrified mobility in a German city. *Energy Informatics*, 5(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00248-x>

174. Knobloch, F., Hanssen, S., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewprecha, U., Huijbregts, M. A. J., & Mercure, J.-F. (2020). Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability*, 3(6), 437–447. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>
175. Ko, H., Kim, G., Nam, Y., & Ryu, K. (2021). Supervisory Power Coordination Scheme to Mitigate Power Curtailment in the Application of a Microgrid. *Processes*, 9(11), 1998. <https://doi.org/10.3390/pr9111998>
176. Koreny, M., Simonik, P., Klein, T., Mrovec, T., & Ligori, J. J. (2022). Hybrid Research Platform for Fundamental and Empirical Modeling and Analysis of Energy Management of Shared Electric Vehicles. *Energies*, 15(4), 1300. <https://doi.org/10.3390/en15041300>
177. Kovács, A. (2019). Bilevel programming approach to demand response management with day-ahead tariff. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(6), 1632–1643. <https://doi.org/10.1007/s40565-019-0569-7>
178. Krueger, H., & Cruden, A. (2020). Multi-Layer Event-Based Vehicle-to-Grid (V2G) Scheduling With Short Term Predictive Capability Within a Modular Aggregator Control Structure. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(5), 4727–4739. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.2976035>
179. Kumar, P., Channi, H. K., Kumar, R., Rajiv, A., Kumari, B., Singh, G., Singh, S., Dyab, I. F., & Lozanović, J. (2025). A comprehensive review of vehicle-to-grid integration in electric vehicles: Powering the future. *Energy Conversion and Management: X*, 25, 100864. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100864>
180. Kühnbach, M., Klobasa, M., Stephan, A., Lux, B., Frank, F., Surmann, A., Kähler, J., Biener, W., Kamaci, Z., & John, R. (2024). *Potential of a full EV-power-system-integration in Europe and how to realise it*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE & Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2024_10_Study_V2G_EU-Potential_Final.pdf
181. Latief, Y. (2025). China sets up 30 large-scale vehicle-to-grid pilot projects. *Smart Energy International*. <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/electric-vehicles/china-sets-up-30-large-scale-vehicle-to-grid-pilot-projects/>
182. Leal Filho, W., Abubakar, I. R., Kotter, R., Grindsted, T. S., Balogun, A.-L., Salvia, A. L., Aina, Y. A., & Wolf, F. (2021). Framing Electric Mobility for Urban Sustainability in a Circular Economy Context: An Overview of the Literature. *Sustainability*, 13(14), 7786. <https://doi.org/10.3390/su13147786>
183. Lee, J.-W., Park, S.-W., & Son, S.-Y. (2024). Gamification-Based Vehicle-to-Grid Service for Demand Response: A Pilot Project in Jeju Island. *IEEE Access*, 12, 30209–30219. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3367359>
184. Lee, L. (2025, április 29). *Power on Wheels: China Transforming EVs into National Grid Assets*. Counterpoint Research (Insight); Counterpoint Research. <https://www.counterpointresearch.com/insight/power-on-wheels-china-transforming-evs-into-national-grid-assets>
185. Lee, Y., Paredes, J. R., & Lee, S. H. (2012). *Smart Grid and Its Application in Sustainable Cities* (IDB Technical Note, Szám 446). Inter-American Development Bank. <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Smart-Grid-and-Its-Application-in-Sustainable-Cities.pdf>
186. Levin, A. R., & Richt Hannema, A. (2024, január 24). *How does car sharing impact the environment?* Urban Mobility Courses (Blog); EIT Urban Mobility Academy. <https://urbanmobilitycourses.eu/blog/how-does-car-sharing-impact-the-environment/>

187. Liang, Y., Wang, Z., & Abdallah, A. B. (2022). V2GNet: Robust Blockchain-Based Energy Trading Method and Implementation in Vehicle-to-Grid Network. *IEEE Access*, *10*, 131442–131455. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3229432>
188. Liu, D., Wang, W., Wang, L., Jia, H., & Shi, M. (2021). Dynamic Pricing Strategy of Electric Vehicle Aggregators Based on DDPG Reinforcement Learning Algorithm. *IEEE Access*, *9*, 21556–21566. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055517>
189. Liu, H., Huang, K., Yang, Y., Wei, H., & Ma, S. (2018). Real-time vehicle-to-grid control for frequency regulation with high frequency regulating signal. *Protection and Control of Modern Power Systems*, *3*(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0085-1>
190. Liu, H., Zhang, Y., Zheng, S., & Li, Y. (2019). Electric Vehicle Power Trading Mechanism Based on Blockchain and Smart Contract in V2G Network. *IEEE Access*, *7*, 160546–160558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951057>
191. Liu, K., Chen, Q., Kang, C., Su, W., & Zhong, G. (2018). Optimal operation strategy for distributed battery aggregator providing energy and ancillary services. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *6*(4), 722–732. <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0325-9>
192. Liu, S., Xie, X., & Yang, L. (2020). Analysis, Modeling and Implementation of a Switching Bi-Directional Buck-Boost Converter Based on Electric Vehicle Hybrid Energy Storage for V2G System. *IEEE Access*, *8*, 65868–65879. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985772>
193. Liu, T., Wang, P., Peng, Q., Zhang, M., Wang, T., & Meng, J. (2023). Operation-area-constrained Adaptive Primary Frequency Support Strategy for Electric Vehicle Clusters. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *11*(4), 1982–1994. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2023.000233>
194. Liu, X. (2020). Research on Flexibility Evaluation Method of Distribution System Based on Renewable Energy and Electric Vehicles. *IEEE Access*, *8*, 109249–109265. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000685>
195. Luo, F., Zhao, Z., & Rashidi, T. H. (2022). Mobile energy-to-home integration: An adaption of mobility as a service in urban energy systems. *IET Energy Systems Integration*, *4*(2), 220–234. <https://doi.org/10.1049/esi2.12056>
196. Ma, Q., Zhao, Y., Ji, C., Zhang, Y., & Ming, B. (2021). Electricity Curtailment Cost Coupled to Operation Model Facilitates Clean Energy Accommodation in Grid-Connected System. *Energies*, *14*(10), 2802. <https://doi.org/10.3390/en14102802>
197. Ma, T.-Y., & Fang, Y. (2022). Survey of charging management and infrastructure planning for electrified demand-responsive transport systems: Methodologies and recent developments. *European Transport Research Review*, *14*(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00560-3>
198. Ma, Z., Christensen, K., & Jørgensen, B. N. (2021). Business ecosystem architecture development: A case study of Electric Vehicle home charging. *Energy Informatics*, *4.0*(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00142-y>
199. MacLeod, M., & Cox, C. (2018). V2G: Answering the preliminary questions for V2G: What, where and how much? Cenex. <https://www.cenex.co.uk/app/uploads/https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2020/06/Fresh-Look-at-V2G-Value-Propositions.pdf> FINAL-LCV-Edition-with-QR-Code.pdf
200. Maeng, K., Ko, S., Shin, J., & Cho, Y. (2020). How Much Electricity Sharing Will Electric Vehicle Owners Allow from Their Battery? Incorporating Vehicle-to-Grid Technology and Electricity Generation Mix. *Energies*, *13*(16), 4248. <https://doi.org/10.3390/en13164248>

201. Magyarország Kormánya. (2024). *Már a fele elfogyott a vállalkozások e-autó programjának*. <https://kormany.hu/hirek/mar-a-fele-elfogyott-a-vallalkozasok-e-auto-programjanak>
202. Mah, D. N., van der Vleuten, J. M., Ip, J. C., & Hills, P. R. (2012). Governing the transition of socio-technical systems: A case study of the development of smart grids in Korea. *Energy Policy*, 45, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.005>
203. Makeen, P., Ghali, H. A., Memon, S., & Duan, F. (2023). Insightful Electric Vehicle Utility Grid Aggregator Methodology Based on the G2V and V2G Technologies in Egypt. *Sustainability*, 15(2), 1283. <https://doi.org/10.3390/su15021283>
204. Malakhatka, E., Pitz, M., Maghnie, M., Mazidi, M., Plamanescu, R., Sumereder, C., Prüfer, T., Wallbaum, H., Müller, D., & Monti, A. (2024). From use cases to business cases: I-Greta use cases portfolio analysis from innovation management and digital entrepreneurship models perspectives. *Energy Informatics*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00310-w>
205. Malya, P. P., Fiorini, L., Rouhani, M., & Aiello, M. (2021). Electric vehicles as distribution grid batteries: A reality check. *Energy Informatics*, 4(S2), 29. <https://doi.org/10.1186/s42162-021-00159-3>
206. Manso-Burgos, Á., Ribó-Pérez, D., Alcázar-Ortega, M., & Gómez-Navarro, T. (2021). Local Energy Communities in Spain: Economic Implications of the New Tariff and Variable Coefficients. *Sustainability*, 13(19), 10555. <https://doi.org/10.3390/su131910555>
207. Máthé, C., Péntzes, J., Horváth, G., Zakar, M., & Tóth, T. (2025). Alternative Forms of Transport and Possibilities of Sustainable Transport in the European Union. In M. A. Dulebenets, S. Wiśniewski, & M. Borowska-Stefańska (Szerk.), *Transport and Climate Change: New Mitigation and Adaptation Strategies* (o. 233–258). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00563-2_10
208. MAVIR. (2024). *A magyar villamosenergia-rendszer adatai 2024*. https://www.mavir.hu/documents/10258/0/MEKH_statistikai_kiadvany_VILLA_MOSENERGIA_2024_A4_10.pdf
209. MAVIR. (2025, december 28). *Kiegyenlítő energia elszámolás*. <https://www.mavir.hu/web/mavir/kiegyenlito-energia-elszamolas>
210. Miao, L. (2025). How Chinese EV owners are profiting from powering the grid with V2G. *CarNewsChina.Com*. <https://carnewschina.com/2025/06/05/how-chinese-ev-owners-are-profiting-from-powering-the-grid-with-v2g/>
211. Milas, N., Mourtzis, D., & Tatakis, E. (2020). A Decision-Making Framework for the Smart Charging of Electric Vehicles Considering the Priorities of the Driver. *Energies*, 13(22), 6120. <https://doi.org/10.3390/en13226120>
212. Mobilize (Renault Group). (2025). *Recharge à domicile—Mobilize (Mobilize Powerbox installée à partir de 1 299€ ; Mobilize Power V2G : PowerBox Verso – conditions requises)*. <https://www.mobilize.fr/offres/charge-a-domicile.html>
213. Modumudi Venkata Gautam. (2019). *Review of Vehicle-to-Grid Implementation in Pilot Program* [Politecnico di Milano]. <https://www.politesi.polimi.it/retrieve/a81cb05d-7c80-616b-e053-1605fe0a889a/Review%20of%20V2G%20implementation%20in%20Pilot%20Program%20Thesina.pdf>
214. Molnár, E., Kozma, G., Mészáros, M., & Kiss, É. (2020). Upgrading and the geography of the Hungarian automotive industry in the context of the fourth industrial revolution. *Hungarian Geographical Bulletin*, 69(2), 137–155. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.69.2.4>

215. Molnár, E., Saidi, F. A., & Szabó, K. (2022). Strategic coupling on the European periphery: A case study of a small Hungarian town. *Tér és Társadalom*, 36(3), 122–144. <https://doi.org/10.17649/TET.36.3.3424>
216. Morris, C. (2018, november 30). *Nissan uses bidirectional charging tech to power North American facilities*. Charged EVs; Charged EVs. <https://chargedevs.com/newswire/nissan-uses-bidirectional-charging-tech-to-to-power-north-american-facilities/>
217. Morris, C. (2022). Nuvve and San Diego Gas & Electric launch Electric School Bus V2G project. *Charged EVs*. <https://chargedevs.com/newswire/nuvve-and-san-diego-gas-electric-launch-electric-school-bus-v2g-project/>
218. Muehlegger, E., & Rapson, D. S. (2022). Subsidizing low- and middle-income adoption of electric vehicles: Quasi-experimental evidence from California. *Journal of Public Economics*, 216, 104752. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2022.104752>
219. Muqbel, A. M., Al-Awami, A. T., & Al-Bukhaytan, A. S. (2024). A Planning Model for an Electric Vehicle Aggregator Providing Ancillary Services to an Unbalanced Distribution Network Considering Contract Design. *IEEE Access*, 12, 29035–29048. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3368038>
220. Nagel, N. O., Jåstad, E. O., & Martinsen, T. (2024). The grid benefits of vehicle-to-grid in Norway and Denmark: An analysis of home- and public parking potentials. *Energy*, 293, 130729. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130729>
221. Naidu, S., Chand, A., Pandaram, A., & Vosikata, S. (2024). Electricity Consumption, Renewable Energy Production, and Current Account of Organisation for Economic Co-Operation and Development Countries: Implications for Sustainability. *Sustainability*, 16(9), 3722. <https://doi.org/10.3390/su16093722>
222. Nazir, M. I., Hussain, I., Ahmad, A., Khan, I., & Mallik, A. (2021). System Modeling and Reliability Assessment of Microgrids: A Review. *Sustainability*, 14(1), 126. <https://doi.org/10.3390/su14010126>
223. Neaimeh, M., & Andersen, P. B. (2020). Mind the gap- open communication protocols for vehicle grid integration. *Energy Informatics*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s42162-020-0103-1>
224. Negri, M., & Bieker, G. (2025). Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: A 2025 update and key factors to consider. *International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/>
225. Nespoli, L., Wiedemann, N., Suel, E., Xin, Y., Raubal, M., & Medici, V. (2023a). National-scale bi-directional EV fleet control for ancillary service provision. *Energy Informatics*, 6(S1), 40. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00281-4>
226. Nespoli, L., Wiedemann, N., Suel, E., Xin, Y., Raubal, M., & Medici, V. (2023b). National-scale bi-directional EV fleet control for ancillary service provision. *Energy Informatics*, 6.0(S1), 40. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00281-4>
227. Newsroom, E. (2020, május 1). *Government-funded Vehicle-to-Grid project completes grid balancing trials—Edie*. <https://www.edie.net/>. <https://www.edie.net/government-funded-vehicle-to-grid-project-completes-grid-balancing-trials/>
228. Nuvve Corporation. (2018). *Nuvve Corporation is selected as a V2G system provider in Japan's first ever V2G Aggregator Project by Toyota Tsusho Corporation and Chubu Electric Power Co., Inc.* <https://www.prnewswire.com/news-releases/nuvve-corporation-is-selected-as-a-v2g-system-provider-in-japans-first-ever-v2g-aggregator-project-by-toyota-tsusho-corporation-and-chubu-electric-power-co-inc-300685382.html>

229. Nuvve Corporation. (2023). E-FLEX - United Kingdom. *Nuvve Corporation*. <https://nuvve.com/projects/eflex-united-kingdom/>
230. Open Charge Alliance. (2025). *OCCP 2.1: Part 2—Specification*. Open Charge Alliance. <https://openchargealliance.org/my-oca/ocpp/>
231. *Open Charge Point Protocol (OCPP) specifications*. (2025). <https://openchargealliance.org/downloads/>
232. Ouramdane, O., Elbouchikhi, E., Amirat, Y., Le Gall, F., & Sedgh Gooya, E. (2022). Home Energy Management Considering Renewable Resources, Energy Storage, and an Electric Vehicle as a Backup. *Energies*, *15.0*(8), 2830. <https://doi.org/10.3390/en15082830>
233. P3 Group. (2025). *Bidirectional Charging – Worth the Hype?* <https://www.p3-group.com/wp-content/uploads/2025/03/P3-Bidirectional-Charging%E2%80%93Worth-the-Hype.pdf>
234. Pan, R., Liang, Y., Li, Y., Zhou, K., & Miao, J. (2023). Environmental and Health Benefits of Promoting New Energy Vehicles: A Case Study Based on Chongqing City. *Sustainability*, *15*(12), 9257. <https://doi.org/10.3390/su15129257>
235. Park, K., Jang, D., Kim, S., Lim, Y., & Lee, J. (2023). A Grid-Friendly Electric Vehicle Infrastructure: The Korean Approach. *IEEE Power and Energy Magazine*, *21*(6), 28–37. <https://doi.org/10.1109/mpe.2023.3308232>
236. Pedersen, K. L. (2025). *Enabling Grid Services with Bidirectional EV Chargers*. <https://www.preprints.org/manuscript/202510.2162/v1>
237. Pedram, O., Asadi, E., Chenari, B., Moura, P., & Gameiro Da Silva, M. (2023). A Review of Methodologies for Managing Energy Flexibility Resources in Buildings. *Energies*, *16*(17), 6111. <https://doi.org/10.3390/en16176111>
238. Piamvilai, N., & Sirisumrannukul, S. (2022). Optimal Scheduling of Movable Electric Vehicle Loads Using Generation of Charging Event Matrices, Queuing Management, and Genetic Algorithm. *Energies*, *15*(10), 3827. <https://doi.org/10.3390/en15103827>
239. Pintér, G., Zsiborács, H., & Baranyai, N. H. (2022). Aspects of Determining the Energy Storage System Size Linked to Household-Sized Power Plants in Hungary in Accordance with the Regulatory Needs of the Electric Energy System. *Sustainability*, *14*(5), 2622. <https://doi.org/10.3390/su14052622>
240. Preis, V., & Biedenbach, F. (2023). Assessing the incorporation of battery degradation in vehicle-to-grid optimization models. *Energy Informatics*, *6*(S1), 33. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00288-x>
241. PSD. (2020). *VIGIL: Pioneering V2G Technology for a Greener Tomorrow*. <https://www.powersystemsdesign.com/articles/vigil-pioneering-v2g-technology-for-a-greener-tomorrow/22/17347>
242. Putrus, G., Dai, X., Kotter, R., Marzband, M., Wang, Y., & Das, R. (2018). *Summary of the State-of-the-Art report*. <https://northsearegion.eu/media/4384/summary-state-of-the-art-report-seev4-city.pdf>
243. Qin, D., Sun, Q., Wang, R., & Ma, D. (2020). Adaptive Bidirectional Droop Control for Electric Vehicles Parking Lot with Vehicle-to-Grid Service in Microgrid. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, *6*. <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.00310>
244. Ravi, S. S., & Aziz, M. (2022). Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives. *Energies*, *15*(2), 589. <https://doi.org/10.3390/en15020589>
245. Renault Group. (2024, november 27). *Renault Group, We Drive Solar and MyWheels join forces with the city of Utrecht to launch Europe's first V2G enabled*

- car-sharing service*. Renault Group global media website; Renault Group. <https://media.renaultgroup.com/renault-group-we-drive-solar-and-mywheels-join-forces-with-the-city-of-utrecht-to-launch-europes-first-v2g-enabled-car-sharing-service>
246. Rene, E. A., & Fokui, W. S. T. (2024). Artificial intelligence-based optimal EVCS integration with stochastically sized and distributed PVs in an RDNS segmented in zones. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s43067-023-00126-w>
 247. Reuters. (2025). *BMW debreceni gyár: Sorozatgyártás és felfutás*. <https://www.reuters.com/>
 248. Ritter, M., & Schanz, H. (2021). Carsharing Business Models' Strategizing Mindsets Regarding Environmental Sustainability. *Sustainability*, 13(22), 12700. <https://doi.org/10.3390/su132212700>
 249. Rojano-Padrón, A., Metais, M. O., Ramos-Real, F. J., & Perez, Y. (2023). Tenerife's Infrastructure Plan for Electromobility: A MATSim Evaluation. *Energies*, 16(3), 1178. <https://doi.org/10.3390/en16031178>
 250. Sadhu, K., Haghshenas, K., Rouhani, M., & Aiello, M. (2022). Optimal joint operation of coupled transportation and power distribution urban networks. *Energy Informatics*, 5(1), 35. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00249-w>
 251. Sagaria, S., van der Kam, M., & Boström, T. (2025). Vehicle-to-grid impact on battery degradation and estimation of V2G economic compensation. *Applied Energy*, 377, 124546. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124546>
 252. Saha, D., Saikia, L. C., & Rahman, A. (2022). Cascade controller based modeling of a four area thermal: Gas AGC system with dependency of wind turbine generator and PEVs under restructured environment. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7(1), 47. <https://doi.org/10.1186/s41601-022-00266-7>
 253. Salkuti, S. R. (2023). Advanced Technologies for Energy Storage and Electric Vehicles. *Energies*, 16.0(5), 2312. <https://doi.org/10.3390/en16052312>
 254. Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
 255. Sarsia, P., Munshi, A., Sheikh, F., Yadav, K., & Shukla, P. (2023). Driving the Energy Transition: Large-Scale Electric Vehicle Use for Renewable Power Integration. *RAiSE-2023*, 106. <https://doi.org/10.3390/engproc2023059106>
 256. Scale. (2025). Utrecht becomes Europe's first city with a V2G electric car-sharing service. *SCALE*. <https://scale-horizon.eu/utrecht-becomes-europes-first-city-with-a-v2g-electric-car-sharing-service/>
 257. Schwenk, K., Meisenbacher, S., Briegel, B., Harr, T., Hagenmeyer, V., & Mikut, R. (2021). Integrating Battery Aging in the Optimization for Bidirectional Charging of Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(6), 5135–5145. <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3099206>
 258. Schwerdt, R., Nagel, M., Fetzer, V., Gräf, T., & Rupp, A. (2019). P6V2G: A privacy-preserving V2G scheme for two-way payments and reputation. *Energy Informatics*, 2(S1), 32. <https://doi.org/10.1186/s42162-019-0075-1>
 259. Sehimi, Y., Almaksour, K., Suomalainen, E., & Robyns, B. (2023). Mitigating the impact of fast charging on distribution grids using vehicle-to-vehicle power transfer: A Paris city case study. *IET Electrical Systems in Transportation*, 13(1), e12051. <https://doi.org/10.1049/els2.12051>
 260. Shenzhen Daily. (2025, április 3). *SZ to lead V2G integration as national pilot city*. The People's Government of Futian District. https://www.szft.gov.cn/en/news/news/content/post_12112571.html

261. Shi, L., Lv, T., & Wang, Y. (2019). Vehicle-to-grid service development logic and management formulation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(4), 935–947. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0464-7>
262. Shipman, R., Naylor, S., Pinchin, J., Gough, R., & Gillott, M. (2019). Learning capacity: Predicting user decisions for vehicle-to-grid services. *Energy Informatics*, 2(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s42162-019-0102-2>
263. Sierzchula, W., Bakker, S., Maat, K., & Van Wee, B. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy*, 68, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043>
264. Song, R., & Potoglou, D. (2020). Are Existing Battery Electric Vehicles Adoption Studies Able to Inform Policy? A Review for Policymakers. *Sustainability*, 12(16), 6494. <https://doi.org/10.3390/su12166494>
265. St. John, J. (2024, september 3). *The country's biggest electric school-bus fleet will also feed the grid*. Canary Media; Canary Media. <https://www.canarymedia.com/articles/clean-fleets/the-biggest-electric-school-bus-as-grid-battery-project-in-the-us-goes-live>
266. Stafford, R. (2025). *Latest Lessons from Electric School Bus Vehicle-to-Grid Programs*. <https://www.wri.org/update/electric-school-bus-v2g-lessons-examples>
267. Stecula, K., Wolniak, R., & Grebski, W. W. (2023). AI-Driven Urban Energy Solutions—From Individuals to Society: A Review. *Energies*, 16.0(24), 7988. <https://doi.org/10.3390/en16247988>
268. Steffen, T., Fly, A., & Mitchell, W. (2020). Optimal Electric Vehicle Charging Considering the Effects of a Financial Incentive on Battery Ageing. *Energies*, 13(18), 4742. <https://doi.org/10.3390/en13184742>
269. Steward, D. (2017). *Critical Elements of Vehicle-to-Grid (V2G) Economics* (No. NREL/TP-5400-69017). National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/69017.pdf>
270. Sultan, V., Aryal, A., Chang, H., & Kral, J. (2022). Integration of EVs into the smart grid: A systematic literature review. *Energy Informatics*, 5(1), 65. <https://doi.org/10.1186/s42162-022-00251-2>
271. Sun, D., Ou, Q., Yao, X., Gao, S., Wang, Z., Ma, W., & Li, W. (2020). Integrated human-machine intelligence for EV charging prediction in 5G smart grid. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020(1), 139. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01752-y>
272. Surmann, A., Walia, R., & Kohrs, R. (2020). Agent-based bidirectional charging algorithms for battery electric vehicles in renewable energy communities. *Energy Informatics*, 3(S1), 19. <https://doi.org/10.1186/s42162-020-00122-8>
273. Szabó, G., Fazekas, I., Patkós, C., Radics, Z., Csorba, P., Tóth, T., Kovács, E., Mester, T., & Szabó, L. (2018). A lakosság megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos ismereteinek vizsgálata Hajdú-Bihar megyei és Heves megyei településeken. In I. Lázár (Szerk.), *Környezet és energia: Hatékony termelés, tudatos felhasználás* (o. 133–140). MTA DAB Földtudományi Szakbizottság. <https://m2.mtmt.hu/api/publication/3358788>
274. Taghizadeh, S., Hossain, M. J., Poursafar, N., Lu, J., & Konstantinou, G. (2020). A Multifunctional Single-Phase EV On-Board Charger With a New V2V Charging Assistance Capability. *IEEE Access*, 8, 116812–116823. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004931>
275. Taljegard, M., Göransson, L., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2019). Electric Vehicles as Flexibility Management Strategy for the Electricity System—A Comparison between Different Regions of Europe. *Energies*, 12(13), 2597. <https://doi.org/10.3390/en12132597>

276. Taljegard, M., Göransson, L., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2021). To Represent Electric Vehicles in Electricity Systems Modelling—Aggregated Vehicle Representation vs. Individual Driving Profiles. *Energies*, *14*(3), 539. <https://doi.org/10.3390/en14030539>
277. Tan, A. S. T., Ishak, D., Mohd-Mokhtar, R., Lee, S. S., & Idris, N. R. N. (2018). Predictive control of plug-in electric vehicle chargers with photovoltaic integration. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *6*(6), 1264–1276. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0411-7>
278. Temporelli, A., Carvalho, M. L., & Girardi, P. (2020). Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Batteries: An Overview of Recent Literature. *Energies*, *13*(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/en13112864>
279. The Mobility House. (2024, október 22). *Charge for Free – Renault Group, Mobilize and The Mobility House launch Vehicle-to-Grid in France, while Germany is establishing the regulatory framework*. Newsroom; The Mobility House GmbH. https://www.mobilityhouse.com/int_en/our-company/newsroom/article/charge-for-free-renault-group-mobilize-and-the-mobility-house-launch-vehicle-to-grid-in-france-while-germany-is-establishing-the-regulatory-framework
280. The Mobility House Energy. (2025, április 23). *New Studies on V2G - in Europe*. Knowledge Center; The Mobility House Energy GmbH. https://mobilityhouse-energy.com/int_en/knowledge-center/article/v2g-new-studies-2025-europe
281. Thomas, J., de Heer, H., Mangino Rivas, M., Manea, N., & Boggia, S. (2023). *V2X Enablers and Barriers: Assessment of the regulatory framework of bidirectional EV charging in Europe*. smartEn; DNV. <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/company/news-insights/V2X-Enables-and-Barriers-Study.pdf>
282. Tirunagari, S., Gu, M., & Meegahapola, L. (2022). Reaping the Benefits of Smart Electric Vehicle Charging and Vehicle-to-Grid Technologies: Regulatory, Policy and Technical Aspects. *IEEE Access*, *10*, 114657–114672. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3217525>
283. Tomczewski, A., Mikulski, S., Piotrowski, A., Sowa, S., & Wróbel, K. (2023). Multicriteria Optimisation of the Structure of a Hybrid Power Supply System for a Single-Family Housing Estate in Poland, Taking into Account Different Electromobility Development Scenarios. *Energies*, *16*(10), 4132. <https://doi.org/10.3390/en16104132>
284. Transport & Environment. (2024, április 17). *Public charging in Europe: Where are we at?* Transport & Environment. <https://www.transportenvironment.org/articles/public-charging-in-europe-where-are-we-at>
285. Tuhnitz, F., Dietrich, A., & Schumann, M. (2023). National-scale control of a bi-directional electric vehicle fleet for ancillary services. *Energy Informatics*. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00281-4>
286. Uddin, K., Dubarry, M., & Glick, M. B. (2018). The viability of vehicle-to-grid operations from a battery technology and policy perspective. *Energy Policy*, *113*, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.015>
287. UKRI. (2025, október 10). *E-FLEX - Real-world Energy Flexibility through Electric Vehicle Energy Trading*. UKRI Gateway to Research (GtR); UK Research and Innovation (UKRI). <https://gtr.ukri.org/projects?ref=104249>
288. University of Passau. (2025). *ELECTRIFIC - Enabling seamless electromobility through smart vehicle-grid integration*. University of Passau – Chair of Computer

- Networks and Computer Communications; University of Passau. <https://www.fim.uni-passau.de/en/computer-networks/research/projects/electrific/>
289. Usman, M. U., & Faruque, M. O. (2019). Applications of synchrophasor technologies in power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(2), 211–226. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0455-8>
 290. Ustun, T. S., Hussain, S. M. S., & Kikusato, H. (2019). IEC 61850-Based Communication Modeling of EV Charge-Discharge Management for Maximum PV Generation. *IEEE Access*, 7, 4219–4231. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888880>
 291. van der Hoogt, J., van Bergen, E., Warmerdam, J., Kotter, R., Putrus, G., Bentley, E., Dai, X., Wang, Y., Das, R., Herteleer, B., & Rimmer, C. (2020). *SEEV4-City: Approach to KPI Methodology*. https://pure.hva.nl/ws/portalfiles/portal/17123058/SEEV4_City_approach_to_KPI_Methodology.pdf
 292. Vanhaverbeke, L., Schreurs, D., De Clerck, Q., Messagie, M., & Van Mierlo, J. (2017). Total cost of ownership of electric vehicles incorporating Vehicle to Grid technology. *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ever.2017.7935931>
 293. Vélez, A. M. A. (2023). Environmental impacts of shared mobility: A systematic literature review of life-cycle assessments focusing on car sharing, carpooling, bikesharing, scooters and moped sharing. *Transport Reviews*, 44(3), 634. <https://doi.org/10.1080/01441647.2023.2259104>
 294. Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward A Unified View1. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478. <https://doi.org/10.2307/30036540>
 295. Venkatesh, V., Thong, J. Y. L., & Xu, X. (2012). *Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (SSRN Scholarly Paper No. 2002388). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=2002388>
 296. Versinetic. (2019). *UK Electric Vehicle charging...what does the future hold? - Versinetic*. <https://www.versinetic.com/news-blog/uk-electric-vehicle-charging-what-does-the-future-hold-2/>
 297. Vincent, T. L., Weddle, P. J., & Tang, G. (2017). System theoretic analysis of battery charging optimization. *Journal of Energy Storage*, 14, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.09.009>
 298. Wang, D., Coignard, J., Zeng, T., Zhang, C., & Saxena, S. (2016). Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. Vehicle-to-grid services. *Journal of Power Sources*, 332, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.116>
 299. Wang, W., Wang, J., Peng, X., Yang, Y., Xiao, C., Yang, S., Wang, M., Wang, L., Li, L., & Chang, X. (2023). Exploring best-matched embedding model and classifier for charging-pile fault diagnosis. *Cybersecurity*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s42400-023-00138-z>
 300. Wang, X., Wei, J., Wen, F., & Wang, K. (2023). A Trading Mode Based on the Management of Residual Electric Energy in Electric Vehicles. *Energies*, 16(17), 6317. <https://doi.org/10.3390/en16176317>
 301. Wang, Z., Li, X., Li, Y., Zhao, T., Xia, X., & Zhang, H. (2021). An Optimization Framework for Low-Carbon Oriented Integrated Energy System Management in Commercial Building under Electric Vehicle Demand Response. *Processes*, 9(10), 1737. <https://doi.org/10.3390/pr9101737>

302. Weiss, M., Winbush, T., Newman, A., & Helmers, E. (2024). Energy Consumption of Electric Vehicles in Europe. *Sustainability*, 16(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/su16177529>
303. Xu, R., Seadle, M., Kennedy, C., & McPherson, M. (2023). Flexible electric vehicle charging and its role in variable renewable energy integration. *Environmental Systems Research*, 12(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40068-023-00293-9>
304. Yu, R. D., & De Martini, P. (2024). *Flexible DER & EV Connections*. U.S. Department of Energy, Office of Electricity. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-08/Flexible%20DER%20%20EV%20Connections%20July%202024.pdf>
305. Yu, S., & Park, K. (2024). PUF-Based Robust and Anonymous Authentication and Key Establishment Scheme for V2G Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(9), 15450–15464. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3349689>
306. Zahler, J., Taillanter, E., & Vollmuth, P. (2025). *V2G Integration in Europe: A Comparison of the Implementation of Bidirectional Charging in France, the UK and Germany*. FfE – Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/02/FfE-Whitepaper-V2G-UK-FR-DE-ENGLISH.pdf>
307. Zahler, J., Vollmuth, P., & Ostermann, A. (2024). Unlocking the Potential: An In-Depth Analysis of Factors Shaping the Success of Smart and Bidirectional Charging in a Cross-Country Comparison. *Energies*, 17(15), 3637. <https://doi.org/10.3390/en17153637>
308. Zhang, C., Wang, X., Wang, Y., & Tang, P. (2025). Economic Viability of Vehicle-to-Grid (V2G) Reassessed: A Degradation Cost Integrated Life-Cycle Analysis. *Sustainability*, 17(12), 5626. <https://doi.org/10.3390/su17125626>
309. Zhou, F., Shi, W., Li, X., Yang, C., & Hao, T. (2023). Cooperative Game Cooperative Control Strategy for Electric Vehicles Based on Tariff Leverage. *Energies*, 16(12), 4808. <https://doi.org/10.3390/en16124808>
310. Zhu, Y., Li, Y., Zhang, Y., & Wang, H. (2024). A Planning Model for an Electric Vehicle Aggregator in the Energy and Reserve Markets. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3368038>
311. Zum. (2024, augustus 27). *Zum Deploys Nation's First 100% Electric School Bus Fleet in Oakland, California for the 2024-2025 School Year*. Zum; Zum Services, Inc. <https://www.ridezum.com/press-release/nations-first-all-electric-school-bus-fleet-oakland-ca/>

9. Függelék:

Autó típus	EV-ICE árkülönbség (EUR)
Fiat vs Aygo	12626
Zoe vs Yaris	13346
ID3 vs Golf	-5381
Tesla vs BMW	2759

F1. táblázat EV-ICE beszerzési árkülönbség a vizsgált modellpárok esetében (EUR) Forrás: a kapcsolódó eredmények publikált formában: (Horváth és mtsai., 2023)

Szolgáltató	Citylink	MOL Limo	GreenGo	Wigo
Árbevétel/jármű (eEUR)	12,5	9,2	7,3	6,1
Napi bérlettszám (db/jármű/nap)	3.0	2.7	2.2	1.4
EBITDA-marzs (%)	-10.4	-15.3	-22.1	-35.0
Flottaátlag-életkor (év)	1,9	2,4	3,6	4,8
Töltőpont-sűrűség (db/100 km ²)	26.75	42.86	42.86	42.86
Felhasználók/1000 lakos	17.6	24.3	18.7	8.9

F2. táblázat Benchmark KPI-k szolgáltatóként (2023) Forrás saját számítás és szerkesztés.

Projekt ID	Projekt	Ország/Város	Időszak
1	Galp / ev.energy Dynamic Tariff Pilot	Portugália (országos)	2022–2023
2	FlexPower Amsterdam	Hollandia / Amszterdam	2017–2022
3	Edison Project	Dánia / Bornholm szigete	2009–2013
4	Green eMotion Projekt	EU (több ország)	2011–2015
5	Nissan Leaf V2G Projekt (UK), GIV Program (USA), UK Power Networks Projektek	Egyesült Királyság, USA	2011
6	Parker Project	Dánia / DTU (Dán Műszaki Egyetem), Frederiksberg	2016–2018
7	Sciurus Pilot	Egyesült Királyság	2018–2021
8	SEEV4-City Pilot	Norvégia / Oslo	2016–2020
9	Nissan Energy Share Pilot	USA, Japán, Németország (Franklin TN, San Diego, Hagen, Yokohama)	2018–2020
10	ACT REVS (Realising EV-to-Grid Services)	Ausztrália / Ausztrál Fővárosi Terület (ACT)	2020–2022
11	Toyota City V2G Demonstráció	Japán / Toyota City	2018–2022
12	UC San Diego INVENT Program és Nissan Energy Share	USA / San Diego, CA; Franklin, TN	2017–2020
13	VIGIL (Vehicle-to-Grid Intelligent Control) Projekt	Egyesült Királyság / Oxford	2018–2021
14	E-Flex (Electric Vehicle Fleet-based Flexibility) Projekt	Egyesült Királyság	2018–2021
15	ELECTRIFIC Projekt	EU (Spanyolország, Belgium, Svédország, Németország)	2016–2019
16	Dreev V2G Projektek	Franciaország, Egyesült Királyság	2019
17	GridMotion	Franciaország / Párizs térsége	2017–2019
18	Electric Nation V2G	Egyesült Királyság	2018–2022
19	Net2Mobility (i-rEzEPT)	Németország	2020–2021
20	UtrechtEnergetic (MyWheels & We Drive Solar)	Hollandia / Utrecht	2024–2025
21	Jeju V2G Gamifikációs Pilot	Dél-Korea / Jeju-sziget	2023–2024
22	China NEV Pilot	Kína / több város (pl. Shenzhen, Jiangsu, Peking)	2024–2025

Projekt ID	Projekt	Ország/Város	Időszak
23	San Diego V2G Iskolabusz Pilot (SDG&E)	USA / San Diego, Kalifornia (elsősorban Oakland körzet)	2021
24	Mobility House & TenneT Redispatch V2G Pilot Projekt	Németország / Dél-Németország	2021–2022
25	Renault 5 + Mobilize V2G Program	Franciaország	2024
26	KEPCO – Hyundai IONIQ 5 AC V2G Demonstráció	Dél-Korea	2021–2023
27	SCALE Projekt	Egyesült Királyság / Dundee	2021–2024
28	Polestar V2G pilotprojekt	Svédország / Göteborg	2024
29	Ayesa GridPilot Projekt	Spanyolország / Madrid	2023
30	FfE „V2G Integration in Europe”	Franciaország / Egyesült Királyság / Németország	2025
31	Fraunhofer ISE & ISI „Potential of full EV power system integration in Europe”	Európa	2024
32	EY/Eurelectric „Shift 2.0”	Egyesült Királyság (EU-s kitekintéssel)	2024
33	Dynamic Incentives LLM (Sun et al.)	Nem releváns (modell)	2025
34	Netbeheer Nederland ajánlása	Hollandia	Folyamatos
35	V2G Nordics	Skandináv országok (Dánia, Norvégia, Svédország, Finnország)	2017–2020

F3. táblázat Projektregiszter a projektmetaadatok egységes rögzítésével
Forrás saját szerkesztés.

Project ID	Forrás
1	https://www.ev.energy/case-study/galp-pilot-confirms-dynamic-ev-charging-value
2	https://elaad.nl/wp-content/uploads/2022/05/Informatie_FlexPower_Amsterdam.pdf
3	https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/5186822/681110A9d01.pdf
4	https://cordis.europa.eu/project/id/265499
5	https://www.v2g-hub.com/projects/invent-ucsd-nissan-nuvve/
6	https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/201164295/Parker_Final_report_v1.1_2019.pdf
7	https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2021/05/Sciurus-Trial-Insights.pdf
8	https://northsearegion.eu/seev4-city/publications/index.html
9	https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4907
10	https://arena.gov.au/projects/realising-electric-vehicle-to-grid-services/
11	https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6331
12	https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2020-12/Energy_Commission_Appendices_June-2018_Annual_Report_0.pdf
13	https://gtr.ukri.org/projects?ref=104222
14	https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2020/01/E-Flex-Report.pdf
15	https://cordis.europa.eu/project/id/713864
16	https://dreev.com/en/flexitanie/
17	https://nuvve.com/gridmotion-project-reducing-electric-vehicle-usage-cost-thanks-to-smart-charging-process/
18	https://commercial.nationalgrid.co.uk/projects/electric-nation
19	https://www.digital.iao.fraunhofer.de/de/leistungen/IoT/i-rEzEPT.html
20	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X25000666
21	https://ieeexplore.ieee.org/document/10440064
22	https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/9257
23	https://www.cpuc.ca.gov/-/media/cpuc-website/divisions/energy-division/documents/sb-350-te/srp-ab1082_1083-2022-evaluation-report.pdf
24	https://cdn-website.mobilityhouse.com/0725_EN_Factsheet_V2G_The-Mobility-House_Energy_bb477ba0fb576687bc1b0496b1a6c77e.pdf
25	https://media.renault.com/mobilize-v2g-where-the-future-electric-renault-5-becomes-a-source-of-energy/
26	https://www.v2g-hub.com/projects/vgi-core-component-development-and-v2g-demonstration-using-ccs-type-1-standard-kepco/
27	https://www.polisnetwork.eu/project/scale/
28	https://www.polestar.com/global/news/what-s-v2g/
29	https://www.ayesa.com/en/press/ayesa-rolls-out-its-gridpilot-technology-to-improve-urban-transport-in-europe/
30	https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2025/02/FfE-Whitepaper-V2G-UK-FR-DE-ENGLISH.pdf

Project ID	Forrás
31	https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2024_10_Study_V2G_EU-Potential_Final.pdf
32	https://innovation.ukpowernetworks.co.uk/projects/shift-2-0
33	https://www.mdpi.com/2071-1050/17/12/5626
34	https://elaad.nl/wp-content/uploads/downloads/deliverable-2_190517-elaad-final-report-regulatory-barriers-smart-charging-stc.pdf
35	https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/13856

F4. táblázat Projektek forrásai Forrás saját szerkesztés.
(Utolsó letöltés: 2025.06.11. - 2025.06.27.)

Adatdimenzió	Rövid hatókör
Felhasználói elégedettség	A használói tapasztalatok, elfogadottsági jelzések és elégedettségi kimenetek rögzítése
Flotta és járműtípus	A járműállomány összetétele, technológiai variánsai és alkalmazási környezete
Gazdasági ösztönzők	Ár- és támogatási jellegű ösztönzők, tarifák, kompenzációs elemek projektbeli megjelenése
Generációs besorolás	A projekt érettségi vagy generációs kategóriába sorolása a dokumentáció alapján
Grid-szolgáltatási hatás	Rendszerszintű szolgáltatásokra utaló hatások és hálózati működési kimenetek
Időszak	A vizsgált időablak, futamidő, pilotfázis és releváns dátumok rögzítése
Kihívások és tanulságok	Korlátok, akadályok, implementációs problémák és levont következtetések
Protokollok és szabványok	Interoperabilitási elemek, kommunikációs protokollok és szabványhivatkozások
Részvétel és bevonás	Szereplői részvétel, toborzás, bevonási mechanizmusok és lefedettség
TCO és költséghatás	Költségstruktúrák, fajlagos költségek, megtérülési jelzések és TCO-értelmezések
Technológiai ösztönzők	Eszközoldali vagy műszaki jellegű ösztönzők és implementációt segítő megoldások
Töltőinfrastruktúra	Töltési környezet, hozzáférés, teljesítmény, telepítési logika és elérhetőség
Viselkedési ösztönzők	Felhasználói viselkedésformálásra irányuló eszközök és programlogikák
Visszatáplált energia	Mennyiségi vagy kvalitatív közlések a V2G-ből származó energia-visszatáplálásról
Éves bevétel járművenként	Bevételi indikátorok és járműszintű hozamokra vonatkozó közlések

F5. táblázat Harmonizált adatdimenziók Forrás saját szerkesztés.

Réteg (adatkészlet)	Kulcsmezők	Szerep a számításban
Projektregiszter (P)	Project_ID	A korpusz azonosítása; projektszintű konvergencia számítási alapja.
Claim-szint (C)	Claim_ID; Project_ID	Állításmagok nyilvántartása; forráshelyhez történő visszavezetés.
Evidencia-egység (U)	UnitKey; Project_ID; Claim_ID; Evidence_type (E1–E3); Evidence_strength (A/B/C); StatementID	A legkisebb elemzési egység; minősítés és S01–S18 hozzárendelés rögzítése.
Állításkódkönyv (S)	StatementID; GateID; interpretációs pillér; (szereplői kategória)	A szintetizált állítások stabil kódkészlete és rendezési logikája; interpretációs segédletek kapcsolása.
Kimeneti eredménytábla (R)	StatementID; C_s; n_{high}; E_s; kvadráns; GateID; rang	18 soros, eredmény; az állítások alátámasztottságának és prioritásának összegzése.

*F6. táblázat Az adatmodell rétegződése és a kulcsazonosítók kapcsolatrendszere
Forrás saját szerkesztés.*

Kód	Kritériumalapú definíció
E1 – magas	Publikált tanulmány, részletes jelentés, módszertanilag ellenőrizhető beszámoló; egyértelmű hivatkozási ponttal.
E2 – közepes	Szervezeti közlés vagy programleírás, amely részben kvantifikált, de értelmezést igényelhet.
E3 – alacsony	Általános/indirekt közlés (pl. sajtóanyag), amely alátámasztásra alkalmas, de korlátozott részletességű.
A – erős	Közvetlen, konkrét, önállóan értelmezhető evidencia; a kontextus minimális kiegészítést igényel.
B – közepes	Részben konkrét evidencia; értelmezéshez kiegészítő kontextus vagy feltétel szükséges.
C – gyenge	Általános állítás vagy indirekt jelzés; alátámasztó jellegű, de korlátozottan operacionalizálható.

F7. táblázat A dimenziók kritériumalapú definíciói Forrás: saját szerkesztés

KPI ID	KPI megnevezés	Mértékegység
KPI-B1	SoH változás	%pont/év
KPI-B2	Ekvivalens ciklusszám	EFC
KPI-C1	Elkerült CO ₂	kgCO _{2e}
KPI-C2	Csúcsterhelés-csökkentés	kW
KPI-E1	Kétirányú energiaforgalom	kWh
KPI-G1	Nettó pénzügyi eredmény	€/jármű/hó
KPI-G2	Bevétel bontás termékenként	%
KPI-G3	Elszámolási hibaarány	%
KPI-P1	Aktív részvételi arány	%
KPI-P2	Csatlakoztatottsági arány	%
KPI-P3	Rendelkezésre álló flexibilitás	kW vagy MW
KPI-S1	Aktiválási sikerarány	%
KPI-S2	Válaszidő	s
KPI-S3	Nyomonkövetési hiba	% vagy kW
KPI-T1	Mérési granularitás megfelelőség	igen/nem; kategória
KPI-T2	Okosmérő lefedettség	%
KPI-T3	Interoperabilitási kompatibilitás	% vagy igen/nem
KPI-X1	Kibertámadási incidensráta	db/év

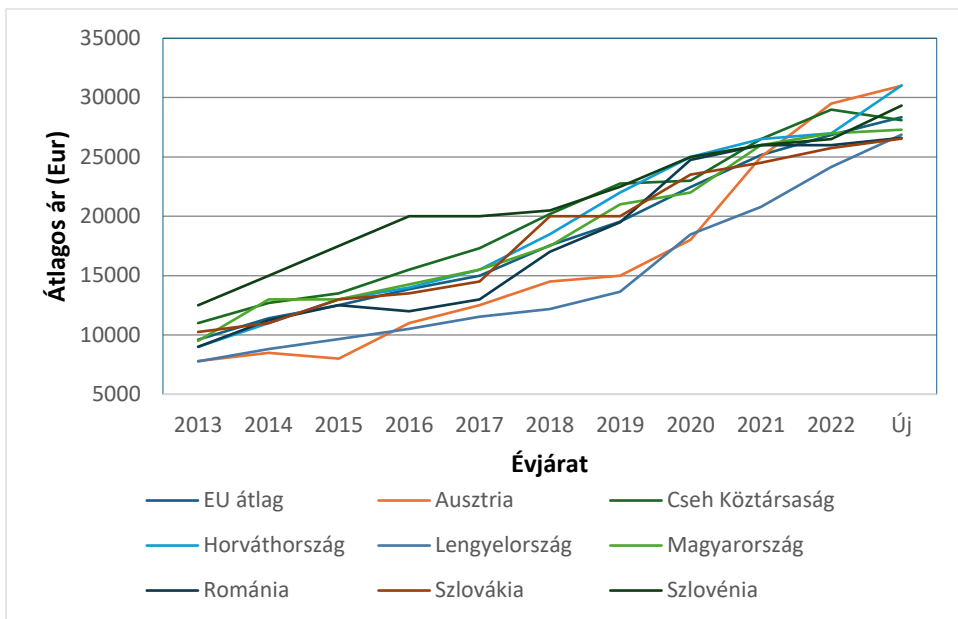
F8. táblázat Kulcsteljesítménymutatók (KPI) megnevezései és mértékegységei
Forrás: saját szerkesztés

GateID	Kapu megnevezése	Rövid tartalom
1	Előfeltétel	A végrehajtás kiinduló feltételeit és a beavatkozás indításához szükséges minimumot rögzíti (technológiai, adatinfrastruktúra, szereplői jogosultság).
2	Közvetlen beavatkozás	A közvetlenül alkalmazható intézkedéseket és szolgáltatás-logikákat írja le (pl. tarifák, aggregáció, ösztönzők, célzott programok).
3	Szükséges intézményi keret	A szabályozási és intézményi feltételek meghatározását, valamint a felelősségi és elszámolási struktúrák kialakítását jelöli.
4	Rendszerszintű kiterjesztés	A skálázáshoz és interoperabilitáshoz kötődő, hálózati és piaci integrációt biztosító megoldásokat foglalja össze.

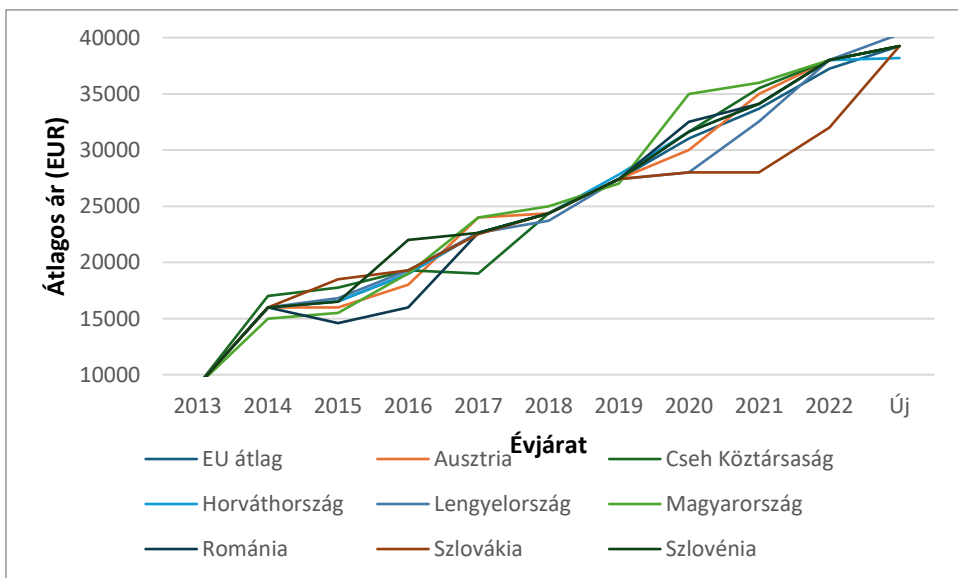
F9. táblázat A kapulógika tartalmi definíciói Forrás: saját szerkesztés

Csoport	Paraméter	Jelölés	Érték			Egység
			Alap	Min	Max	
Igény	Összes tárolási teljesítményigény 2030	P_total_2030	187			GW
	Rövidtávú tárolási csomag 2030	P_short_2030	67			GW
	Szivattyús-tározós energiatárolás 2030 (PHS)	P_PHS_2030	65			GW
	Kétirányú konverziós energiatárolás 2030 (P2X2P)	P_P2X2P_2030	55			GW
V2G	Jármű-hálózat hozzájárulás 2030 (V2G)	P_V2G_2030	33			GW
	V2G-részarány a rövidtávú csomagon belül (V2G share)	s_V2G	0,4	0,3	0,5	-
Átváltás	Rövidtávú tárolás névleges kisütési ideje	h_short	2	1	4	h
	Rendszerszintű kiváltási tényező	alpha	1	0,7	1	-
Emisszió	BESS gyártási CI – alsó (BESS CI min)	EF_batt_min	75	61	100	kgCO ₂ e/kWh
	BESS gyártási CI – felső (BESS CI max)	EF_batt_max	100	75	106	kgCO ₂ e/kWh
	BESS gyártási CI – közép (BESS CI mid)	CI_storage_mid	87,5	75	100	kgCO ₂ e/kWh
Üzemeltetés	Csúcserőművi üzemeltetési CO ₂ -megtakarítás/év – alsó (OPS min)	CO ₂ _op_min	8			Mt CO ₂ /év
	Csúcserőművi üzemeltetési CO ₂ -megtakarítás/év – felső (OPS max)	CO ₂ _op_max	10			Mt CO ₂ /év
	Kumulációs időtáv (Y)	Y	6	1	10	év

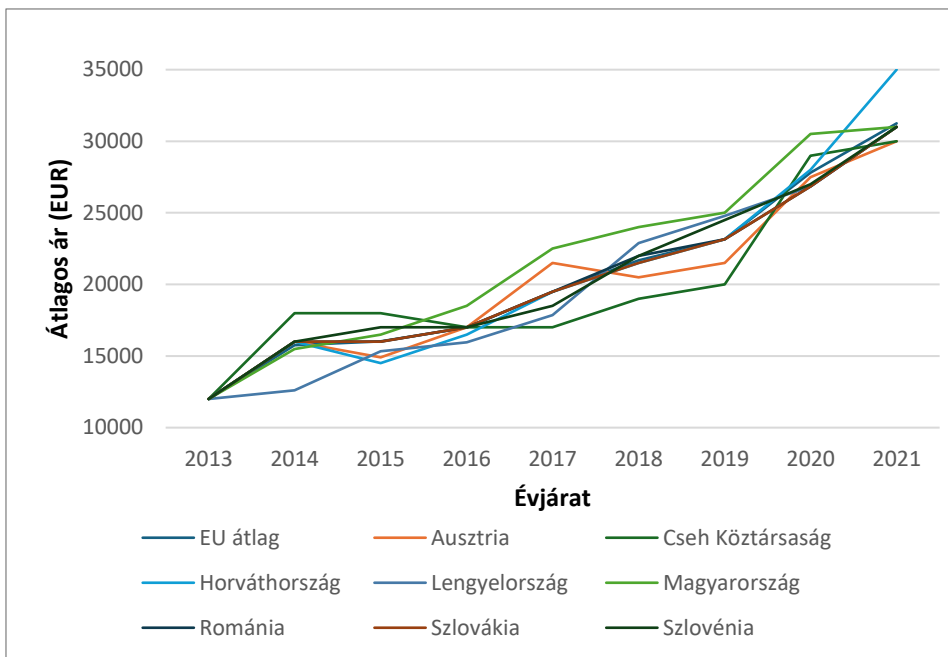
F10. táblázat Az EU 2030-as tárolási teljesítményigényének és összetételének bemeneti paraméterei a V2G-szenáriós számításokhoz Forrás: saját szerkesztés (European Association for Storage of Energy (EASE), 2022; N. Hill és mtsai., 2019) adatok alapján. Forrás: saját szerkesztés



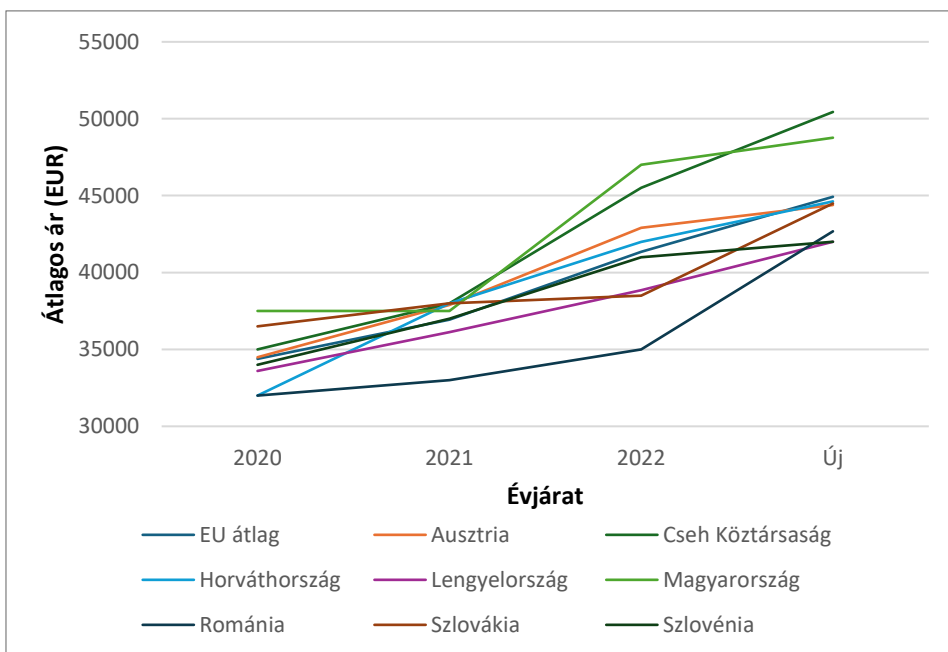
F1. ábra Volkswagen Golf TSI modellek átlagára évjáratonként a közép-európai régióban
 Forrás: Horváth Gábor és szerzőtársai, nem publikált ábra (belső szerkesztés); a kapcsolódó eredmények publikált formában:(Horváth és mtsai., 2023) Forrás: saját szerkesztés



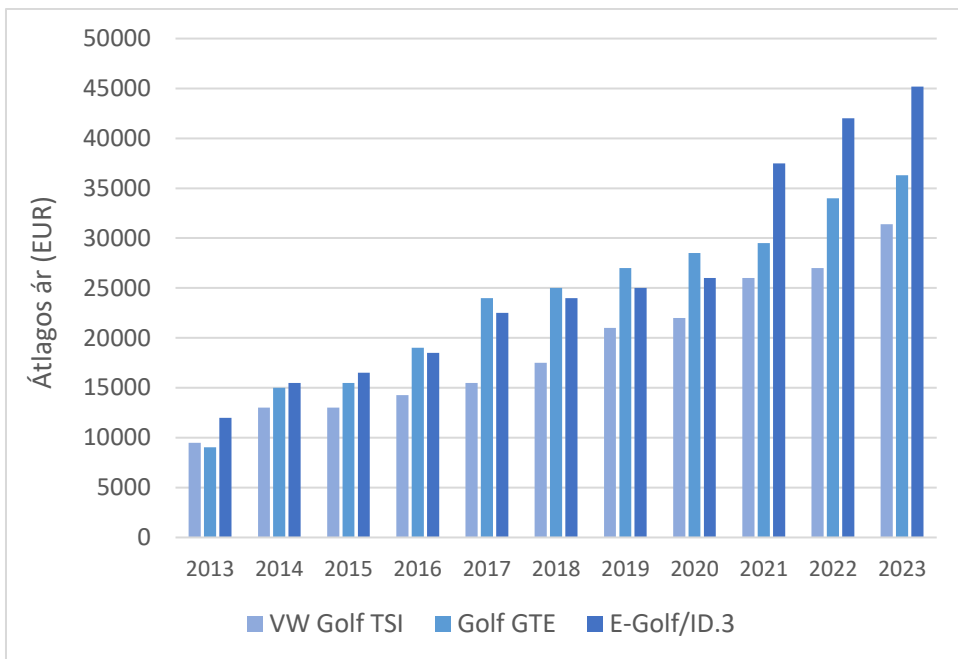
F2. ábra Volkswagen Golf GTE modellek átlagára évjáratonként a közép-európai régióban
 Forrás: Horváth Gábor és szerzőtársai, nem publikált ábra (belső szerkesztés); a kapcsolódó eredmények publikált formában:(Horváth és mtsai., 2023) Forrás: saját szerkesztés



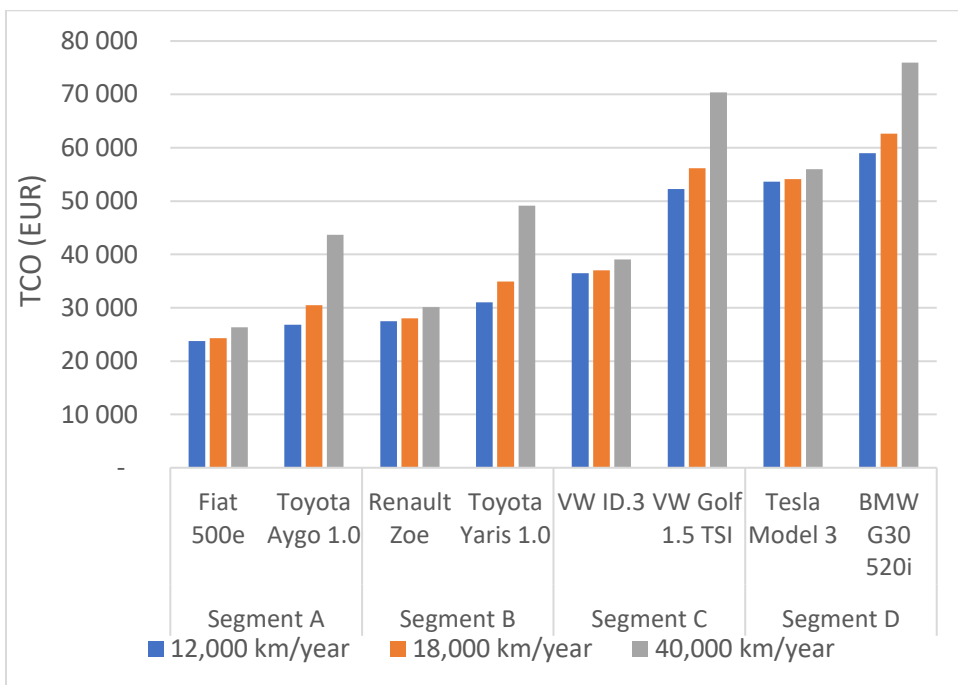
F3. ábra Volkswagen E-Golf modellek átlagára évjáratonként a közép-európai régióban
 Forrás: Horváth Gábor és szerzőtársai, nem publikált ábra (belső szerkesztés); a kapcsolódó eredmények publikált formában: (Horváth és mtsai., 2023) Forrás: saját szerkesztés



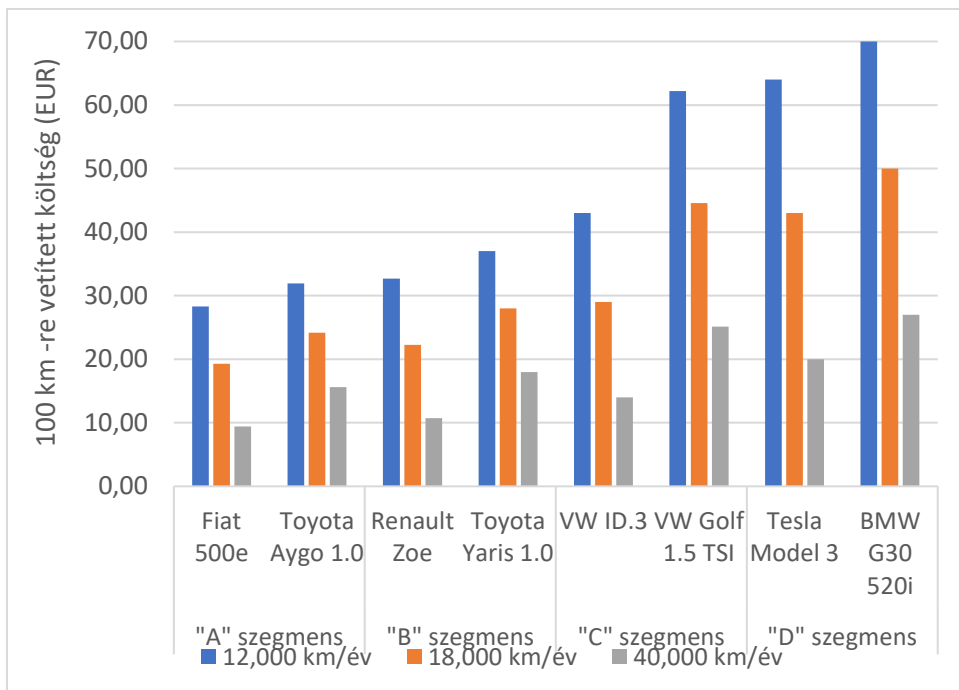
F4. ábra Volkswagen ID.3 modellek átlagára évjáratonként a közép-európai régióban
 Forrás: Horváth Gábor és szerzőtársai, nem publikált ábra (belső szerkesztés); a kapcsolódó eredmények publikált formában: (Horváth és mtsai., 2023) Forrás: saját szerkesztés



F5. ábra Volkswagen E-Golf/ID.3, Golf GTE és Golf TSI modellek árainak idősoros változása Magyarországon (EUR) Forrás: (Horváth és mtsai., 2023)



F6. ábra Teljes felhasználói költség 7 évre vetítve szegmensenként Magyarországon (EUR) Forrás: (Horváth és mtsai., 2023)



F7. ábra 100 km megtételének költségvonzata 7 éves futamidő esetén Magyarországon (EUR)
Forrás: (Horváth és mtsai., 2023)

Autó típus	EV-ICE árkülönbség (EUR)
Fiat vs Aygo	12626
Zoe vs Yaris	13346
ID3 vs Golf	-5381
Tesla vs BMW	2759

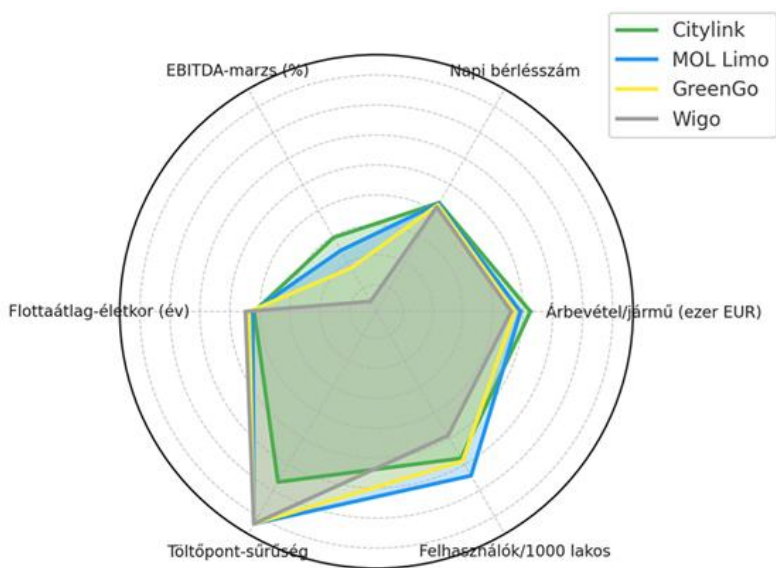
F11. táblázat EV-ICE beszerzési árkülönbség a vizsgált modellpárok esetében (EUR)
Forrás: a kapcsolódó eredmények publikált formában: (Horváth és mtsai., 2023)

Autó típus	EV-ICE üzemeltetési költség (EUR)		
	12 000 km	18 000 km	40 000 km
Fiat vs Aygo	3087	6145	17354
Zoe vs Yaris	3547	6871	19056
ID3 vs Golf	15781	19117	31343
Tesla vs BMW	5329	8476	20010

F12. táblázat EV-ICE Üzemeltetési költségkülönbség a vizsgált modellpárok esetében (EUR)
Forrás: a kapcsolódó eredmények publikált formában: (Horváth és mtsai., 2023)

Autó típus	EV-ICE amortizáció (%)		
	12 000 km	18 000 km	40 000 km
Fiat vs Aygo	10.6	21.1	59.7
Zoe vs Yaris	10.6	20.4	56.7
ID3 vs Golf	39.8	48.3	52.1
Tesla vs BMW	9.8	15.7	36.9

F13. táblázat EV-ICE amortizációs különbség éves futásteljesítmény szerint (%)
 Forrás: a kapcsolódó eredmények publikált formában: (Horváth és mtsai., 2023)



F8. ábra Standardizált KPI-k radar diagramja – szolgáltatói összehasonlítás közép-európai e-carsharing piacon. Forrás: saját számítás és szerkesztés.

Mutató	Definíció	Normalizálás	Indoklás
Árbevétel/jármű	éves nettó árbevétel flotta-	ezer EUR/jármű	jövedelemtermelő képesség
EBITDA-margin	EBITDA / árbevétel	%	üzemi hatékonyság
Kihasznátság	átlagos napi bérletek / jármű	db/nap	kapacitás- utilizáció
Flottaátlag-életkor	súlyozott átlag (év)	év	amortizációs nyomás
Töltőpont-sűrűség	publikus AC/DC töltők / 100	db/100 km ²	infrastruktúra- hozzáférés
Felhasználószám	regisztrált ügyfelek / 1000 lakos	fő/1000	piaci penetráció

F14. táblázat A benchmarkingban alkalmazott mutatók definíciója, mértékegysége és normalizálása. Forrás: saját szerkesztés

Szolgáltató	Citylink	MOL Limo	GreenGo	Wigo
Árbevétel/jármű (eEUR)	12,5	9,2	7,3	6,1
Napi bérlésszám (db/jármű/nap)	3.0	2.7	2.2	1.4
EBITDA-marzs (%)	-10.4	-15.3	-22.1	-35.0
Flottaátlag-életkor (év)	1,9	2,4	3,6	4,8
Töltőpont-sűrűség (db/100 km ²)	26.75	42.86	42.86	42.86
Felhasználók/1000 lakos	17.6	24.3	18.7	8.9

F15. táblázat Benchmark KPI-k szolgáltatóként (2023) Forrás saját számítás és szerkesztés.

Szolgáltató	Klaszter típusa	Jellemző kihasználtság	Flottaátlag-életkor (év)	EBITDA-marzs (%)
Citylink	Skálázható – hálózatvezérelt	3.0	1,9	-10.4
MOL Limo	Skálázható – hálózatvezérelt	2.7	2,4	-15.3
GreenGo	Niche – amortizáció-érzékeny	2.2	3,6	-22.1
Wigo	Niche – amortizáció-érzékeny	1.4	4,8	-35.0

F16. táblázat Klaszterbesorolás és jellemző paraméterek a vizsgált szolgáltatóknál (2023).
Forrás saját számítás és szerkesztés.

Strukturális tényező	Javasolt intézkedés	Elérhető hatékonyság-javulás (%)	Megvalósítási időhorizont
Flottafiatalítás	Fiatalkorú járművek beszerzése 2 éven belül	8	Közép
V2G-integráció	Kétirányú DC-töltők telepítése és V2G-szoftver integrálása	10	Hosszú
Adatmonetizáció	GDPR-kompatibilis adatértékesítési modell	4	Rövid
Dinamikus tarifarendszer	Keresletalapú percdíj dinamikusan beállítása	6	Rövid

F17. táblázat Beavatkozási javaslatok a gazdasági fenntarthatóság javítására (hatás és időhorizont)
Forrás saját számítás és szerkesztés.

Z-score paraméterek (EU27)		Z-score kvartilis küszöbök (Q1=25%, Q3=75%)	
μ_{EV}	17,3333	EV_z_Q1	-0,762896739
σ_{EV}	14,9867	EV_z_Q3	0,631669603
μ_{CI}	188,67	CI_z_Q1	-0,586837936
σ_{CI}	217,727	CI_z_Q3	0,105313748
μ_C	58	C_z_Q1	-0,667220015
σ_C	24,6545	C_z_Q3	0,764565185

F18. táblázat A z-score standardizálás paraméterei és a kvartilis-alapú küszöbértékek
Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján

Ország	Többségi klaszter	Z-score	Min-max normalizálás	Rangsorolás
Hollandia	Fejlett	1,678	0,750	2
Svédország		1,394	0,736	1
Dánia		1,265	0,681	3
Belgium		0,940	0,582	7
Finnország		0,879	0,593	4
Ausztria		0,705	0,530	9
Franciaország		0,643	0,517	8
Luxemburg	Gyorsan fejlődő	0,458	0,459	6
Portugália		0,324	0,437	10
Németország		0,284	0,429	5
Szlovénia		0,061	0,362	13
Spanyolország		-0,230	0,287	12
Szlovákia	Magas potenciál	-0,218	0,288	19
Horvátország		-0,262	0,274	21
Magyarország		-0,361	0,253	14
Lettország		-0,408	0,236	18
Írország		-0,450	0,235	11
Olaszország		-0,544	0,201	15
Észtország		-0,546	0,201	16
Ciprus		-0,691	0,163	26
Görögország	Feltörekvő	-0,478	0,220	20
Csehország		-0,540	0,203	22
Románia		-0,570	0,196	24
Litvánia		-0,691	0,163	17
Bulgária		-0,812	0,130	25
Málta		-0,869	0,117	27
Lengyelország		-0,962	0,092	23

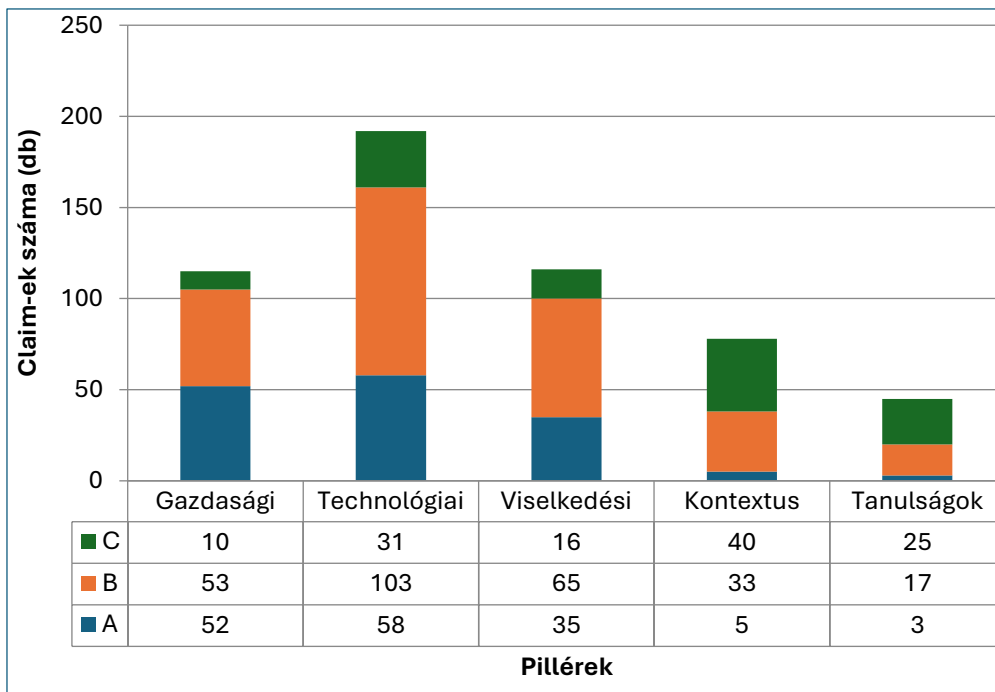
F19. táblázat Klaszterezési eredmények összesítése: z-score, min-max és rangsor alapú mutatók, többségi klaszterrel (EU27) Forrás: saját szerkesztés (Máthé és mtsai., 2025) alapján

ICEV referencia	130	Relatív BEV üzemeltetési CO ₂ -kibocsátás (ICEV = 100%; 130 g/km referencia) [%]																	
		Hálózati CO ₂ -intenzitás (g/kWh)		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Svédország	15	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Finnország	45	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10	10	10
Franciaország	52	6	6	6	7	7	8	8	8	9	9	10	10	10	11	11	12	12	12
Dánia	98	11	11	12	13	14	14	15	16	17	17	18	19	20	20	21	22	23	23
Portugália	101	11	12	12	13	14	15	16	16	17	18	19	19	20	21	22	23	23	23
Észtország	102	11	12	13	13	14	15	16	16	17	18	19	20	20	21	22	23	24	24
Lettország	105	11	12	13	14	15	15	16	17	18	19	19	20	21	22	23	23	24	24
Ausztria	114	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25	25	26	26
Horvátország	131	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	30
Szlovákia	135	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	31
Spanyolország	138	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31	32	32
Litvánia	145	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	30	31	32	33	33
Belgium	168	18	19	21	22	23	25	26	27	28	30	31	32	34	35	36	37	39	39
Szlovénia	215	23	25	26	28	30	31	33	35	36	38	40	41	43	45	46	48	50	50
Magyarország	221	24	26	27	29	31	32	34	36	37	39	41	43	44	46	48	49	51	51
Románia	225	24	26	28	29	31	33	35	36	38	40	42	43	45	47	48	50	52	52
Írország	260	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58	60	60
Olaszország	265	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	61
Luxemburg	285	31	33	35	37	39	42	44	46	48	50	53	55	57	59	61	64	66	66
Bulgária	291	31	34	36	38	40	43	45	47	49	51	54	56	58	60	63	65	67	67
Hollandia	298	32	34	37	39	41	44	46	48	50	53	55	57	60	62	64	66	69	69
Németország	310	33	36	38	41	43	45	48	50	52	55	57	60	62	64	67	69	72	72
Csehország	335	36	39	41	44	46	49	52	54	57	59	62	64	67	70	72	75	77	77
Görögország	339	37	39	42	44	47	50	52	55	57	60	63	65	68	70	73	76	78	78
Málta	341	37	39	42	45	47	50	52	55	58	60	63	66	68	71	73	76	79	79
Ciprus	575	62	66	71	75	80	84	88	93	97	102	106	111	115	119	124	128	133	133
Lengyelország	589	63	68	72	77	82	86	91	95	100	104	109	113	118	122	127	131	136	136

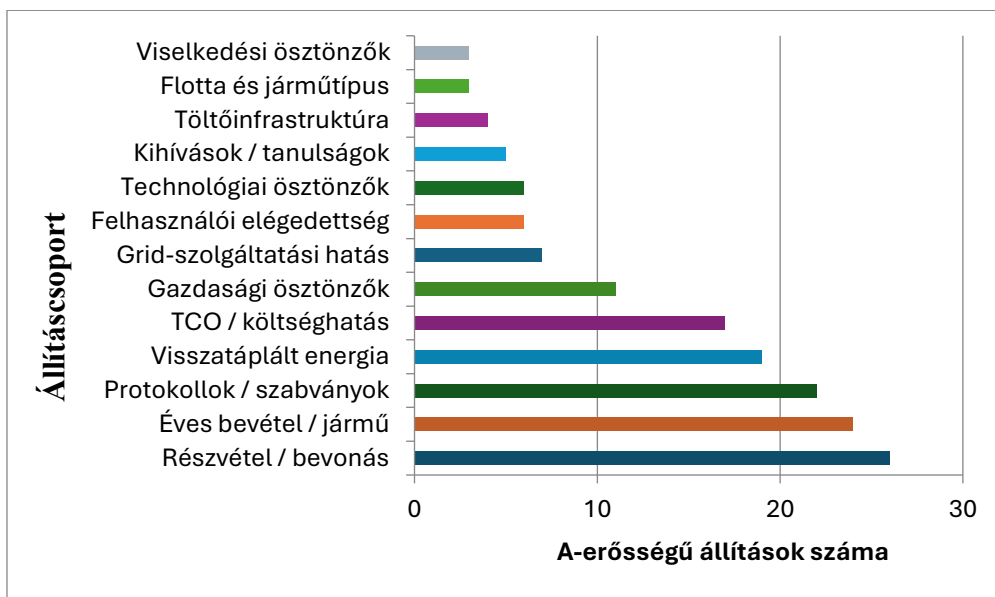
F20. táblázat Relatív BEV üzemeltetési CO₂-kibocsátás az ICEV-referenciához viszonyítva (ICEV = 100%; 130 g/km) [%] Forrás saját számítás és szerkesztés.

Dimenzió	Indikátor neve	Mértékegység	Eredmény / tartomány
Gazdasági hatások	PFR bevételi potenciál (felhasználói oldal) Primer frekvenciaszabályozási szolgáltatás	€/jármű/év	≈ 1000–1800
	Kiegyenítési költségváltozás (rendszeroldal) Rövidtávú kiegyenlítés költségproxyja; szcenárió-kompatibilis becslés	€/MWh	≈ -4...-5
	Hálózatfejlesztés halasztási potenciál Csúcsterhelés mérséklésén keresztül jelentkező beruházás-átütemezési hatás	—	kvalitatív
Hálózati stabilitás és rugalmasság	Feszültségingadozás amplitúdója (ΔV) Kritikus szakaszokon várható mérséklődés kétirányú üzem mellett	%	≈ -3...-4
	Csúcsterhelés változása Városi/elővárosi terhelési csomópontokban értelmezett csúcs-csökkenés	%	≈ -15...-20
	Rugalmassági index változása Szabályozható kapacitás arányának javulása V2G-részvétel mellett	%	≈ +25...+35
Energia- és klímahatások	CO ₂ -intenzitás változása Fosszilis kiegyenlítő termelés visszaszorulásán keresztül	%	≈ -20...-25
	CO ₂ -intenzitás példaérték Szemléltető nagyságrend a vizsgált szcenáriókhoz illesztve	gCO ₂ /kWh	380 → 295
	RES-kihasználtság változása Kényszerű leterhelés mérséklése; napközbeni többlet átcsoportosítása az esti csúcsra	%	≈ +15...+20
Technológiai, műszaki következmények	Akkumulátor-degradáció (üzemviteli hatás) Korlátos vezérlés mellett kontrollálható; nem szükségszerűen romló	—	kvalitatív
	Bidirekcionális töltők kihasználtsága Kihasználtság növekedése javíthatja a költség-haszon viszonyt	—	kvalitatív
	Decentralizált tárolókapacitás skálázhatósága Flottaszintű aggregációval növelhető rugalmas tárolókapacitás	—	kvalitatív

F21. táblázat V2G-hatások indikátormátrixa (becsült, szcenáriófüggő tartományok)
Forrás: saját szerkesztés és számítás.



F9. ábra Állítások evidencia-erősség szerinti megoszlása pillérenként
 Forrás: saját szerkesztés és számítás



F10. ábra A-erősségű állítások állításcsoportonként Forrás: saját szerkesztés és számítás

Szenárió	V2G nélkül	10%	20%	30%
14 000 km/év; 18 kWh/100 km	19,2	28,2	37,2	46,3
14 000 km/év; 21 kWh/100 km	22,4	31,4	40,4	49,4
18 000 km/év; 18 kWh/100 km	24,7	33,7	42,7	51,7
18 000 km/év; 21 kWh/100 km	28,8	37,8	46,8	55,8

Szenárió	V2G nélkül	40%	50%	60%
14 000 km/év; 18 kWh/100 km	19,2	55,3	64,3	73,3
14 000 km/év; 21 kWh/100 km	22,4	58,5	67,5	76,5
18 000 km/év; 18 kWh/100 km	24,7	60,8	69,8	78,8
18 000 km/év; 21 kWh/100 km	28,8	64,9	73,9	82,9

F22. táblázat Napi akkumulátor-kihasználtság becült értékei V2G SoC-ablak szerint (%)
 Forrás: saját szerkesztés és számítás

Szenárió	V2G nélkül	10%	20%	30%
14 000 km/év; 18 kWh/100 km	198	133	100	80
14 000 km/év; 21 kWh/100 km	170	119	92	75
18 000 km/év; 18 kWh/100 km	154	111	87	72
18 000 km/év; 21 kWh/100 km	132	99	80	66

Szenárió	V2G nélkül	40%	50%	60%
14 000 km/év; 18 kWh/100 km	198	67	57	50
14 000 km/év; 21 kWh/100 km	170	63	54	48
18 000 km/év; 18 kWh/100 km	154	61	53	47
18 000 km/év; 21 kWh/100 km	132	57	50	44

F23. táblázat Akkumulátor LC-CO₂ (gCO₂/kWh) becült értékei V2G SoC-ablak szerint
 Forrás: saját szerkesztés és számítás