

MISKOLCI EGYETEM  
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**Adatvezérelt közösségi autóbuszközlekedés komplex logisztikai rendszerének fejlesztése az elektrifikáció és dekarbonizáció figyelembevételével**

**Ph.D. értekezés**

Készítette:

**Kruchina Vince**

okleveles közgazdász, okleveles energetikai szakközgazdász

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola  
Anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerület

Logisztikai Intézet

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

**Prof. Dr. habil. Szigeti Jenő**

egyetemi tanár

TÉMATERÜLET VEZETŐ

**Prof. Dr. habil. Illés Béla**

egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ

**Prof. Dr. habil. Illés Béla**

egyetemi tanár

TÁRSTÉMAVEZETŐ

**Prof. Dr. habil. Tamás Péter**

intézetigazgató, egyetemi tanár

**2024.09.12. V.5-K3 új: munkahelyi vitára készülő verzió, formázásra!**

**NYILATKOZAT**

Alulírott **Kruchina Vince** kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem. A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv a későbbiekben, a Miskolci Egyetem Dékáni Hivatalában lesz elérhető.

Miskolc, 2024.xx.xx.

-----  
Kruchina Vince

**KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik támogatásukkal, biztatásukkal hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez.

Az értekezés a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézetében készült a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola képzésének keretein belül. Először is szeretnék köszönetet mondani **Prof. Dr. habil. Illés Béla** és **Prof. Dr. habil. Tamás Péter** tudományos vezetőimnek, hogy szakmai irányításukkal, segítőkész munkájukkal és támogatásukkal segítették munkám elkészültét.

Külön köszönettel tartozom **Prof. h. c. Dr. Sárközi György Tibornak** -aki mind szakmailag, mind emberileg példakép a hazai közösségi közlekedésben dolgozó szakemberek számára - a disszertáció elkészítése kapcsán a szakterületükhöz kapcsolódó építő jellegű javaslataiért.

Köszönet illeti **Prof. Dr. Szigeti Jenő** professzor urat, aki a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola vezetőjeként támogatta munkámat, hasznos tanácsával és szakmai irányításával segítette előrehaladásomat.

Köszönöm a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézet valamennyi kollégájának, akik a szakmai és erkölcsi támogatásukkal lehetővé tették dolgozatom megírását.

Hálás vagyok Homonnai Emesének, a Gépészmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatala dolgozójának, aki segítségemre volt valamennyi adminisztratív ügyem intézésében a doktori képzésem és a kutatásaim folyamán egyaránt.

Köszönettel tartozom továbbá Feleségemnek, két gyermekemnek és a Volánbusz Zrt.-nél dolgozó kollégáimnak türelmükért és a biztatásukért, melyről munkám során folyamatosan biztosítottak és végig mellettem álltak.

## TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

## **Ajánlás Kruchina Vince „Adatvezérelt közösségi autóbuszközlekedés komplex logisztikai rendszerének fejlesztése az elektrifikáció és dekarbonizáció figyelembevételével” c. Ph.D. értekezéséhez**

Kruchina Vince a Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola Anyagáramlási rendszerek és logisztikai Informatika tématerületéhez kapcsolódóan 2023-ban kezdte el Ph.D. tanulmányait.

A kutatási téma kijelölésénél fontos tényező volt, hogy a jelölt 2022-től kezdődően releváns tapasztalatot szerzett a közlekedési logisztika területén az általa irányított menetrendszerinti közúti személyszállító vállalkozás irányítása során, és ez alapvetően meghatározta a lehetséges kutatási területek körvonalazásához.

A téma kutatása során elért eredményeit számos hazai és nemzetközi konferencián, valamint rangos nemzetközi folyóiratokban ismertette, a kutatási irányokat pedig a szisztematikus irodalomkutatás módszerével jelölte ki.

Kruchina Vince különösen az ipari kutatási feladatok ellátása tekintetében mutatott jelentős érdeklődést, motivációt, valamint feladatait nagy munkabírással, pedantériával látta el. A tudományos irányvonal már a kezdetektől felkeltette érdeklődését, melynek eredményeként egy színvonalas Ph.D. dolgozat került összeállításra.

A dolgozat Kruchina Vince kutatási eredményeit foglalja össze, mely alapján a jelölt részére a Ph.D. cím odaítélését messzemenően támogatjuk.

Prof. Dr. habil. Illés Béla  
egyetemi tanár

Prof. Dr. habil. Tamás Péter  
intézetigazgató egyetemi tanár

## **Tartalom**

1	A tématerület vizsgálatának gazdasági- és tudományos aktualitása .....	7
2	Szakirodalmi áttekintés és célkitűzés .....	9

2.1	A szakirodalmi áttekintés módszertana .....	9
2.2	Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításban .....	10
2.2.1	A villanybuszok elterjedése: előnyök és kockázatok.....	10
2.2.2	Vegyes autóbuszflották.....	12
2.2.3	Üzemeltetési modellek és koncepciók.....	13
2.3	Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos üzemeltetési és fenntarthatósági kérdések kezelése .....	14
2.3.1	Az akkumulátorok töltése, kisülése.....	15
2.3.2	Az akkumulátorok kifáradásával (degradációjával) és életciklusával összefüggő szakirodalom.....	19
2.3.3	Az akkumulátorok második élete, a visszautas logisztika szerepe.....	22
2.4	A teljes tulajdonsági költség szerepe.....	26
2.5	Az elektrifikációs és dekarbonizáció energetikai összefüggései .....	29
3	A kutatási tevékenység áttekintése, a disszertáció célkitűzései, módszertana .....	32
4	Az innovatív működési modell bemutatás.....	34
4.1	Módszertan.....	34
4.1.1	A rendszer modell logisztikai értelmezése.....	35
4.1.2	A logisztikai rendszer határai, alkalmazási területe .....	35
4.1.3	Logisztikai folyamatok és entitások .....	36
4.1.4	Információs folyamat és entitásai .....	39
4.2	Az üzemeltetési rendszer holisztikus modellje .....	44
5	Autóbuszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntés modell és módszer kidolgozása .....	46
5.1	A tesztelhető rendszerváltozatok leírása .....	46
5.2	A döntéshozatali módszer ismertetése.....	47
5.2.1	A flottahasználat követelményeinek meghatározása.....	47
5.2.2	A megvásárlandó járművek számának meghatározása .....	47
5.2.3	A vizsgálandó járműtípusok meghatározása .....	48
5.2.4	A döntési kritériumok meghatározása .....	48
5.3	Esettanulmány: A döntéshozatali módszer alkalmazása a Volánbusz Zrt.-nél.....	50
5.4	Az esettanulmány kapcsán levonható következtetések.....	51
6	Elektromos autóbuszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában innovatív újrahajnosítási modellek feltárása .....	52
6.1	Akkumulátor technológiák, életciklus és ár összehasonlítás .....	54
6.2	Az akkumulátorok töltésének illesztése a fordaszerkezetbe .....	56
6.3	Az akkumulátorok degradációja.....	58

6.4	A lítium-ion akkumulátorok degradációjának mérésével kapcsolatos nemzetközi tapasztalatok	<b>59</b>
6.5	A degradációra vonatkozó saját mérések és megállapítások.....	<b>60</b>
6.6	A visszautas logisztika szerepe elektromos járművek akkumulátorainak második életciklusában.....	<b>63</b>
6.7	Az akkumulátorok degradációjának nyomonkövetésén alapuló üzemeltetési modell .....	<b>64</b>
7	Összefoglalás.....	<b>67</b>
7.1	A tézisek tudományos és gyakorlati megalapozottsága.....	<b>67</b>
7.2	További kutatási irányok: .....	<b>68</b>
8	IRODALOMJEGYZÉK.....	<b>69</b>
8.1	Értekezés témakörében használt saját publikációk.....	<b>69</b>
8.2	Értekezés témakörében használt idegen publikációk.....	<b>70</b>
9	Mellékletek.....	<b>78</b>
9.1	Melléklet: Az elektromos autóbuszok üzemeltetésének gazdasági lehetőségei a Volánbusz Zrt.-nél	<b>78</b>
9.2	Melléklet: Az elektromos töltőből kinyert adatok. ....	<b>89</b>
9.3	Melléklet: Az elektromos autókból kinyert adatok .....	<b>90</b>
9.4	Melléklet: Az 1. Akkumulátor állapotfelmérési jelentés .....	<b>91</b>
9.5	Melléklet: A 2. Akkumulátor állapotfelmérési jelentés.....	<b>100</b>
9.6	Melléklet: Elektromos járművek optimális akkumulátorméretének meghatározása és esettanulmánya .....	<b>108</b>
10	Ábrák jegyzéke.....	<b>113</b>
11	Táblázatok jegyzéke .....	<b>116</b>
12	Rövidítések jegyzéke.....	<b>117</b>

# 1 A tématerület vizsgálatának gazdasági- és tudományos aktualitása

A disszertáció időszerűségét és a téma indokoltságát elsősorban a világméretű energiaválság és az Európai Unióban meghatározott klímapolitikai célok elérésének szükségszerűsége adja. A 2.5 fejezet részletesen elemzi a dekarbonizáció és az energiaellátás összefüggéseit. Az alternatív technológiák alkalmazása a közlekedésben is elengedhetetlenné vált, hiszen az energiaellátás biztosítása, valamint a már említett Európai Unió célok [1] elérése nem válik valósággá hazánkban.

Az energiaellátás biztosítására, valamint az uniós klímapolitikai céloknak, illetve a magyar előírásoknak való megfelelés érdekében energiában szűkölködő hazánk számára elengedhetetlen az alternatív technológiák alkalmazása. A technológia fejlődésének köszönhetően az elektromos autóbuszok munkába állítása a közösségi közlekedésben napjainkban már nem csupán a tervezőasztalokra megálmodott mérnöki hóbort, 2023-ban ez már maga a beteljesedett valóság. [P/1]

Az autóbuszos közösségi közlekedés operátorai szerte a világon (Senzen városától Philadelphian vagy Izmiren át Delhiig) egyre nagyobb számban használnak elektromos meghajtású buszokat. Választásukat nem csupán a zöld átmenet támogatása vagy a közlekedési alapzaj csökkentése indokolja: tisztán gazdasági számítások is alátámasztják a technológiaváltás szükségességét. Különösen igaz ez ott, ahol az energiaszükséglet rendkívül importigényes. Az elmúlt évek energiakrízise rámutatott arra a talán közhelynek tűnő, de annál lényegesebb megállapításra, hogy az az ország lehet gazdaságilag sikeres és stabil, amely képes a saját energia-szükségletét előállítani, gazdasági szerkezetét pedig úgy átalakítani, hogy energiainportjának mértéke a lehető legkisebb legyen.

A XXI. század hajnalán kibontakozó akkumulátor-technológiai forradalom alapjaiban alakítja át az autó- és buszgyártást. A fosszilis energiahordozókban szűkölködő országok, köztük hazánk is az elektrifikációnak köszönhetően szignifikánsan csökkenthetik energiainport-igényüket, egyúttal növelhetik gazdasági stabilitásukat és függetlenségüket.

Jelen dolgozatban Európa egyik legnagyobb autóbuszos operátorára, a Volánbusz Zrt.-re modellezve egy olyan komplex megoldást mutatok be, amellyel jelentősen csökkenthető a károsanyag kibocsátást oly módon, hogy gazdaságilag is fenntartható legyen, elérhető a lokálisan zéró kibocsátás. A jelenleg több mint 5700 db belsőégésű motorral működő autóbusz és 100 db elektromos autóbusz historikus üzemeltetési adatait alapul véve, a nemzetközi szakirodalomra támaszkodva végeztem méréseket. A modell megalkotásához elengedhetetlen volt az akkumulátorok műszaki paramétereinek, a degradáció görbéinek, de éppúgy a másodlagos felhasználás (körforgásos gazdaság ernyője alatti) lehetőségeinek vizsgálata. Mindemellett figyelembe vettem az autóbuszok napi futásteljesítményeit is. A lokálisan zéró emisszió elérése nagy kihívás, amelynek érdekében egy rendkívül komplex, egymástól eddig elszigetelt részekből álló rendszert kell integrálni. Ebben a komplex rendszerben kell megoldást találni a napi futásteljesítmények optimalizálására, az akkumulátorok másodlagos felhasználásának vállalaton belüli formáira, ahogy arra is, hogy mekkora napelem-kapacitást kell telepíteni az elektromos autóbuszflotta működtetéséhez szükséges áram előállításához. További kérdés, hogy milyen irányítási rendszert kell kifejleszteni ahhoz, hogy az autóbuszokban fel nem használt energiát vissza lehessen termelni a hálózatba (vehicle to grid).

A disszertációban a Volánbusz Zrt. példáján keresztül bemutatom, hogy az autóbuszos közösségi közlekedésben nem önmagában kell vizsgálni az alternatív meghajtású buszok üzembe helyezését. Komplex rendszerként kell ugyanis kezelni a cél eléréséhez vezető utat. E komplexitásból fakadóan pedig elengedhetetlen egy szofisztikált logisztikai, matematikai-informatikai modell és

ennek irányítástechnika megalkotása, amelynek segítségével az operátor folyamatosan a leoptimalisabb működést tudja biztosítani a vállalat számára. **Az optimalizációt a már említett, lokálisan teljesen karbonsemleges üzemelés elérése jelenti, amely mind műszakilag, társadalmilag, mind gazdaságilag hasznos a vállalatnak.** A megfogalmazott célok eléréséhez szükséges, önmagukban is bonyolult rendszerek összekapcsolását meglátásom szerint az Ipar 4.0 módszertanával lehet megvalósítani.

A komplex rendszer kifejlesztésére ható számos olyan tényező hat, amelyet az optimális megoldás érdekében célszerű szem előtt tartani. Ezek a rendszerfejlesztés során figyelembe veendő területek a következők:

1. Az Európai Unió vonatkozó jogi szabályai és irányelvei [1], illetve a hazai jogszabályok [2], [P2]
2. A közlekedési szolgáltatások gazdaságilag hatékony és versenyképes működésére vonatkozó tulajdonosi elvárások [3]
3. A korszerű, diszruptív technológiák bevezetésének szükségessége, alkalmazása [4 ], [5], [6], [P2]
4. Energiahatékonysági, energiatartó és energiabiztonsági elvárások [7], [8], [9],
5. Környezettudatos és fenntartható működési mód [10], [11],
6. A demográfiai és életmód változások hatása a közlekedési szolgáltatók működésére [12]

Ezek a hatások egymással is szoros korrelációban vannak, ezért a rendszer kifejlesztése során fokozottan kell támaszkodni azokra a korszerű technológiai megoldásokra, amelyek az egyes hatótényezőket a rendszer optimális és hatékony működése érdekében összehangolják. A disszertációban az alábbiak alkalmazása biztosítja ezen elvárás teljesülését:

1. Ipar 4.1 módszertan
2. Körkörös gazdasági modell
3. Adatvezérelt folyamatok

A disszertáció 2. fejezetében bemutatom a tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatásom módszertanát és áttekintést adok a releváns kutatási eredményekről, megoldásokról. A 3. fejezetben ismertetem a kutatási tevékenységem eredményeit, és megfogalmazom a disszertáció célkitűzéseit és módszertanát. A 4., 5. és 6. fejezetben részletesen kifejtem a célkitűzéseknek megfelelő kutatási területekre vonatkozó, a tézisek megalapozását tartalmazó tevékenységem eredményeit, majd megfogalmazom az ezen fejezetekhez kapcsolódó téziseimet.



## 2 Szakirodalmi áttekintés és célkitűzés

Ez fejezet mutatja be a kutatási téma megértéséhez elengedhetetlen tudománytörténeti ismereteket és fogalmakat, terminus technikusokat, valamint teszi megismerhetővé azokat a kutatási irányokat, amelyek egy alapos, a hazai és nemzetközi szakirodalom tematikus feldolgozásán alapuló kutatás alapján kerültek feltárássra, elemzésre, és megalapozták a témakör objektív értékelését, és azok alapján a következtetések levonását.

### 2.1 A szakirodalmi áttekintés módszertana

A szakirodalom áttekintésének célja, hogy a tématerülettel kapcsolatos kulcsfontosságú hazai és nemzetközi megállapításokat, kutatási eredményeket feltárjam, és összegyűjtsem azokat a bizonyítékokat, amelyek az általam feltárt tudományos eredményeket alátámasztják vagy – adott esetben – megcáfolják. Az Európai Unió Exact External Wiki honlapja [12] szerint ennek a megközelítésnek meghatározó lépései a következők:

- Pontos és célratorően megfogalmazott kérdések kidolgozása és a megválaszolása
- Módszertani megközelítés kidolgozása.
- Szisztematikus keretrendszer alkalmazása az érdeklődésre számot tartó irodalom azonosítására és kiválasztására. A bizonyítékok különböző forrásokból (elektronikus/internetes források, nyomtatott források vagy „szürke források”, például kiadatlan anyagok) szolgálhatnak.
- Alkalmazzon szisztematikus keretrendszert az adatok értelmezéséhez és elemzéséhez. A megőrzendő bizonyítékok megkülönböztetése érdekében a kiválasztási kritériumokat minőségi és hitelességi szabványok alapján kell meghatározni.

A világ gazdasági, társadalmi és technológiai működését meghatározó globális hatások, a digitalizáció, a konnektivitás a tudományos szféra számára is megváltoztatták a kutatásokhoz szükséges információk beszerzésének módját. A legfrissebb információk megszerzésének igénye a kutatók figyelmét a tankönyvektől, szakkönyvektől és nyomtatott tudományos szakfolyóiratoktól a digitális tartalmak irányába mozdította el.

*Mengist és szerzőtársai* 2020 -ban egy ilyen módszert mutat be a szisztematikus irodalmi áttekintés (SLR =systematic literature review) elvégzésére. Az SLR egy olyan folyamatként definiálja, amely lehetővé teszi az adott témában előre meghatározott alkalmassági kritériumoknak megfelelő releváns bizonyítékok összegyűjtését, és választ kapni a megfogalmazott kutatási kérdésekre [14]. Az SLR alkalmasságát a kutatók témakör mélyebb feltárássra *Kamarási és Mogyorósy* már 2015-ben megerősítették [15].

A világ gazdasági, társadalmi és technológiai működését meghatározó globális hatások, a digitalizáció, a konnektivitás a tudományos szféra számára is megváltoztatták a kutatásokhoz szükséges információk beszerzésének módját. A legfrissebb információk megszerzésének igénye a kutatók figyelmét a tankönyvektől, szakkönyvektől és nyomtatott tudományos szakfolyóiratoktól a digitális tartalmak irányába mozdította el. Különösen hasznosnak bizonyultak az indexált publikációkat tartalmazó repozitóriumok.

A fentebb ismertetett módszertan alapján az alábbi kutatási területek és azokhoz tartozó kulcsszavakra terjedt ki az SLR:

- Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításban  
*kulcsszavak:* *adoptálás, közlekedés jövője, elektrifikáció, implementálás, vegyes autóbuszflott, közlekedés átalakítása, fordaszerkezet,*
- Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések kezelése  
*kulcsszavak:* *dekarbonizáció, zéró emisszió*
  - o Akkumulátorok kapacitás, töltése és kisülése  
*kulcsszavak:* *akkumulátor menedzsment, feltöltés, kapacitás, lemerülési karakterisztika, részleges feltöltés, stacionárius töltés, töltési igény, töltési infrastruktúra, töltő állomás, szükséglet, power grid,, V2X*
  - o Akkumulátor degradációja  
*kulcsszavak:* *degradáció, kifáradás, állapot, töltöttségi állapot, state-of-charge (SoC) state-of-health (SoH),*
  - o Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban  
*kulcsszavak:* *akkumulátor értéklánc, fordított logisztika, második élet, másodlagos használat,*
- A teljes életciklus költség szerepe  
*kulcsszavak:* *értéksökkenés, élettartam, életciklus, teljes tulajdonlási költség (TCO), CAPEX, OPEX,*
- Az elektrifikációs és dekarbonizáció energetikai összefüggései  
*kulcsszavak:* *energia tárolás, energia tároló (storage), napelem park, zsinór áram, energiabiztonság, megújuló energiaforrások, körkörös energiarendszer, zéró emisszió,*

A 2. fejezet további alfejezeti tartalmazzák az előzőekben meghatározott kutatási területekre kiterjedő tematikus irodalomkutatás során feltárt publikációkból megismerhető eredményeket.

## 2.2 Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításban

Az elektromos járművek, és ezek között az úgynevezett villanybuszok térhódítása a jelentős járműflottát üzemeltető vállalatok számára magával hozta az új technológiát képviselő járműveknek a meglévő flottába történő beillesztésének, integrációjának kérdését.

### 2.2.1 A villanybuszok elterjedése: előnyök és kockázatok

*BORÉN*, 2016-ban publikált cikkében hangsúlyozta, hogy elméleti szempontból az elektromos buszok a városi közlekedésben fenntarthatóbbak és olcsóbbak lehetnek, mint a fosszilis tüzelésű buszok. A szerzők – ekkor még – nem találtak valós üzemeltetési körülmények mellett végrehajtott olyan tesztek, amelyek a szélsőséges, téli időjárási viszonyok között értékeli az elektromos autóbuszok megbízhatóságát a svédországi helyi közlekedésben. Az európai piacon forgalmazott villanybuszokról aktualizált zajmérési adatok pedig szintén nem álltak a rendelkezésre. Ennek az utóvizsgálatnak a célja ezért az volt, hogy valós környezetben teszteljék és igazolják, mennyire energiahatékonyak és csendesek az elektromos buszok.

A valós körülmények közötti autóbusz tesztelés metodikája arra épült, hogy egy szignifikáns tesztidőszak alatt valós információk kerüljenek begyűjtésre az energiafelhasználásával és az érintettek véleményével kapcsolatban.

Az energiafelhasználást befolyásoló tényezőket a szerzők az alábbiak szerint határozták meg:

- topográfia
- a járási autóbussmegállók és más, forgalomszervezéssel összefüggő megállások száma
- városi forgalmi adatok
- az autóbussok átlagsebesség
- utasterhelés
- gépkocsivezető tapasztaltsága
- klíma viszonyok
- külső hőmérséklet

A mérések világossá tették, hogy az elektromos járművek energiafogyasztása és zajszintje alacsony, az utasok, gépkocsivezetők és más érintettek részéről az elfogadottág jó volt a svédországi téli üzemi körülmények között. [16]

*PELLETIER és szerzőtársai* 2019-ben aktuális kérdésként kezelték az autóbuss-flották elektrifikálását, és olyan átmeneteket tartottak célszerűnek, amelyek megszabják, hogy egy adott időszakon belül hány elektromos busznak kell lennie a flottában. Bemutattak egy flottatervezési megoldást, amely lehetővé teszi a szervezetek számára, hogy olyan járműösszetételi tervet határozhassanak meg, amely költséghatékony módon teljesíti flottavillamosítási célokat, figyelembe véve a beszerzési költségeket, az üzemeltetési költségeket, az infrastrukturális beruházások ráfordításait és a keresleti viszonyokat. Számos töltési infrastruktúra opcióval foglalkoztak, mint például a lassú és gyors töltőállomások, a felső áramszedős töltők és az induktív (vezeték nélküli) töltők. A modell alapján elvégzett számítógépes szimulációkat folytatta le több forgatókönyv szerint. Az szolgáltatások megrendeléséért felelős közlekedésszervező ügynökség által szolgáltatott valós adatokat használták fel az optimális átállási terv megvalósítása érdekében. [17]

*LI és szerzőtársai* 2019-ben a világ több nagyvárosában megvizsgálták az elektromos autóbussok adoptálásának megoldásait, és egy összefoglaló, iránymutató jelentést készítettek a városi közlekedésszervező szervezetek és autóbusszt üzemeltető vállalkozások számára. A jelentés kiemeli, hogy „az elektromos buszok (e-buszok) zéró kipufogógáz-kibocsátása és alacsonyabb üzemeltetési költsége segíthet a városokat a helyi zajterhelési és levegőminőségi problémák megoldásában, és csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását. Hangsúlyozzák, hogy az elektromos közlekedés kialakításának számos jelentős kihívását csak gondos tervezéssel és koordinációval lehet megoldani. A jelentés 16 olyan város tapasztalatait és tanulságain alapul, amelyek autóbussos flottáik villamosításán dolgoznak. Fontos háttérinformációkat ad az e-buszokról és elősegíti az elektromos autóbussokkal nyújtott közlekedési szolgáltatások megtervezését és a megvalósítási keretrendszerének kialakítását.” [18]

A *McKinsey Center for Future Mobility* 2021-ben publikált kutatása azt állapítja meg, hogy az elektromos járművek átalakítják az autóiipart, és elősegítik a bolygó szén-dioxid-mentesítését. Ekkor a kínai Shenzhen városának személyszállítását már 16000 teljesen elektromos autóbussból álló flotta látta el. Az elektromos járművek számának növekedése alapján 2030-ra az akkumulátor gyártási kapacitásának 20-szoros növekedését prognosztizálták Európában, és becslésük szerint az iparnak hetente több mint 15 000 töltőt kell telepítenie 2030-ig az Európai Unióban. A szakértők szerint az elektromos töltők elhelyezésének megkönnyítése érdekében egyszerűsített szabályozásra van szükség, mivel jelenleg akár három évig is eltarthat a gyorsöltő állomás hálózatbővítésének engedélyezése. [19]

*AAMODT és szerzőtársai* 2021-ben az Amerikai Egyesült Államokban egy útmutatókiadványt publikáltak az akkumulátoros elektromos autóbuszok buszok flottába integrálásáról, melyben azt hangsúlyozták, hogy ezeknek a járműveknek a használata egyre vonzóbbá válik a kibocsátás és a forgalmi torlódások csökkentésére törekvő városok számára. Arra azonban felhívják a figyelmet, hogy az elektromos autóbuszflotta ugyan olyan előnyökkel járhat, mint például az alacsonyabb üzemanyag- és karbantartási költség, a jobb teljesítmény, az alacsonyabb károsanyag-kibocsátás és az energiabiztonság, viszont a beillesztésükhöz számos kihívást le kell küzdeni. Ide tartoznak az előzetes költségprémiumok, a tervezési feladatok, a hatótávolság és a kapcsolódó technológia ismeretének hiánya. A döntéshozóknak, a közlekedésszervező, a közszolgáltatóknak és más érdekelt feleknek sok mindent meg kell fontolniuk a bevezetése előtt. [20]

*SHAH és szerzőtársai* 2021-ben a nagyvárosokra egyre nagyobb mértékben jellemző levegőszennyezési problémákra tekintettel a városi és elővárosi közlekedési rendszerek fenntarthatóságát az urbanizáció egyik legfontosabb tényezőjének tekintették. A közlekedési rendszer megváltoztatását gondosan és globálisan kell megtervezni a zöld és fenntartható megoldások bevezetésének érdekében. [21]

**A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja az elektrifikáció és dekarbonizáció fontosságát a közlekedési vállalatok számára, és felhívja a figyelmet az innovatív megoldások szükségességére.**

### 2.2.2 Vegyes autóbuszflották

A közúti személyszállításban használt autóbuszok konstrukcióját és gyártási technológiáját meghatározó technológiák változása, a környezetvédelmi előírások fokozatos szigorodása és a utazók igényeinek egyre magasabb szintű kielégítése alapvetően befolyásolja a járműpark összetételét.

Az autóbuszközlekedésben kialakuló vegyes flották meghatározó járműveit a dízel- és gázüzemű járművek alkották, de az utóbbi években a személyszállító vállalkozások egyre nagyobb számban vásároltak elektromos buszokat (villanybusz).

*LI és szerzőtársai* már 2018-ban javasolták, hogy a dízel üzemű autóbuszok által okozott légszennyezési problémák enyhítésére több tiszta energiájú autóbusz kerüljön a vegyes gépjármű flottába. Közülük legtisztábbnak, alacsonyabb károsanyag-kibocsátásúnak az elektromos buszt ismerték el. A cikkben azonban -ekkor - az elektromos buszok alkalmazásának lényeges korlátját látták azok rövid hatótávolságában és hosszú töltési idejében. A szerzők ebben a cikkben a hátralévő élettartam többlethaszon-költség (RLABC) megközelítésére alapozva egy új élettartamú járulékos haszon-költség (NLABC) elnevezésű megközelítést javasolnak a vegyes buszflotta-kezelés (MBFM) probléma megoldására. Négy típusú autóbust, köztük elektromos buszt, sűrített földgázüzemű buszt, hibrid-dízel buszt és dízel buszt vesznek figyelembe, tekintettel azok eltérő üzemeltetési költségeire, a károsanyag-kibocsátás externális költségeire és a beszerzési költségekre. Vizsgálati eredményeik azt mutatják, hogy az autóbusz fordák koordinációjával és a vegyes flotta optimalizálásával összehangolt útvonaltervezés jelentős előnyökkel jár az üzemeltető közlekedési vállalkozás működésében. [22]

*LI és szerzőtársai* 2019-ben írt cikke az elektromos autóbuszok hatótávolságának és töltésének korlátait vizsgálva keres megoldást egy több depóval (MD) és több járműtípussal (MVT) jellemezhető közlekedési rendszer fordaszerkezetére.

Újszerű megközelítést dolgoztak ki a buszforgalom számára megvalósítható idő-tér-energia (TSE) és az idő-tér (TS) hálózat létrehozására, ahol a hatótávolság és az üzemanyag-feltöltés problémái pontosan megoldhatók. Bemutatták a károsanyag-kibocsátással kapcsolatos externális költségeket, és

megvizsgálták az autóbusz-flotta vezénylésével és az üzemanyag-töltő állomások elhelyezésével az üzemeltetők és az utasok számára elérhető minimális teljes rendszerköltséget. A problémát integer lineáris programként (ILP) fogalmazták meg a globális optimális megoldás megtalálásához. A számítási hatékonyság érdekében a TS buszáramlási hálózaton alapuló egyszerűsített formulát dolgoztak ki a nagyobb léptékű problémák kezelésére fókuszáló megoldások érdekében. A módszert a hongkongi buszjáratokra alkalmazták, hogy elemezni tudják a szükséges buszpark méretét, az üzemeltetési költségeket, az utazási költségeket és a több energiaforrást használó buszok által kibocsátási értékeit. [23]

*LEE és szerzőtársai* 2021-ben az optimális autóbuszflotta méretének meghatározására dolgoztak ki egy olyan forgatókönyvet, amelyben meglévő buszjáratokat akkumulátoros-elektromos autóbuszokkal üzemeltetnek, és a töltők számának, az elektromos buszpark méretének és az akkumulátor kapacitásának meghatározásával találják meg az optimális megoldást. A döntéshozatal során garantálni kellett, hogy minden ütemezett feladatot megbízhatóan hajtsanak végre a sztochasztikus villamosenergia-fogyasztással ellenére. Felfedezték, hogy a nagy flottaméret és a nagy töltési infrastruktúra kapacitás csökkentheti a minimálisan szükséges akkumulátorkapacitást, és ez a kompromisszum kulcsfontosságú az optimalizálás során. A publikációban bemutatták a javasolt keretrendszert a Jeju-ban (Korea) gyűjtött elektromos busz üzemeltetési adatok felhasználásával, és azt állapították meg, hogy a buszjáratok optimális villamosítása gazdasági és környezeti szempontból előnyös lehet. [24]

*CUI és szerzőtársai* 2023-ban azt állapították meg, hogy az elektromos buszok magas beszerzési költsége, nehezen prognosztizálható karbantartási költsége és az alkalmazási helyükön sok esetben még nem kellően kiépített, és kapacitásában nem megfelelő töltési infrastruktúra miatt a dízel autóbuszok teljes körű lecserélésére rövid távon kockázatos kihívást jelentenek. A buszüzemeltető cégek egy jelentős része olyan helyzetben találják magukat, hogy az elektromos buszokat integrálniuk kell meglévő - zömében -dízelflottáikkal. Az elektromos buszok korlátozott hatótávolsága és sok esetben nem megfelelő töltési infrastruktúrája miatt az autóbusz-üzemeltetők elsődleges gondja az, hogy miképpen tudják hatékonyan kihasználni vegyes buszparkjaikat az előre meghatározott buszmenetrendeket betartva, a maximális környezetkímélő, ugyanakkor költséghatékony módon. A cikk bemutatja a vegyes autóbuszflották belüli járművezénylés és töltési ütemezés közös optimalizálási problémájának koncepcióját. Ebben az esetben is egy integer lineáris modell alapján állították össze a buszok koordinációjának optimalizálására szolgáló vezénylési tervet és töltési módot a korlátozott töltési infrastruktúrán belül. A szimulációkat a kínai Dalian Gazdasági Fejlesztési Zóna valós tranzithálózatán belül végzik. Az eredmények azt mutatják, hogy a járművezénylés és a töltési ütemezés átgondolt közös optimalizálása jelentősen növeli az elektromos buszok járatsűrűségét, miközben csökkenti buszjáratok üzemeltetési költségeit. Figyelemre méltó, hogy az összes elektromos autóbusszal végzett utazás aránya 80,4%-ra emelkedett. [25]

**A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás megerősíti azt a koncepciót, hogy a tisztán elektromos autóbuszflották létrehozása számos kockázatot indukál, ezért az autóbuszállomány fokozatos elektrifikálása mellett a vegyes gépjárműflották kialakítása jelenthet olyan megoldást, amely gazdaságilag is fenntartható megoldást jelent, és csökkenti az energiaellátási és infrastrukturális rizikófaktorok hatását.**

### 2.2.3 Üzemeltetési modellek és koncepciók

*WEI és szerzőtársai* 2018-ban a tömegközlekedési rendszert a multimodális közlekedési ökoszisztéma szerves részeként tekintve vizsgálta az elektromos járművek bevezetésének hatását

abban a tekintetben, hogy az akkumulátoros elektromos buszok (BEB) és a üzemeltetéshez szükséges infrastruktúra technológiai fejlődése a dízelüzemű és a sűrített földgázzal működő (CNG) autóbuszok életképes helyettese milyen feltételek mellett megoldható. A szerzők kiemelik annak fontosságát, hogy kihívást jelent, hogy miképp lehet optimálisan telepíteni a BEB rendszert annak egyedi térbeli-időbeli jellemzői miatt. A megfelelő tér-időbeli kiépítés minimalizálhatja a járműbeszerzéssel és a töltőállomások kiosztásával kapcsolatos költségeket, miközben képes fenntartani a meglévő buszjáratok és a megrendelt menetrendet. A javasolt módszert a Utah Transit Authority (UTA) által üzemeltetett tranzithálózaton valósították meg. [26]

*FIORI és szerzőtársai* 2021-ben írt cikkükben bemutatják azt az elektromos autóbuszokra (BEB) kifejlesztett mikroszkopikus energiafogyasztási modellt, amely ezen járművek napi működése során keletkezett hatalmas adatmennyiség feldolgozásán alapul. A modell két modulból áll, melyek kiszámítják a vontatáshoz szükséges pillanatnyi teljesítményigényt és segédrendszerek számára szükséges átlagos teljesítményt. A modell a pillanatnyi energiafogyasztást a menetrendi útvonal, a járműkarakterisztika és egyéb működési feltételek (környezeti hőmérséklet, autóbusz utasterhelése, észlelt forgalomsűrűség) számítja ki. A modell a pillanatnyi energiafogyasztást szimulálja a járási útvonal és a jármű jellemzőinek, valamint a működési feltételeknek (mint például a környezeti hőmérséklet, a buszterhelés és a forgalom viszonyok) függvényében. A modellt 110 utazás adatai alapján kétszintű modellellenőrzéssel validálták. Mikroszkopikus szinten az eredmények azt igazolták, hogy a kalibrált modell robusztus a vonali üzemi feltételek változékonyságával szemben. Makroszkopikus szintű validálás során a modell 6%-os hibát mutatott. [27]

*DIRKS és szerzőtársai* 2022-ben a városi levegő minőség jelentős javulását várják attól, hogy a tömegközlekedési hálózatokban a belső égésű motoros autóbuszokat elektromos autóbuszokra cserélik. Sok buszhálózat-üzemeltető optimális átalakítási tervet készít az akkumulátoros elektromos buszok flottába való integrálására. Ideális esetben ez a terv a szükséges töltési infrastruktúra kiépítését is figyelembe veszi, hogy biztosítsa a flotta működőképességét. Erre tekintettel egy integrált modellezési megközelítést alkalmaztak az akkumulátoros elektromos buszok városi buszhálózatokba való integrálásának költségoptimalis, hosszú távú, több periódusra szóló átalakítási tervének meghatározásához. Modelljük összekapcsolja a központi stratégiai és operatív döntéseket, és minimalizáljuk a teljes tulajdonlási költséget (TCO), és elemezi a nitrogén-oxid-kibocsátás lehetséges csökkentését. Eredményeiket egy valós buszhálózat esettanulmányával is bizonyítják, ami azt mutatja, hogy az akkumulátoros elektromos buszok átfogó integrációja megvalósítható és gazdaságilag előnyös. Az akkumulátor kapacitásának és töltési teljesítményének az optimális flottaátalakításra gyakorolt hatásának elemzésével azt is megmutatják, hogy a közepes teljesítményű töltőberendezések közepes kapacitású akkumulátorokkal kombinálva jobbak, mint az alacsony vagy nagy teljesítményű töltőberendezésekkel rendelkező hálózatok. [28]

**A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás megmutatja, hogy az üzemeltetési modellek és koncepciók között nem található olyan megoldás, amely komplexen, ökoszisztéma szemléletben fogja össze a közlekedés üzemeltetési rendszerére vonatkozó közlekedéslogisztikai, akkumulátorgazdálkodási és energetikai alrendszereket, és mindezt az Ipar 4.0 által nyújtott technológiák felhasználásával egy adatvezérelt, körkörös gazdasági szemléletben a teljes tulajdonlási költségre (TCO) optimalizálja.**

### 2.3 Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos üzemeltetési és fenntarthatósági kérdések kezelése

*HARRIS és szerzőtársai* 2018-ban arra a következtetésre jutottak, hogy az alacsony károsanyag-kibocsátású alternatív autóbusz-technológiák – mint például az elektromos autóbuszok - esetében a

flotta üzemeltetői gyakran bizonytalanok az életciklus meghatározása tekintetében. Az alacsony károsanyag-kibocsátású alternatív autóbusz-technológiák egyre nagyobb érdeklődést mutatnak az autóbuszflotta-üzemeltetők körében a kisebb környezetterhelés és az alacsonyabb üzemeltetési költségek miatt. Kutatásuk átfogó, új keretet biztosít a dízel- és akkumulátoros elektromos buszok gyártási, használati, karbantartási és infrastrukturális fázisaiban a teljes életciklus-költségek és az ÜHG-kibocsátás bizonytalanságának kezelésére. A keretrendszerben tizenegy forgatókönyvben értékelték az akkumulátortechnológiák, a töltési infrastruktúra és a kiegészítő igények kombinációit. Mindegyik akkumulátoros elektromos buszokra vonatkozó forgatókönyv esetében 80%-os a megbízhatósággal kimondható, hogy az életciklus ÜHG-kibocsátása 10–58%-kal mérséklődik a dízelbuszokéhoz képest, de az életciklus költségei 129–247%-kal magasabbak. A lítium-titanát akkumulátort alkalmazó, alternatív töltésű elektromos buszok jelentik a leghatékonyabb forgatókönyvet az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának csökkentésére. Az akkumulátoros elektromos busztechnológiákra vonatkozóan a keretrendszer kiemeli az akkumulátorkapacitástól való függés és a nagy teljesítményű töltési infrastruktúra közötti kulcsfontosságú kompromisszumot. A keretrendszer lehetővé teszi az érdekelt felek számára, hogy egy adott forgatókönyv kockázata alapján döntéseket hozzanak a technológia átvételével és az erőforrás-elosztással kapcsolatban, és bizonyos szintű bizalmat biztosít a technológia azon képességére vonatkozóan, hogy az mérsékelni tudja a teljes életciklusra gyakorolt negatív hatásokat. [29]

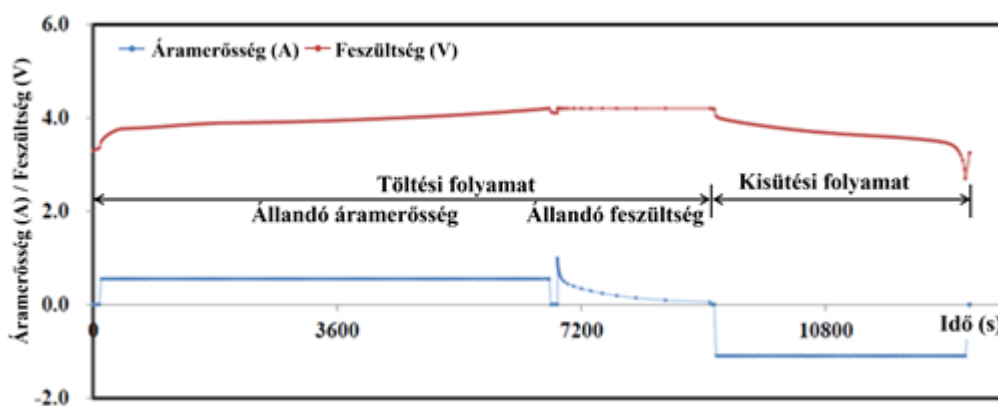
A *GLOBAL EV OUTLOOK* 2023-ban közzétett felmérése szerint az autóiipari lítium-ion (Li-ion) akkumulátorok iránti kereslet mintegy 65%-kal, 550 GWh-ra nőtt 2022-ben, a 2021-es körülbelül 330 GWh-ról, elsősorban az elektromos személygépkocsi-eladások növekedésének köszönhetően, és 2022-ben az új regisztrációk száma 55%-kal nőtt 2021-hez képest. [30]

*LIU és szerzőtársai* 2022 elektromos járműakkumulátor technológiák és az akkumulátor menedzsment fejlődésével összefüggésben áttekintik a hibrid és a tiszta elektromos járművekhez használt akkumulátortechnológiákat és legmodernebb akkumulátor menedzsment megoldásokat és kihívásait. Arra hívják fel a figyelmet, hogy a következő évtizedekben új technológiák fejlődhetnek ki, mint például a szilárdtest-akkumulátorok és a lítiumon túli ("poszt-lítium") technológiák, de egyre inkább az adatvezérelt elektrotermikus modelleknek jósolnak ígéretes jövőt. [31]

### 2.3.1 Az akkumulátorok töltése, kisülése

*CHEN és szerzőtársai* 2015-ben publikált cikke az elektromos járművekben használt lítium-ion vontató akkumulátorok állapotfigyelő technikáival, kiemelten kapacitása/töltési állapot (SoC) és feszültség tanulmányozásával foglalkozik az úgynevezett „Grey rendszerelmélet” alkalmazása révén. Az akkumulátor kisülési/töltési ciklusai alatti viselkedését elemzi és összpontosít az előrejelző paraméterekre. A kapacitás (SoC= State of Health) és azt befolyásoló különböző tényezők közötti kapcsolat tanulmányozására és elemzésére a Grey-reláció elemzést alkalmazzák. Az eredmények azt mutatják, hogy a Grey-prediction szegmensmodell hatékony előrejelzési mód az elektromos járművek akkumulátorai számára. [32]

*TSENG és szerzőtársai* 2015-ben cikkükben azt hangsúlyozták, hogy a lítium-ion akkumulátor élettartamának pontos becslése elengedhetetlen az energiaellátó rendszer megbízható működéséhez. Tanulmányukban statisztikai módszereken alapuló regressziós modelleket fejlesztettek ki az akkumulátor állapot prognózisára. Az eredményül kapott regressziós modellek nemcsak nyomon követhetik az akkumulátor leromlási (degradációs) trendjét, hanem korai szakaszban pontosan megjósolhatják annak hátralévő hasznos élettartamát (RUL= Remaining Useful Life).



1. ábra Töltési és kisülési profilok (Tseng és szerzőtársai, 2015)

A teljesen kisütési feszültséget ( $V_{dis}$ = fully discharged voltage) és a belső ellenállást ( $R$ =Resistance) két különböző matematikai modellben alkalmazták öregedési paraméterként, polinomiális és exponenciális függvényekkel. A regressziós modellek optimális együtthatóinak megkeresése részecske sokaság optimalizálási (PSO= particle swarm optimization) eljárással történt. A szimulációk azt mutatták, hogy a  $V_{dis}$ -t és  $R$ -t öregedési paraméterként használó regressziós modellek pontosabban tudnak valódi egészségi állapotprofil felépíteni, mint a ciklusszámot ( $N$ ) használók. A modellek adaptív tételére a szerzők a Monte Carlo-módszert használták. A későbbi eredmények azonban azt mutatták, hogy ez az akkumulátor élettartamának előrejelzésében csak jelentéktelen javulást eredményezett. [33]

GAO és szerzőtársai 2017-es tanulmányukban az elektromos buszok energiafogyasztását és az akkumulátorok teljesítményét értékeli valós útvonalakon és standardizált buszjáratokon keresztül. A tanulmány egy olyan keretrendszeren alapul, amely összekapcsolja a buszok elektromosításának lehetséges módjait a valós járműteljesítménnyel, a városi tömegközlekedési buszok megbízhatóságával, az akkumulátorok méretezésével és a töltési infrastruktúrával. Különböző útvonalakon vizsgálták a rendszeres és ultragyors töltésekkel kombinált töltési módok akkumulátorkapacitásra gyakorolt hatásait, különös figyelmet fordítva a városi tömegközlekedési buszjáratok megbízhatóságának fenntartására is. Az eredmények azt mutatják, hogy az ultragyors töltés, ami gyors, rövid töltési ciklusokból áll, például a buszmegállóknál, szignifikánsan csökkentheti az akkumulátor méretét, ami által elkerülhetők a hosszabb töltési ciklusok okozta menetrendi késések. A valós alkalmazások során tapasztaltak arra is utalnak, hogy az ultragyors töltés hozzájárul az akkumulátor degradációjához, azaz csökken az akkumulátor hosszú távú teljesítménye. Azonban az ultragyors töltés miatti kapacitásvesztés mértéke kevésbé tűnik jelentősnek azzal összehasonlítva, amit a normál, ismétlődő töltések okoznak az idő során. Az elemzések továbbá azt mutatják be, hogy az elektromos buszokban alkalmazott különböző akkumulátor-konfigurációk és rugalmas akkumulátorcsere gyakorlatok jelentős előnyöket hozhatnak. Ezek a rugalmas tervezési és üzemeltetési lehetőségek lehetővé teszik az elektromos buszok számára, hogy különböző városi közlekedési szokásokhoz igazodva közlekedjenek, miközben jelentősen csökkentik a jármű és az akkumulátor költségeit, ugyanakkor megbízható szolgáltatást nyújtanak. Figyelembe véve a különböző városok és az egyes buszjáratok vezetési jellemzőinek nagyfokú eltéréseit, a bemutatott elemzés azt mutatta, hogy jelentős költségmegtakarítás érhető el, ha a menetrend szerinti útvonalakon alapuló rugalmas akkumulátorcsere-gyakorlatok mellett a menetrend szerinti útvonalakon többféle akkumulátor-kapacitású konfigurációt használni képes elektromos buszokat alkalmaznának. A jelenlegi gyakorlat, miszerint a nagy akkumulátor-kapacitású elektromos buszok bármely útvonalon, illetve a kis akkumulátor-kapacitásúak csak bizonyos rövid útvonalakon közlekednek, az üzemeltetés



rugalmasságának csökkenéséhez vezet, így nagyon gyakran túlzott akkumulátor-kapacitást használnak, ami túlzott költségráfordítást eredményez a buszflották számára. Az autóbuszok akkumulátorainak rugalmas megválasztása és az elektromos buszok alternatív töltési megoldásai, ahogyan azt ez a kutatás javasolja, lehetővé tennék bármely útvonal kiszolgálását a megfelelő akkumulátor-konfigurációkkal. Továbbá a javasolt rugalmas akkumulátorcsere-gyakorlatok lehetővé teszik a flották számára, hogy az autóbusz-akkumulátorokat úgy kezeljék és tartsák karban, hogy még a változó szolgáltatási igények esetén is megfelelő akkumulátor-kapacitást biztosítsanak. A publikáció szerint összességében a jármű és az akkumulátor költségei csökkenthetők ezzel a megközelítéssel, miközben kielégítik a flotta szolgáltatási igényeit. [34]

*SCHIFFER és szerzőtársa* 2017-ben kiemelte, hogy az elektromos haszongépjárműveket üzemeltető közlekedési céges flották tervezésénél elsősorban az útvonalválasztási döntések voltak fókuszban, köszönhetően annak, hogy korlátozott hatótávolságuk és a szükséges töltési infrastruktúra, a töltőállomások elhelyezkedése is befolyásolja a vontatási akkumulátorok különben is viszonylag hosszú a feltöltési idejét. Cikkükben egy olyan helymeghatározási megközelítést mutatunk be, amely az elektromos járművek útvonalválasztásának és a töltőállomások elhelyezési döntéseinek egyidejű mérlegelésére alkalmas. Megoldásuk emellett alternatív célfüggvényeket is figyelembe vesz, így nemcsak a megtett távolság, hanem a szükséges jármű darabszám, a kihelyezett töltőállomások száma, valamint az összköltség is minimalizálható. Az eredményeket a helymeghatározási modell teljes megtett távolságára vonatkozóan mutatják be, és kijelölik a járműútválasztási modellhez képest lehetséges fejlesztéseket. [35]

*WANF és szerzőtársai*, 2017 cikkében egy olyan modellezési keretrendszert mutat be az elektromos buszok újratöltési ütemtervének optimalizálására, amely meghatározza mind a tervezési, mind az üzemeltetési döntéseket, miközben minimalizálja az éves összköltséget. A modellt a kaliforniai Davisben működő valós közlekedési hálózat segítségével validálták. Az eredmények azt mutatták, hogy a rendelkezésre álló hatótávolsággal kapcsolatos aggályok kiküszöbölhető bizonyos újratöltési stratégiák alkalmazásával. Az érzékenységi vizsgálatok kimutatták, hogy a modell átfogó útmutatást nyújthat a megrendelő hatóságok számára az elektromos buszok hasznosításához és a gyorsított rendszer kidolgozásához. Az összehasonlító elemzések szerint gazdaságosabb és környezetbarátabb az elektromos buszok használata, mint a dízelbuszoké. [36]

*ROGGE és szerzőtársai* 2018-ban készült munkájukban foglalkoztak azokkal a korlátokkal, amelyek a hagyományos dízelüzemű autóbuszokról az elektromosra való átállás során azok hatótávolsága és vontató akkumulátorainak szükséges töltési ideje miatt jelentkeznek. Cikkükben ismertetnek egy módszertant a depótöltésű elektromos autóbuszflották és a hozzájuk tartozó töltési infrastruktúra költségoptimalizált tervezésére. A definiált probléma kiterjed az akkumulátor buszok vezénylelésére, a flotta összetételére és a töltési infrastruktúra optimalizálására egyetlen közös folyamatban. A járművek menetrendjének és fordájának változásait pénzügyi hatások szempontjából kiértékelik, és a buszrendszer beruházási és üzemeltetési költségeivel együtt veszik figyelembe. Az így létrejövő teljes tulajdonlási költség lehetővé teszi a műszaki alternatívák rendszerszintű összehasonlítását, ami különösen ígéretessé teszi ezt a megközelítést a műszaki koncepciók széles skáláját felölelő megvalósíthatósági tanulmányok esetében. Az európai városok két jellemző forgatókönyvét elemezték és mutatták be egy esettanulmányban, amelyből kiderült, hogy a költségszerkezetet jelentősen befolyásolja az adott busztípus és annak műszaki jellemzők. Például egy alacsony össztömegű autóbusz teljes energiafogyasztása akár 32%-kal alacsonyabb lehet, mint a nagy hatótávolságú busz teljes energiafogyasztása, bár a futásteljesítmény ennek nagyobb lehet. Mindazonáltal mindkét busztípus üzemeltetésének teljes tulajdonlási költsége viszonylag közel van a megnövekedett flottaméretnek és a könnyebb autóbuszrendszerhez szükséges sofőr-költségek miatt.

Az esettanulmányból kiderül továbbá az is, hogy a különböző busztípusokból álló vegyes flotta előnyös lehet az autóbusz útvonalának üzemeltetési jellemzőitől függően. [37]

*LIN és szerzőtársai* 2019-ben közzétett tanulmánya különösen az elektromos autóbuszok nagyszabású gyorstöltőállomás-tervezésére összpontosít. A szerzők a közlekedési rendszer és az elektromos hálózat közös tervezésének optimalizálására interdiszciplináris vizsgálatot végeztek. Az elektromos autóbuszflották méretének növekedésével párhuzamosan folyamatosan növekvő töltési igény kielégítésére tekintettel a töltési szolgáltató hálózat térbeli kialakítása mellett az időbeliséget is figyelembe vették a hosszú távú tervezés érdekében. Az általuk javasolt tér-időbeli modell meghatározza az e-busz töltőállomások helyét és méretét, és a modell megvalósításához kapcsolódik egy többlépcsős infrastruktúra-tervezési stratégia is. A modellt és a többlépcsős tervezési stratégiákat numerikus kísérletek sorozatával igazolták. A kínai Shenzhen-re kidolgozott esettanulmányban igazolták a modell robusztusságát a változtatások tervezésére. [38]

*HE és szerzőtársai* 2020-ban írt cikke arra hívja fel a figyelmet, hogy az akkumulátoros elektromos buszokat (BEB) a tömegközlekedési szolgáltatások megrendelő és közlekedésszervező hatóságai gyorsan felkarolták környezeti és gazdasági előnyeik miatt. Ezeknek az autóbuszoknak a korlátozott hatótávolságával és időigényes töltésével kapcsolatos problémák miatt megoldásokat kell keresniük mind a flottát üzemeltető vállalkozásoknak, mind pedig a járműgyártóknak. A gyártók gyors útközbeni töltési technológiát fejlesztenek ki, azonban az útközbeni gyorstöltés nagyobb kihívást jelent a BEB rendszer töltési eseményeinek ütemezésében és kezelésében. Az útközbeni gyorstöltéssel a BEB-ek elérhetik ugyanazt a hatótávolságot és üzemidőt tekintetében ugyanolyan, mint a dízelüzemű társaik. Az útközbeni gyorstöltés megvalósítása a működési területen magasabb villamosenergia-igényt és feltehetően a csúcsidőben magasabb villamosenergia-díjakat okoz, amelyre az energetikai rendszernek is fel kell készülnie, és az üzemeltetők számára - gondos töltésütemezés és -kezelés nélkül - az útközbeni gyorstöltés jelentősen növelheti az üzemanyagköltségeket és csökkentheti a BEB-ek gazdasági vonzerejét. A tanulmány egy olyan hálózati modellezési keretrendszert ismertet, amelyben egy töltési ütemterv határozza meg, hogy mikor kell tölteni egy BEB-t, míg a töltésmenedzsment stratégiailag szabályozza a tényleges töltési teljesítményt. A töltési költségek magukban foglalják a villamosenergia-igény lehívási díját és az energiadíjat egyaránt. A töltésütemezési és -kezelési problémát a szerzők először egy nemlineáris nemkonvex programként fogalmazták meg, időfolyamatos változókkal. Ezután egy diszkretizáló módszert és egy lineáris újrafogalmazási technikát alkalmaztak, hogy a modellt lineáris programként újrafogalmazzák. Végül a modellt kiterjedt numerikus tanulmányokkal demonstrálták, amelyek két valós buszhálózaton alapult. Az eredmények azt mutatták, hogy a javasolt modell hatékonyan képes meghatározni az optimális töltési ütemezést és kezelést egy gyorstöltő BEB rendszerhez, amely magában hordozza a nagyszabású valós buszhálózatokban való felhasználás lehetőségét. [39]

*LIU és szerzőtársa* 2020-ban készült tanulmányában a hatótávolsággal és töltési idővel kapcsolatos problémák megoldása érdekében az elektromos autóbuszokkal végzett fordák olyan kialakítását vizsgálja (BET-VSP, azaz battery electric transit - vehicle scheduling problem), ahol megállóhelyi telepített töltők elhelyezése lehetséges. A probléma matematikai megfogalmazására két egyenértékű változatot azonosít. Az első megfogalmazás a hiányfüggvény elméleten alapul, a második pedig egy ekvivalens bi-objektív integer programozási modell. A matematikai programozás optimalizálásának első célja a szükséges elektromos járművek teljes számának minimalizálása, míg a második célja a szükséges akkumulátortöltők teljes számának minimalizálása. Ennek a kétcélú BET-VSP-nek a megoldására két megoldási módszert fejlesztettek ki. Először egy lexikográfiai módszeren alapuló, kétlépcsős konstrukciós és optimalizálási megoldási eljárást javasoltak. Másodszor egy beállított max-flow megoldási módszert dolgoztak ki. Három numerikus példát

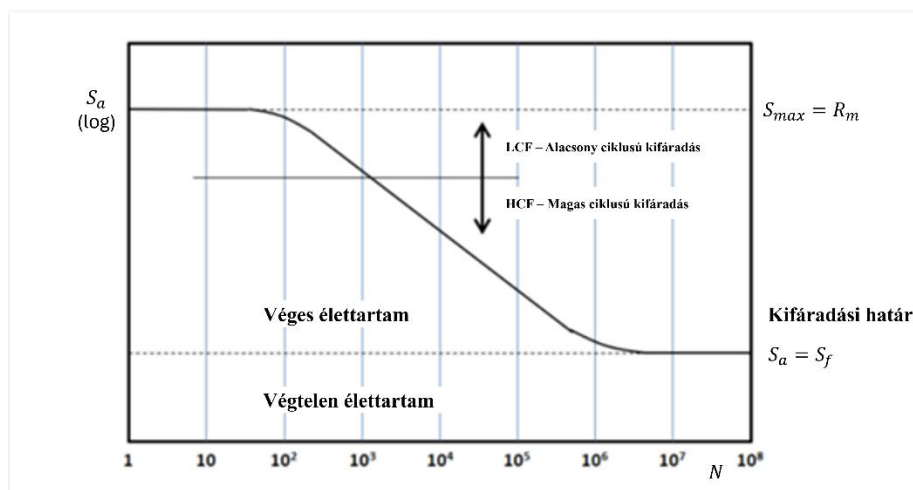
használtak feltáró eszközként a megoldási módszerek illusztrálására, valamint egy Szingapúrra vonatkozó valós esettanulmányt. Az eredmények azt mutatják, hogy a javasolt matematikai programozási modellek és megoldási módszerek hatékonyak és alkalmazhatók nagyszabású valós BET-VSP-k megoldásában. [40]

*HE és szerzőtársai* 2023-ban az elektromos autóbuszok a közlekedési rendszerekbe integrálásának előmozdítása érdekében átfogó optimalizálási keretrendszert fejlesztettek ki, amely a BEB rendszerek kombinált töltési infrastruktúra-tervezési, járműütemezési és díjkezelési problémáit kezeli azzal a céllal, hogy minimalizálja a teljes birtoklási költséget (TCO). A probléma vegyes integer nemlineáris problémaként került megfogalmazásra. Ezután egy genetikai algoritmus alapú megközelítést javasoltak a probléma megoldására. Végül három alternatív forgatókönyvet elemeztek, amelyek a Utah állambeli Salt Lake City-ben található közlekedési hálózaton alapultak, és összehasonlították a numerikus kísérletek az optimális forgatókönyv eredményeivel. Az összehasonlítási eredmények bemutatják a javasolt modell és megoldási algoritmus hatékonyságát a BEB rendszerek költséghatékony tervezési stratégiájának meghatározásában. [41]

### 2.3.2 Az akkumulátorok kifáradásával (degradációjával) és életciklusával összefüggő szakirodalom

*XU és szerzőtársai* 2016-ban felhívták a figyelmet arra, hogy az újratölthető lítium-ion akkumulátorokból felépített energiatárolás tervezésének és üzemeltetésének létfontosságú szempontja az akkumulátorcellák öregedési költségének pontos modellezése, különösen szabálytalan ciklusú műveletek esetén. Cikkükben egy félig empirikus lítium-ion akkumulátor leromlási modellt javasoltak, amely felméri az akkumulátorcellák élettartamának veszteségét a működési profilokból. A modellt úgy fogalmazták meg, hogy az egyesíti az akkumulátor leromlására vonatkozó alapvető elméleteket és az akkumulátor öregedési vizsgálati eredményeiket. A modell adaptálható különböző típusú lítium-ion akkumulátorokhoz. Cikkükben bemutatjuk a modell együtthetők hangolási módszereit a gyártó adatai alapján. A rendszer egy ciklusszámláló módszert tartalmaz a szabálytalan működésből származó feszültségciklusok azonosítására, lehetővé téve a leromlási modell alkalmazását bármely akkumulátor-energiatároló (BES) esetében.. [42]

*HOMAN* 2018-ban a Wöhler-féle kifáradási határértékeket bemutató S-N görbével jellemezte a degradációt. A 2. ábra vízszintes tengelyen a meghibásodásig eltelt ciklusok száma logaritmikus skálán van megadva, a függőleges tengelyen (lineáris vagy logaritmikus) a ciklus feszültség-amplitúdója (néha a maximális feszültség) adott. Az S-N görbék kifáradási tesztekkel származnak. A tesztek úgy hajtják végre, hogy a próbadarabokon állandó amplitúdójú ciklikus feszültséget (CA) alkalmaznak a próbadarab meghibásodásáig. Egyes esetekben a tesztet nagyon sok ciklus után leállítják ( $N > 10^6$ ). Az eredményeket ezután végtelen életként értelmezzük. [43]



2. ábra Az akkumulátor degradációra alkalmazott S-N görbe [43]

HAN és szerzőtársai 2019-ben az elektromos járművekben széles körben használt lítium-ion akkumulátorok leromlását (degradációját) az akkumulátorkutatás kulcsfontosságú tudományos problémájának nevezeték. Az akkumulátor előregedése korlátozza az energiatárolást és a teljesítményt, valamint az elektromos járművek teljesítményét, és jelentősen befolyásolja a költségeket és az élettartamot. Ezért ez a cikk átfogó áttekintést nyújt az akkumulátor leromlásának kulcsfontosságú kérdéseiről a teljes életciklus során. Először is bemutatja az akkumulátor belső öregedési mechanizmusait, figyelembe véve a különböző anód- és katódanyagokat, hogy jobban megérthető legyenek az akkumulátor kifáradási jellemzői. Ezután a jobb élettartam érdekében az akkumulátor élettartamát befolyásoló tényezőket részletesen ismertetik cikkükben a tervezés, a gyártás és az alkalmazás szempontjai szerint. [44]

SEVERON és szerzőtársai 2019-ben írt cikke az összetett, nemlineáris rendszerek, például a lítium-ion akkumulátorok élettartamának pontos előrejelzésével foglalkozik.

Az akkumulátorok változatos öregedési mechanizmusai, az eszközök jelentős variabilitása és a dinamikus működési feltételek továbbra is komoly kihívást jelentenek a kutatók számára. A degradáció mélyebb elemzése céljából olyan adatkészletet hoztak létre, amely 124 kereskedelmi forgalomban lévő lítium-vas-foszfát/grafit cellát tartalmaz, amelyeket gyorstöltési körülmények közötti ciklusokban, 150-től 2300-ig terjedő ciklus élettartamban vizsgáltak. A korai ciklusok kisülési feszültséggörbéinek felhasználásával, amelyek még nem mutatnak kapacitáscsökkenést, gépi tanulási eszközöket alkalmaztak a cellák ciklusélettartam szerinti előrejelzésére és osztályozására. Legjobb modelljeik 9,1%-os teszt hibát értek el a ciklus élettartamának kvantitatív előrejelzésében az első 100 ciklus használata alapján. Ez a munka rávilágít arra az ígéretes lehetőségre, hogy a szándékos adatgenerálást adatvezérelt modellezéssel célszerű kombinálni az összetett dinamikus rendszerek viselkedésének előrejelzése érdekében. Az akkumulátor élettartamának pontos előrejelzése nehéz, és gyakran csak akkor lehet előrejelzést adni, ha az akkumulátor már jelentősen leromlott, azonban a szerzők egy gépi tanulási módszerről számolnak be, amellyel nagy pontossággal megjósolható az akkumulátor élettartama a kapacitáscsökkenés kezdete előtt. [45]

JOHNEN és szerzőtársai 2021-ben a lítium-ion akkumulátorok kapacitáscsökkenését hosszú távú ciklikus öregedés során olyan rugalmas szigmoid típusú regressziós elrendezéssel modellezték, melyben különböző regressziós paraméterek értelmezhetők. Cikkükben ismertették azokat a valós adatokon alapuló statisztikai eljárásokat, mint például a paraméterbecslés, a konfidencia- és az előrejelzési intervallumok. A hosszú távú kapacitáscsökkenési modell alkalmazható az akkumulátorok második élettartama esetén. A teljes degradációs útvonalra vonatkozó előzetes

információk vagy betanítási adatok felhasználásával a modell kielégítően illeszthető még akkor is, ha csak rövid távú degradációs adatok állnak rendelkezésre. [46]

*SHCHUROV és szerzőtársai*, 2021 cikke áttekintést és összehasonlító elemzést nyújt a különféle típusú akkumulátorokról, beleértve az akkor legmodernebb típust – a lítium-ion akkumulátorokat. A lítium-ion akkumulátorokat (LIB) széles körben használják elektromos komplexumokban és rendszerekben, beleértve az elektromos járművek vontatási akkumulátorát is. Az ilyen akkumulátorok élettartamának növelése gyors elhasználódásuk és magas költségük miatt fontos tudományos és műszaki probléma, melynek megoldására vonatkozó kutatások főbb megközelítéseit és módszereit tárgyalja a publikáció, és ennek keretében mindenekelőtt a leromlás okainak részletes elemzését végzi el, valamint a lítium-ion akkumulátorokban a töltés, kisütés, pihenés és nehéz üzemi körülmények közötti folyamatokat azonosítja be. Valós folyamatszimuláció céljára meghatározzák az élettartamot befolyásoló fő tényezőket, melyek a következők: töltő- és kisütési áramok, önkisülési áram, hőmérséklet, ciklusok száma, kisülési mélység, töltési szint működési tartománya. Munkájuk kiterjed az akkumulátor menedzsment rendszerek (BMS), amelyek figyelembe veszik és kompenzálják az említett tényezők hatásait. A munka elemezte az elektromos közlekedés különböző működési ciklusait is, ideértve a nehéz, megerőltető és extrém üzemmódokat (amikor az akkumulátorok kisülése és kisülése meghaladja a névleges értéket) és ezek hatását a lítium-ion akkumulátorok leromlására. [47]

*ZHANG és szerzőtársai* 2021-ban közzétett tanulmánya egy akkumulátoros elektromos autóbusz szolgáltatási és töltési stratégiát határoz meg a teljes üzemeltetési költség minimalizálása érdekében, ahol figyelembe veszik az akkumulátor leromlásával és a nem lineáris töltési profillal kapcsolatos költségeket. Erre a problémára egy meghatározott particionálási modellt készítettek el, amely egy előre meghatározott fordaterv és korlátozott töltési lehetőségek függvénye. A globális optimális megoldás megtalálásához egy különösen hatékony többcímű korrekciós módszert fejlesztettek ki az árképzési probléma megoldására. A javasolt módszer hatékonyságának és alkalmazhatóságának további felmérésére numerikus kísérleteket végeztek és valós közlekedési hálózatra vonatkozó esettanulmányt készítettek. Kísérleteik alátámasztják, hogy a vizsgált problémák összetettsége ellenére a javasolt algoritmus segítségével ésszerű számítási időn belül optimális megoldás generálható. Az eredmények emellett jelentős költségmegtakarítást (körülbelül 10,1-27,3%-kal kevesebbet) mutatnak, ha ezt az optimalizálási modellt megvalósítják, ami elsősorban az akkumulátor élettartamának jelentős meghosszabbításának köszönhető. [48]

*O'KANE és szerzőtársai* 2022-ben írt cikkükben az első olyan publikált kísérletről számolnak be, amely kettőnél több degradációs mechanizmust közvetlenül összekapcsol a negatív elektródában. Az eredményeket különböző útvonalak feltérképezésére használják a bonyolult, útvonalfüggő és nemlineáris degradációs téren keresztül. Négy degradációs mechanizmus kapcsolódik egy nyílt forráskódú modellezési környezethez, amelyet egyedileg fejlesztettek ki. Gyakorlatilag „be lehet nézni” a modell belsejébe, és megfigyelhetők a különböző degradációs minták következményei, például a lítiumkészlet és az aktív anyag elvesztése. Ugyanazon sejt esetében már öt különböző útvonalat találtak, amelyek az élettartam végét eredményezhetik, attól függően, hogyan használják a cellát. Az ilyen információk lehetővé tennék a terméktervező számára, hogy meghosszabbítsa az élettartamot, vagy előre jelezze az élettartamot a használati minta alapján. A degradációs modellek paraméterezése azonban továbbra is nagy kihívás, és a nemzetközi akkumulátor közösség figyelmét igényli. [49]

*DE L VEGE és szerzőtársai* 2023-ban a lítium-ion akkumulátorok kapacitáscsökkenésének és egészségi állapotának (SOH) becslésére új módszert javasoltak és fejlesztettek ki. Ezt az állapot

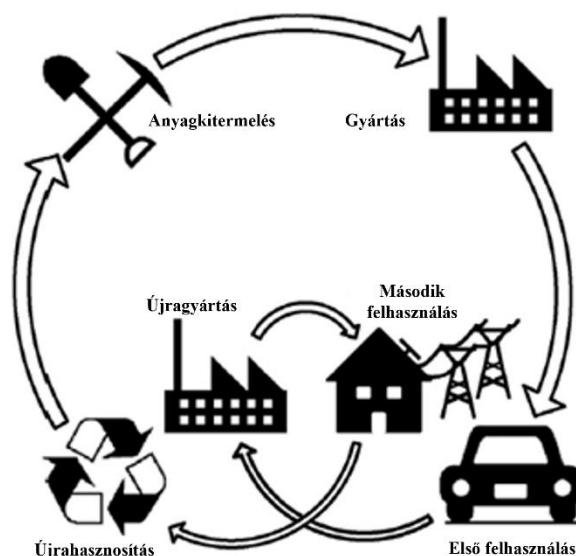
indikátort azért tartják előnyösnek, mert nem igényli a teljes töltési-kisütési ciklusból származó adatok beszerzését, mivel egy szűk SOC-intervallumon belül kerül kiszámításra. Ennek eredményeként a teljes töltési-kisütési ciklus adatpontjainak csak kis töredékére van szükség, ami csökkenti az adattárolási és számítási erőforrásokat, miközben pontos eredményeket biztosít. Az általuk alkalmazott Nernst-egyenlet által meghatározott akkumulátormodell használatával pontosan megjósolható a jövőbeli töltési-kisütési ciklusok viselkedése, amint azt az ebben a cikkben bemutatott eredmények mutatják. A javasolt megközelítés megfelelő jelfeldolgozási technikák alkalmazását igényli, a diszkrét wavelet-szűréstől a lineáris illesztésen és az autoregresszív integrált mozgóátlag algoritmusokon alapuló predikciós módszerekig. [50]

### 2.3.3 Az akkumulátorok második élete, a visszautas logisztika szerepe

*HEYMANS és szerzőtársai* 2014-ben a már rámutattak, hogy a Li-ion EV akkumulátorok energiatároló rendszerekben (ESS) helyhez kötött környezetben történő újrafelhasználása ígéretes technológia a villamosenergia-kereslet és -kínálat jobb kezelésének támogatására. Cikkükben a lakossági energiaprofil és a szabályozott költségstruktúra szimuláció használatával elemezték, hogy megvalósítható-e és milyen költségmegtakarítással jár az elektromos járművek akkumulátoregységeinek a villamosenergia jelleggörbe csúcseltolásra (peak-shifting) való újrahaznosítása. Az in situ lakossági energiatárolás hozzájárulhat az intelligens hálózat (smart grid) megvalósításához azáltal, hogy támogatja a kereslet csökkentését a tipikus csúcshasználati időszakokban. Az ESS használata növelheti ugyan a háztartások energiafelhasználását, de potenciálisan javítja a gazdasági hatékonyságot és csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását.. [51]

*XU és szerzőtársai* már 2016-ban írt cikkükben úgy minősítették az újratölthető lítium-ion akkumulátorokat – hivatkozva azok nagy energia- és teljesítménysűrűségére, alacsony kisütési sebességükre és csökkenő költségükre-, hogy ezek miatt ígéretes megoldásokat eredményezhetnek a hálózatszintű tárolórendszerek kiépítésében. Az energiatárolás tervezésének és üzemeltetésének létfontosságú szempontja az akkumulátorcellák öregedési költségének pontos modellezése, különösen szabálytalan ciklusú műveletek esetén. [42]

*CASALS és szerzőtársai*, 2019 szerint az elektromos járművek nyolc-tíz év garanciával rendelkező lítium-ion akkumulátorai ezen időszakot követően már nem alkalmasak vontató a vontatási funkció ellátására., ugyanakkor még rendelkeznek az eredeti kapacitásuk mintegy 80%-ával. A 3. ábrán az akkumulátorok újrahaznosításának körkörös modelljét mutatja be az első élekciklustól a második élekciklusig. Ebből az is látható, hogy az energiatároló eszközök fontos szerepet kapnak majd a villamosenergia-piacon. A Li-ion akkumulátorok még mindig túl drágák ahhoz, hogy az elektromos járművek vontató akkumulátoraként való használatuk élekciklusának végén nem kellene egy második élekciklus lehetőségeivel intenzíven foglalkozni. Ennek lehetőségét az autóiipari és a villamosenergia-szektor összekapcsolása teremti meg. Az akkumulátor újrafelhasználása fontos lépés a fenntarthatóság felé, de az energiatárolás tisztasága az elektromos áramot termelő áramforrásoktól és az akkumulátorok öregedésétől vagy élettartamától is függ.



3. ábra Akkumulátorok újra hasznosításának körkörös modellje Casals, 2019 szerint [52]

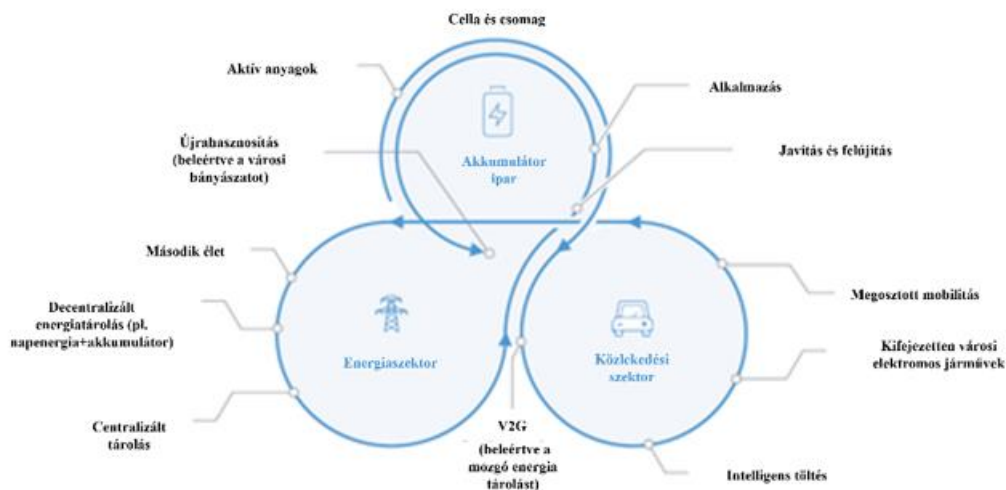
A cikk négy különböző stacionárius alkalmazásban elemzi az 2. élettartamú akkumulátorok (2. life batteries) hátralévő hasznos élettartamát, amelyek a következők:

- az elektromos járművek gyors töltésének támogatása,
- saját fogyasztás,
- a területszabályozás (grid) és
- a sebességváltó késleltetése.

Ehhez egy egyenértékű elektromos akkumulátor-öregedési modellt használ, amely szimulálja az akkumulátor kapacitásának csökkenését a használat során. A modell számos öregedési mechanizmust tartalmaz, mint például a naptári öregedés és a kisülési mélység (DOD), a hőmérséklet és a feszültség hatása. Az eredmények azt mutatják, hogy a 2. élettartamú akkumulátor élettartama egyértelműen a használatától függ. Az elektromos járművek gyors töltését támogató alkalmazásokban elérheti akár a 30 évet, míg a területszabályozó hálózati szolgáltatások (grid) esetében körülbelül a 6 évet. A tanulmány elemzi a spanyolországi villamosenergia-termelésből származó napi kibocsátásokat, és megállapítja, hogy a hálózatorientált energiátárolási alkalmazások a közeljövőben aligha fognak környezetvédelmi előnyökkel járni, azonban a megújuló energiaforrásokat használó alkalmazásokat, például a saját fogyasztásra történő alkalmazást már sokkal megfelelőbbnek ítéli. [52]

ISERNIA és szerzőtársai, 2019 szerint az elektromos és elektronikus berendezések hulladékainak (WEEE) fordított ellátási lánc kezelése egyre nagyobb figyelmet kap. A cikk azt mutatja be, hogy az Olaszországban kialakított rendszerben a gyűjtőközpontok (CC) kulcsszerepet játszanak a fordított logisztikai folyamatban. [53]

WEF World Economic Forum , 2019 a fenntartható akkumulátor értéklánca 2030-ig tartó időszakra vonatkozó jövőképéről – a Global Battery Alliance szervezettel együtt készített-jelentésében a körkörös akkumulátor-értéklánc tekintetében a közlekedési és az energiaszektor összekapcsolását látták célszerűnek. A 4. ábra szemléletesen ábrázolja az energetikai szektor, a közlekedési szektor és az akkumulátor ipar között kialakítható kapcsolódási pontokat. [54]

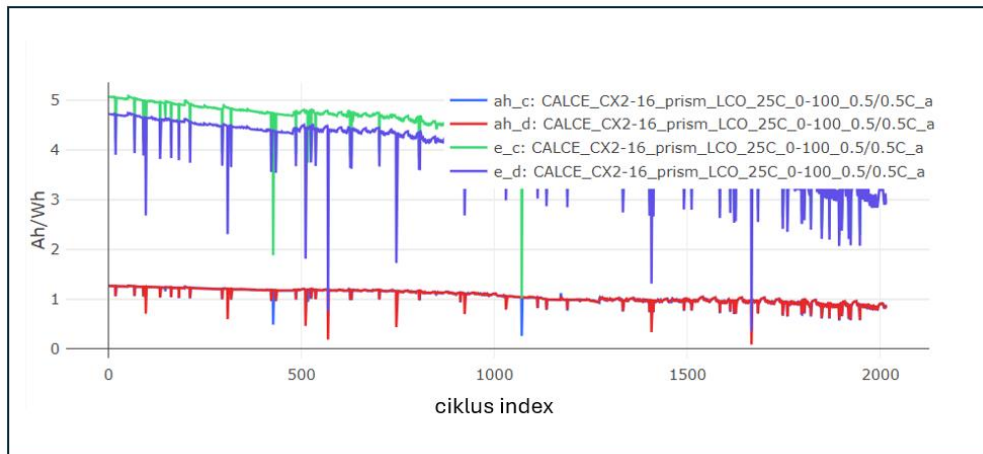


4. ábra Fenntartható akkumulátor értéklánc (forrás: WEF, 2017) [54]

BERGH, 2020 dolgozatában, hogy a lítium-ion akkumulátorok ugyan kulcsfontosságúak a fenntartható társadalom számára fontos megújuló energiaforrások használat és az közlekedés elektrifikálása szempontjából, a környezetre gyakorolt egyéb hatásaik miatt, valamint gazdasági és politikai okokból hatékonyan szükséges az újra hasznosításuk. [55]

PREGER és szerzőtársai 2020-ban írt tanulmányukban megállapították, hogy a Li-ion akkumulátorokkal ellátott energiatároló rendszereket világszerte egyre gyakrabban alkalmazzák a robusztus és rugalmas hálózatok fenntartása és a megújuló energiaforrások integrálásának elősegítése érdekében. Mindazonáltal a korlátozottan rendelkezésre álló, nyilvánosan hozzáférhető adatok miatt a cellák megfelelő kiválasztása a különböző alkalmazásokhoz nehézségbe ütközik, hiányoztak olyan elemzések, amelyek összehasonlítják a leggyakrabban használt lítium-ion vegyi anyagokat azonos működési feltételek mellett. A cikk részletesen bemutatja több, a kereskedelemben megvásárolható akkumulátorcella (LiFePO<sub>4</sub> (LFP), LiNixCoyAl<sub>1-x-y</sub>O<sub>2</sub> (NCA) és LiNixMnyCo<sub>1-x-y</sub>O<sub>2</sub> (NMC) többéves ciklusos vizsgálatát, melynek során változtatták a kisülési sebességét és mélység (DOD), valamint a környezetihő. Összehasonlították a kapacitást és a kisülési energia megtartását, valamint a körforgásos ciklus határfokát. Még akkor is, ha a gyártó specifikációi szerint üzemeltették a cellákat, a ciklus körülményei nagymértékben befolyásolták azok lebomlását (degradációját), a 80%-os kapacitás eléréséig eltelt idő több ezer órával és ciklusszámmal változott az egyes kémiai összetételű cellák között. Ebben a vizsgálatban a cellák degradációját összehasonlították a korábbi vizsgálatok hasonló celláinak adataival is, hogy azonosítani lehessen a jellemző tendenciákat és a teljesítmény eltéréseit. A ciklusokra vonatkozó összes fájl nyilvánosan elérhetővé vált a batteryarchive.org webhelyen, amely egy nemrégiben kifejlesztett adattár az akkumulátoradatok megjelenítésére és összehasonlítására, hogy megkönnyítse a jövőbeni kísérleti és modellezési erőfeszítéseket. Az 5. ábra szemlélteti egy cellavizsgálat eredményeinek jellemző vizuális megjelenítését. [56]

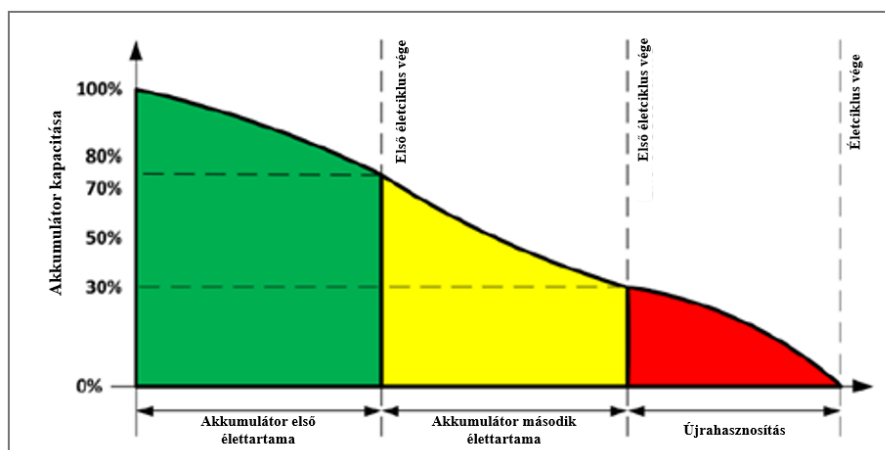




5. ábra Egy nyilvános hozzáférésű ciklus kiértékelés vizualizált bemutatása (batteryarchive.org) [56]

ILLA FONT és szerzőtársai, 2023, szerint az energiátárolórendszer technológiai fejlődése jelenleg ösztönzi azokat a fejlesztéseket, amelyek lehetővé teszik a elektromos járművekben használt vontató akkumulátorok újrafelhasználását vagy újrahasznosítását. Ennek az eljárásnak a hátránya azonban a használt elemek kiselejtezése. Munkájuk rövid áttekintést ad az elektromos járművek akkumulátorainak második élettartamát lehetővé tevő technikákról, és bemutatja a terület jelenlegi helyzetét, az újrahasználati folyamat lépéseit, valamint a kitekintést nyújt a fejlesztési irányoka és perspektívára. [57]

ZHAU és szerzőtársai, 2023, megállapítják, hogy a lítium-ion akkumulátorok töltöttségi állapotának, egészségi állapotának pontos becslése és a hátralévő hasznos élettartam előrejelzése fontos eleme az akkumulátor élettartamának meghosszabbításának és az akkumulátorrendszer megbízhatóságának szempontjából. Cikkükben először bemutatják az SOC, az SOH definícióját és a meglévő becslési módszereket. Ezt követően megfogalmazzák a RUL definícióját és osztályozzák, összehasonlítják az alkalmazott módszereket. Végül összefoglalják a lítium-ion akkumulátor állapotbecslés és a RUL előrejelzés kihívásait, és javaslatot tesznek a jövőbeli fejlesztés irányára. A 6. ábra az akkumulátor kapacitásának függvényében mutatja be az életciklus három fázisát. [58]



6. ábra Az akkumulátorok életciklusa a kapacitás függvényében Zhou, 2023, . [58]

**A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja, hogy az autóbuszflották elektrifikálási és dekarbonizációs folyamatában gazdasági és fenntarthatósági szempontból is kiemelt szerepet játszik az elektromos autóbuszok vontató akkumulátorait érintő folyamatok menedzselése, és a modellalkotás során ezeket egy komplex modell integráns részeként kell kezelni.**

## 2.4 A teljes tulajdonsági költség szerepe

A 2020-es évek előtt viszonylag kevés információ és adat állt rendelkezésre az elektromos járművek (EV), és főleg az elektromos autóbuszok (BEB) életciklusáról és teljes birtoklási költségéről (TCO). Ebben az időszakban elsősorban az elektromos személygépkocsik és haszongépjárművekről találhatók szakirodalmi források.

*OFFER és szerzőtársai 2010* több járműplatformon (BEV, FCHEV, FCV, ICE) végzett átfogó érzékenységi elemzésében azt mutatja, hogy 2030-ban az FCEV-k életciklus-költség-paritást érhetnek el a hagyományos benzinüzemű járművekkel. Minden járműplatform jelentős költségérzékenységet mutat a hajtáslánc tőkeköltségeivel szemben. A BEV és az FCHEV viszonylag érzéketlen a villamosenergia-költségekre, az FCHEV és az FCV viszont érzékeny a hidrogénköltségre. A BEV és az FCHEV életciklus-költségei meglehetősen hasonlóak, és a vezetési szokásoktól függően az egyik előnyt kínálhat a másikkal szemben. A cikk legfontosabb következtetése az, hogy az FCEV-k jövőbeli fejlesztésének legjobb módja az FCHEV. [59]

*FENG és szerzőtársai 2013* az USA korabeli piaci értékeit alapul véve úgy számoltak, hogy az elektromos haszongépjárművek (ECV) energiaköltségei kilométerenként csaknem négyszer olcsóbbak, mint a hagyományos dízel teherautóké. Az ECV-k azonban megközelítőleg háromszor drágábbak a járművásárlási költségek tekintetében. Az elektromos járművek karbantartása ugyan egyszerűbb és olcsóbb, azonban több bizonytalanság van az ECV akkumulátorok élettartamával és hosszú távú költségeivel kapcsolatban. Ezenkívül - újratöltés nélkül - korlátozások vonatkoznak a naponta megtett kilométerekre is. Ezek a gazdasági és technológiai kompromisszumok motiválták a cikkben közzétett kutatást. A flottaoptimalizálási keretrendszer, a forgatókönyvek széles skálája és a amerikai piaci adatok felhasználásával a kutatás rávilágított azokra a kulcsfontosságú gazdasági és technológiai fedezeti értékekre, amelyeknél az ECV-k versenyképesé válnak a hagyományos dízel társaikkal szemben. Az eredmények egyértelműen azt mutatták, hogy csak magas kihasználtság mellett (évenkénti 16 000 mérföld/teherautó felett) versenyképesek az elektromos járművek, ez különösen igaz, ha az elektromos haszongépjármű cseréje előtt nincs szükség akkumulátorcserére. A megtérülési elemzés eredményei azt mutatják, hogy a 9–27%-os ECV-árcsökkenés nagymértékben növelheti versenyképességüket, ha a járműveket évente több mint 12 000 mérföldre vezetik. [60]

*LAJUNEN, 2014* már foglalkozott a hibrid és elektromos városi autóbuszok energia fogyasztásának kérdéskörével és költsége-haszon elemzésével, majd későbbi cikkében *LAJUNEN, 2018* különböző töltési módszerek megvizsgálásával elemezte az elektromos autóbuszok élettartam költségeit. [61]

*NURHADI és szerzőtársai, 2014* az elektromos autóbuszokkal végzett közösségi közlekedési rendszer teljes birtoklási költségének (TCO) érzékenységi vizsgálatát végezte el Svédország közepes méretű városai tekintetében. [62]

*ZHOU és szerzőtársai, 2016* valós üzemeltetési körülmények között vizsgálta az elektromos autóbuszok életciklusának jellemzőit, különös tekintettel az energiafogyasztásra és a széndioxid kibocsátásra. Kiszámolták, hogy az elektromos busz teljes életciklusán keresztül 85-87%-kal

csökkenti a fosszilis energia felhasználását és 19-35%-kal csökkenti a CO<sub>2</sub> kibocsátást. Azért nem beszélhetünk teljesen zéró emisszióról, mert némely autóbustípus belső fűtése beépített gázolaj fűtőtestekkel van megoldva, így 0 Celsius fok alatti időszakban az akkumulátor teljesítménye az ilyen célú felhasználás következtében. A már fentebb említett lokálisan zéró emissziót kiválthatja a globálisan zéró emisszió a megújuló erőműveken előállított a zöld áram beszerzésének lehetőségén keresztül. Az elektromos buszokhoz szükséges üzemanyag teljesen zöld energiából is előállítható, legyen az nap-, szélenergia, vagy geotermikus erőmű, így a károsanyag kibocsátásának csökkentése már nem csupán lokális, hanem akár globális célkitűzés is lehet. [63]

*KUNITH és szerzőtársai*, 2017 optimalizálási modellt dolgozott ki a városi autóbushálózatban közlekedő elektromos autóbussok töltési infrastruktúrájának költséghatékony kialakítására. Hangsúlyozzák, hogy a töltési infrastruktúra hatékony elrendezése és az akkumulátor kapacitásának megfelelő méretezése kulcsfontosságú a teljes birtoklási költség (TCO) minimalizálása és a rendelkezésre álló energiaforrásokkal való gazdálkodás érdekében. Különböző forgatókönyveket vizsgáltak a töltési teljesítmény, az éghajlat és a változó működési feltételek hatásának felmérése érdekében. [64]

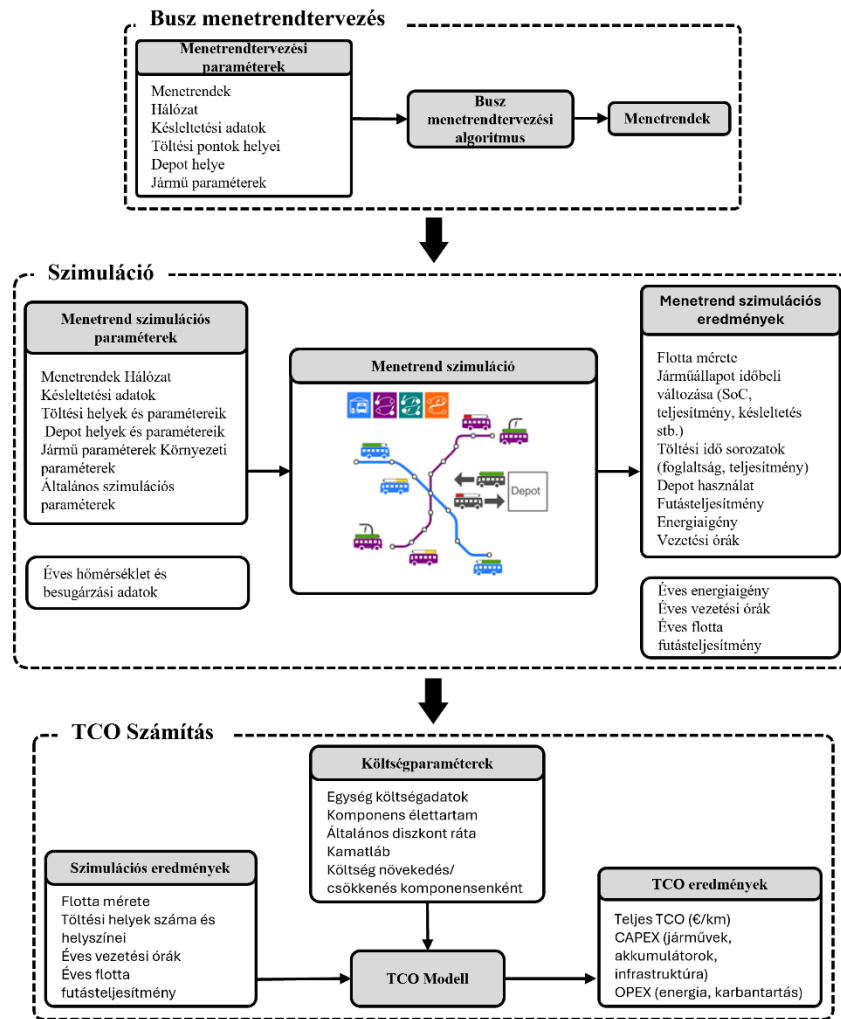
*LAJUNEN*, 2018, kiemelten a töltési igény és töltési módszerek hatását vizsgálta az életciklus költségekre, és egy speciális szimulációs eszközt fejlesztett ki az elektromos autóbussok különböző körülmények között üzemeltetésének átfogó értékelésére. A figyelembe vett töltési módok közé tartozik az éjszakai, a végállomási és az alkalmi töltés. A szimulációs eredményeket négy üzemi útvonalra vonatkozóan mutatták be, amelyeket Finnországban és Kaliforniában már üzemben lévő buszjáratokról mértek. Az eredmények azt mutatták, hogy az akkumulátorrendszer nagy energiakapacitása kulcsfontosságú az éjszaka töltött autóbussok megfelelő napi működéséhez, míg az akkumulátor mérete csekély mértékben befolyásolja a gyorsított rendszerrel töltött autóbussok energiafogyasztását és életciklus-költségeit. Az elektromos autóbussok életciklus-költségeit nagymértékben befolyásolják továbbá a tőkeköltségek, beleértve az autóbussok és a töltőberendezések beszerzési költségeit is. A 12 éves élettartamot figyelembe véve a végállomáson töltő elektromos autóbussok élettartama valamivel alacsonyabb lehet, mint a dízelbuszoké, de átlagosan 7%-kal magasabbak az életciklus-költségeik. A bemutatott mérési adatok szerint éjszakai töltésű buszok élettartama átlagosan 26%-kal, az alternatív módszerrel töltött autóbussoké pedig 35%-kal magasabb, mint a dízelbuszoké. [65]

*LOZANOVSKI és szerzőtársai*, 2018 a közösségi közlekedésben foglalkoztatott üzemanyagcellás autóbussok fenntarthatósági vizsgálatát végezte el, és ennek az értékelésnek a részeként a buszokat a dízel buszokhoz viszonyítva értékeli mind a fenntarthatóság, mind a valós követelmények teljesítése szempontjából a működési teljesítmény tekintetében. A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a H<sub>2</sub>FC buszok megfelelnek a működési és teljesítménykritériumoknak, és akkor környezetbarátak, ha „zöld” hidrogént használnak. [66]

*VORA és szerzőtársai* 2018-ban írt cikkükben azt állapították meg, hogy az elektromos járművek üzemeltetésének megtervezése során korábban nem fektettek elég hangsúlyt az akkumulátor leromlásának (degradációjának) és cseréjének a teljes birtoklási költség (TCO) gyakorolt hatására, noha az akkumulátor a hajtáslánc legdrágább és legkevésbé robusztus része. [67]

*JEFFERIES és szerzőtársai*, 2020 egy olyan, elektromos autóbuss üzemeltetésre vonatkozó átfogó TCO-értékelési módszert mutattak be, amely diszkrét eseményszimuláción alapul, beleértve a fordák kialakítását és a töltési infrastruktúra optimalizálását is. Munkájuk eredményeként az elektromos autóbussok megtérülési mutatóinak meghatározására létrehoztak egy komplex gazdasági és műszaki ökoszisztémán alapuló modellt. A tanulmányukban bemutatott gazdasági keretrendszer

logikus és rendkívül részletes, hiszen kalkulálnak az akkumulátor kapacitásával, fordák hosszával, töltési lehetőségekről, legyen az telephelyi, fordulóponti, vagy menetközbeni, a flotta összetételével, töltési idővel, működési és beruházási költségekkel és egyéb gazdasági mutatókkal. A 7. ábra egy olyan modellt mutat be, amely egyaránt alkalmas egy elektromos autóbusszflotta és az üzemeltetéshez szükséges infrastruktúra megtervezésére és menetrendi szimulációra, valamint a teljes tulajdonlási költség kiszámítására. [68]



7. ábra Az ún. eFLIPS (*Electric Fleet and Infrastructure Planning/Simulation*) modell (Jefferies, 2020) [68]

BARRAZA és szerzőtársai, 2021 az akkumulátoros elektromos buszhálózatokra dolgoztak ki különböző hajtásláncokra vonatkozó hatékony tervezési és költség-összehasonlító eljárást. A cikkben a modell bemeneti adatai között meghatározzák azokat a lényeges költség paramétereket, amelyek alapján szóló és csuklós autóbusszok esetében összehasonlítják a dízel és az elektromos hajtáslánccal működő járműveket. Ezek tartalmazzák a távolságarányos (pl. fajlagos hajtóanyag és karbantartási) költségeket, munkaerő költséget és az specifikus infrastruktúra ráfordításait. [69]

KIM és szerzőtársai, 2021 kis- és közepes méretű városok tömegközlekedési rendszeréhez használt akkumulátoros elektromos és hidrogénüzemanyagcellás buszok összehasonlító TCO-elemzését végezték el. Ezen túlmenően egy adott város tömegközlekedési rendszerének szerkezeti

elemzése is megtörténik, felmérve az elektromos vagy hidrogénbuszok használatára legmegfelelőbb buszvonalakat. [70]

*POLOM és szerzőtársai*, cikkében a lengyelországi, elektromos autóbusszokkal végzett közösségi közlekedési szolgáltatások fejlesztésének tapasztalatit és fejlesztési irányok értékelték. A szerzők megállapítják, hogy a tömegközlekedés átalakítása elsősorban az elektromos buszok és a töltő infrastruktúra vásárlásának támogatásával valósult meg, figyelmen kívül hagyva az ország energiamérlegét és a különböző energiaforrások kombinálásának lehetőségét. [71]

*AGER-WICK ELLINGSEN és szerzőtársai*, 2022 megállapítják, hogy az akkumulátoros elektromos buszokban (BEB) számos különböző Li-ion akkumulátortechnológiát és -méretet alkalmaznak, de a lehetséges alternatívák környezeti hatásairól kevés ismeret és adat áll rendelkezésre. A BEB-ek környezeti teljesítményét az autóbusz tenderekre jellemző 10 éves, valamint egy 20 éves meghosszabbított élettartamban is értékelték. A BEB élettartamának 10 évről 20 évre való meghosszabbítása javítja mind a környezeti teljesítményt, mind a környezeti hatások potenciáljához való relatív hozzájárulást a különböző BEB alternatívák esetében. [72]

*ABDELATY és szerzőtársai*, 2023 az akkumulátoros elektromos buszközlekedési hálózat robusztus kialakításának lehetőségeit vizsgálta töltési infrastruktúra diszruptív fejlődése függvényében, a hálózatelemzési elmélet alkalmazásával. A szokásos BEB infrastruktúra-optimalizálási modellek képezt, amelyek a rendszer teljes költségének, a közüzemi hatásainak és az alkatrészek méretének minimalizálását tűzik ki célul, tanulmányuk arra keresi a választ, hogy az olyan rendkívüli esemény esetében, mint egy áramkimaradás vagy berendezések meghibásodása, miként tartható fent a közlekedési rendszer működőképessége és ezt a töltési folyamat milyen paraméterei befolyásolhatják jelentősen. [73]

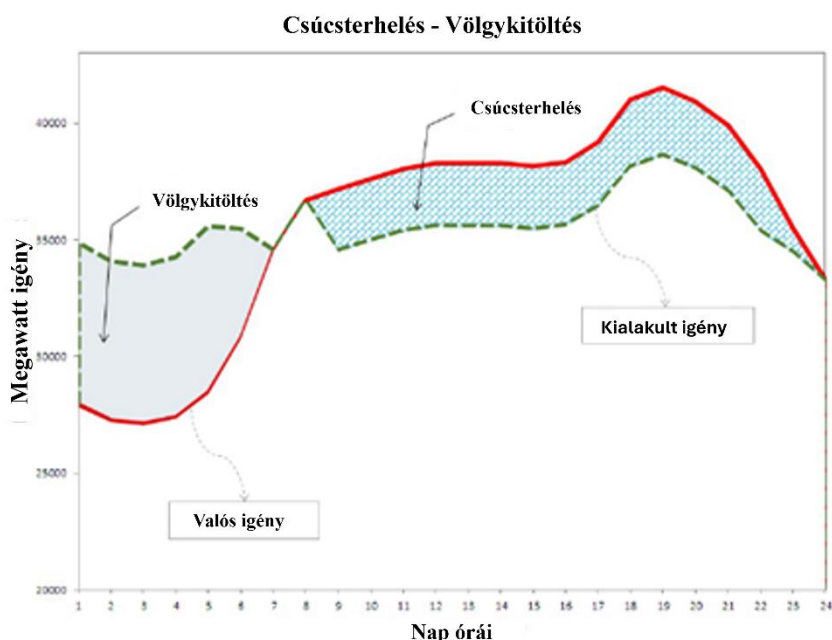
**A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja, hogy az üzemeltetés optimalizálásában leggyakrabban alkalmazott célfüggvény a teljes tulajdonlási költség (TCO). A TCO kiszámításában azonban eltérő szinten veszik figyelembe az arra ható tényezőket, és hiányzik egy olyan modell, amely ökoszisztéma szemléletben, holisztikusan számítja ki ezt a célértéket.**

## 2.5 Az elektrifikációs és dekarbonizáció energetikai összefüggései

A közlekedés és logisztikai ágazat járműveinek elektrifikálása nagy mértékben lehetővé teszi a lokális és globális dekarbonizációs célok megvalósítását, azonban nem hagyhatók figyelmen kívül a hajtóanyagok előállításával kapcsolatos energiakapacitási és energiabiztonsági kérdések, hiszen a fosszilis energiaforrások kimerülőben vannak, a megújuló energiaforrások infrastruktúrájának kiépülése pedig a szükségeshez képest lassabb ütemű. Új megközelítési módokra van tehát szükség, olyan ökoszisztémák kiépítésére, amelyekben a rendszerek együttműködésre és fenntartható, biztonságos és költséghatékony működésre képesek. Ebben a fejezetben ezen szempontok érvényesülését vizsgáltam a publikációk tekintetében.

*TURNER és szerzőtársa*, 2015-ben megfogalmazták, hogy az elektromos járműveknek egyszerűen azért kell kölcsönhatásba lépniük az intelligens hálózattal (Smart Grid), mert energiabiztonságuk megteremtéséhez az intelligens töltési stratégiák önmagukban nem lesznek elegendők. Ezért olyan intelligens kommunikációt kell alkalmazni a járművek és a hálózat között, amely segíti a hálózat kezelését, az úgynevezett jármű-hálózat (V2G) kapcsolattal. A kapcsolódó technológiák közvetlenül és közvetve hasznát hoznak az intelligens hálózatnak; jármű-infrastruktúra (V2I) és jármű-jármű (V2V) kommunikációt használnak az intelligens közlekedési rendszer megvalósításához. Mindez közvetlenül a Smart Grid előnyére válik, mivel kevesebb energiát használ az infrastruktúra-alapú világítási és forgalomirányító rendszerekben. és Az intelligens hálózat az intelligensebb közlekedési

stratégiákon keresztül közvetve lehetővé teszi a kevesebb üzemanyagfogyasztást a lakosság számára, és azt is, hogy gyorsabban és kényelmesebben érik el úti céljukat. A 8. ábrán látható, hogy a völgyidőszakban és a csúcsidőszakban milyen módon korrigál az intelligens hálózat. [74]



8. ábra A valós fogyasztási igény és a csúcsidejű fogyasztás kiegyenlítése (csúcssterhelés-völgykitöltés) (forrás: Turner, 2015) [74]

BORÉN, 2019 a Svédországban egyre növekvő elektromos autóbusz darabszám alapján kiemelte, hogy ezeknek a járműveknek a forgalomba helyezése jelentősen hozzájárul a fosszilis tüzelőanyagoktól mentes társadalom kialakulásához és a károsanyag-kibocsátás csökkentéséhez. Tanulmányában azonban azt is fontosnak tartotta, hogy tovább kell vizsgálni a társadalmi költségeket, a teljes tulajdonlási költséget, az éves energiafelhasználást, hogy figyelembe vegyék a szezonális ingadozásokat, valamint a gyorsulás közbeni zajt. Öt olyan svédországi városban végeztek vizsgálatokat, amelyek elektromos buszokat üzemeltetnek be saját tömegközlekedési rendszerükben. Tanulmányokban megállapították, hogy a dízel- és biogázüzemű autóbuszokhoz képest jelentős megtakarítások érhetők el a társadalmi költségekben és a teljes tulajdonlási költségben, főként a csökkent zaj, a károsanyag-kibocsátás hiánya és a csökkent energiafelhasználás miatt. [75]

BAUER és szerzőtársai, 2022 tanulmánya szerint a gyorsan növekvő globális energiaigény megkívánja a megújuló energiaforrások és a nukleáris energia növelését a fosszilis tüzelőanyagok helyett a szénlábnyom csökkentése és az éghajlatváltozás kezelése érdekében. Bár a megújuló energiaforrások, mint a nap- és szélenergia környezetvédelmi szempontból előnyösebbek, de időszakos tárolásra vannak utalva, és így nem képesek kielégíteni egy állandó energiaellátási láncot. Az elektrokémiai energiatároló eszközök – különösen a lítium-ion akkumulátorok (LIB) – ígéretes megoldást jelentenek, mint olyan energiahordozók, amelyek energiát tárolnak és az energiaellátást szabályoznak az úgynevezett „Peak-shaving” (csúcsfogyasztás csökkentés) és völgytöltéssel. [76]

*MCGRATH* és szerzőtársai 2022-ben azt vizsgálták, hogy a földrajzi elhelyezkedés milyen hatással van az akkumulátoros elektromos buszok energiafogyasztására. A környezeti hőmérséklet szezonális ingadozásának és az akkumulátor feltételezett leromlási folyamatának figyelembevételével megvizsgálták a működési költségekre és a szén-dioxid-kibocsátásra gyakorolt hatásokat. Az energiafogyasztás számítását a szén-dioxid-intenzitás (gCO<sub>2</sub>/kWh) és a nagykereskedelmi villamosenergia-költségek óránkénti szezonális átlagával kombinálták, hogy értékeljék a töltési folyamatot a nap és az év különböző szakaszaiban. Az élettartam kezdetén a hatótáv akár 17,3%-kal is csökkenhet a fűtési terhelés miatt. Az akkumulátor élettartam kezdetétől az élettartam végéig a hatótáv akár 26%-kal is csökkenhet. Míg az átlagos működési költségek viszonylag konzisztensek a négy régióban, az átlagos szén-dioxid-kibocsátás ötször magasabb lehet a helytől függően. [77]

Az *Európai Energiaügynökség, 2023* jelentése szerint 25 százalékkal nőtt a kettőezres évekhez képest a közlekedés teljes üvegházhatású gáz-kibocsátása az Európai Gazdasági Térségben, szemben a többi nagy károsanyag kibocsátókéval, ahol csökkent ez az arány. A közlekedés a teljes károsanyag kibocsátás 19.5 százalékáért felel, amelyen belül a közúti közlekedés több mint 90 százalékkal járul hozzá.[78]

*FRÖDE és szerzőtársai, 2023* szerint az intelligens hálózatok által lehetővé tett kétirányú technológiával az elektromos járműflották bevételre tehetnek szert a hálózat, az otthonok és az épületek áramellátásából. Az elektromos intelligens hálózatokat – amely azon átviteli és elosztó vezetékek és állomások hálózata, amelyek az áramot a termeléstől a fogyasztásra mozgatják – a meglévő fogyasztási görbék alapján a tipikus keresletcsúcsokra tervezték. A cikk felhívja a figyelmet arra, hogy az elektromos járművek felerősíthetik ezeket a csúcsokat, és problémákat is okozhatnak. Például a rendszert hirtelen csúcsterhelés érheti hétköznapi esténként, amikor az elektromos járművek tulajdonosai általában töltik járműveiket. Ez a csúcs túlterhelheti az áramkört ezekben az órákban, és olyan állomások vagy vezetékek korszerűsítését teheti szükségessé, ami többbe kerülhet, mint a növekvő villamosenergia-értékesítésből származó bevétel. Ez mindenki számára emelheti az árakat. [79]

*LINDER és szerzőtársai, 2023* publikációjukban rámutatta, hogy míg az elektromos járművek tiszták, akkumulátoraik előállítása azonban magas rendkívül karbon lábnyomot okoz. Az elektromos autók vontatására használt nagyméretű lítium-ion akkumulátorok előállítása jelenti az elektromos járművekhez kapcsolódó kibocsátás legnagyobb forrását, ami becslésük szerint a teljes gyártási kibocsátás 40-60 százalékát teheti ki. Ez azt is jelenti, hogy az akkumulátorok előállítása annyi károsanyag-kibocsátást eredményezhet, mint az összes többi anyag előállítása, amely az elektromos járművek gyártásához szükséges. [80]

**A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja, hogy elektrifikációs és dekarbonizáció folyamatát és ütemét alapvetően befolyásolja az energiaellátási rendszer kiépítettsége, kapacitása, az energiaellátás kiszámíthatósága, valamint az alternatív, megújuló és fenntartható energiaforrások használata. Ez indokolja az energiaellátási folyamatok logisztikai szintű figyelembevételét az innovatív modellben.**

### 3 A kutatási tevékenység áttekintése, a disszertáció célkitűzései, módszertana

A MÁV-Volán-csoport elnök-vezérigazgatója 2022. július 4-iki hatállyal kinevezett hazánk legnagyobb közúti közlekedési szolgáltatója, a Volánbusz Zrt. elnök-vezérigazgatójának. Ezt megelőzően a Nemzeti Útdíjfizetési Szolgáltató Zrt. vezérigazgató-helyettesekén már szereztem tapasztalatokat az autóbusszal végzett helyi és helyközi személyszállító közszolgáltatások területén. A kinevezésemet követő időszakban – megismerve az általam irányított vállalkozás működését és a tevékenységére ható tendenciákat, trendeket és globális hatásokat – szükségesnek tartottam a vállalati stratégia és működési modell megújítását. Ezt a törekvést a európai és hazai környezetvédelmi elvárások és jogszabályi rendelkezések is indokolják. Ezirányú törekvésemben nélkülözhetetlennek ítélttem meg, hogy a szakmai gyakorlati ismeretek mellett magas szintű elméleti tudásra is szert tegyek, és egy új szemléletet képviseljek a változások megvalósítása során. Egy innovatív, komplex rendszer kialakítására a logisztikai megközelítést láttam célszerűnek, melynek következetes alkalmazása révén egy adatvezérelt ökoszisztéma kialakítását tűztem ki célul egy olyan modell révén, amely lehetővé tesz az elektrifikáció és dekarbonizáció megvalósulását, és a gazdasági, környezeti és társadalmi fenntarthatóságot.

2023-ban felvételt nyertem a Miskolci Egyetem Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskolájába, és a témavezetőkkel egyetértésben az anyagáramlási rendszerek és logisztikai informatika tématerülethez kapcsolódóan fogalmaztuk meg disszertáció címét és tartalmi elvárásait.

A Logisztikai Intézet vezetésének és munkatársainak támogatásával megfogalmaztam a kutatásra vonatkozó célkitűzéseket, melyek a következők:

1. Autóbusszflottát üzemeltető vállalatok optimális és innovatív **működési modelljének** megalkotása a már alkalmazott modellekhez képesti lehatárolással, figyelembe véve a logisztikai folyamatokban alkalmazott járművek típusait, azok alkalmazási területét, figyelembe véve a szisztematikus irodalomkutatás során megismert struktúrákat és a saját kutatási eredményeket. **Az 1. fejezetben leírtak szerint az optimalizációt a már említett, lokálisan teljesen karbonsemleges üzemelés elérése jelenti, amely mind műszakilag, társadalmilag, mind gazdaságilag hasznos a vállalatnak.**
2. Az innovatív modell integráns részét képező **autóbusszflotta** optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntés modell és módszer kidolgozása, a teljes tulajdonlási költség (TCO) és a 4. fejezetben bemutatott egy tényezők figyelembevételével.
3. Elektromos autóbusszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában innovatív **újrahasznosítási modell** feltárása a visszautas logisztika eredményeinek figyelembevételével.

A doktori iskola elvárásainak megfelelően 2023-ban megkezdtem a kutatási tevékenységemet, melynek eredményét tudományos folyóiratokban és konferenciákon publikáltam, szemináriumokon és oktatási tevékenységem alkalmával ismerttettem.

Az első kutatási témához kapcsolódóan 2023-ban a Miskolci Egyetem Advanced Logistic Systems c. tudományos lapjában a közúti közlekedést is érintő ipari forradalom (Ipar 4.0) következtében a közösségi közlekedés autóbusszainak elektrifikálásában megnyíló lehetőségekről



publikáltam. [P/1] Az elektrifikáció térnyeréséről és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepéről a fenntartható közösségi közlekedésben a Közlekedéstudományi Szemlében jelent meg folytatásban két cikkem. [P/2], [P/3] A győri Nemzetközi Közlekedéstudományi Konferencián a közösségi közlekedés fenntarthatósági kérdésiről tartottam angol nyelvű előadást [P/4] és ebben a témában az Acta Technica Jaurinensisben publikáltam angol nyelvű cikket. [P/5] Ezekben a publikációkban már körvonalaztam a holisztikus modellel kapcsolatos elképzelések zömét, de az innovatív működési modell részletes ismertetése az Advanced Logistic Systems-ben történt meg 2024-ben. [P/6] 2024 május 16.-án a Miskolci Egyetem Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola kutatószemináriumán prezentáltam az autóbuszos közösségi közlekedésre kidolgozott komplex logisztikai modell lényegi elemeit.

A második kutatási témakörben, az optimális járműösszetétel tekintetében az Acta Logistica nemzetközi tudományos folyóiratban (Q3) azt az innovatív döntéshozatali módszert mutattam be, amely logisztikai és fenntarthatósági szempontokat egyaránt figyelembe vett. [P/7] Ebben a témakörben viszont a győri 2024. évi Nemzetközi Közlekedéstudományi Konferencián publikáltam a vegyes autóbuszflotta optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló módszertant. [P/8]

Harmadik témakörként az elektromos autóbuszok akkumulátorának fenntarthatósági kérdéskörével és a járművek teljes élettartam költségének (TCO) csökkentését lehetővé tevő visszautas logisztikai megoldásokkal foglalkoztam. Erről 2023-ban a témavezetőkkel közös cikket publikáltunk az Advanced Logistic Systems-ben. [P/9] 2024-ben a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézete által szervezett Középeurópai Logisztikai Konferencián (CECOL) az elektromos autóbuszok vontató akkumulátorainak degradációjáról tartottam angol nyelvű konferencia előadást. [P/10]

A Miskolci Egyetem hallgatói és a Logisztikai Intézet munkatársainak részvételével megszervezett előadásomban – oktatási tevékenységem részeként – ismertettem a Volánbusz Zrt. zöld átmenettel kapcsolatos stratégiai terveit és intézkedéseit.

Kutatási tevékenységem során a témavezetőkkel és a Logisztikai Intézet munkatársaival folyamatos egyeztetés alapján feltártam a témakörre vonatkozó hazai és nemzetközi releváns források alapján megállapítható eredményeket, melyeket a tematikus irodalomkutatás fejezetben vettem figyelembe, majd meghatároztam azokat a területeket, amelyek a megismertekhez képest innovatívabb és holisztikusabb rendszer kialakítását tehetik lehetővé. Ezek közül kiemelhető maga a körforgásos, adatvezérelt logisztikai rendszermodell, melynek két fontos eleme a közlekedési logisztikai elvek alapján kialakított vegyes autóbuszflotta, valamint az elektromos autóbuszok vontató akkumulátorainak degradációját figyelembe vevő visszautas logisztikai folyamat.

Az innovatív rendszermodell és az említett alrendszerek jelentős mértékben javítják a közszolgáltató autóbuszközlekedés TCO-ját, gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi fenntarthatóságát. Az elméleti modell validálása céljából a Volánbusz Zrt.-nél mérések és adatfelvételek elvégzésére került sor, melyek megalapozzák a disszertációban megfogalmazott tézisek helyességét.

## 4 Az innovatív működési modell bemutatás

A közösségi közlekedésben autóbusszal végzett szolgáltatást nyújtó gazdálkodó szervezetek – felismerve azt, hogy az elektrifikáció és dekarbonizáció kérdésével való foglalkozás stratégiai fontossággal bír az ilyen cégek fenntartható működése szempontjából – ki kell, hogy alakítsák azt a gazdálkodási modellt, amely teljeskörűen figyelembe vesz minden releváns szempontot és elvárást. Az ezekkel kapcsolatos irodalom tematikus feldolgozásával a járműpark és az azzal nyújtott szolgáltatások gazdaság, környezetvédelmi és társadalmi fenntarthatósága szempontjából ezért a teljes ökoszisztéma komplex, holisztikus kialakítására van szükség, amely nem csak a közlekedés szervezésével kapcsolatos szempontok (pl. járműflotta, közlekedési infrastruktúra, fordaszerkezet, stb.) érvényesülése lényeges, hanem figyelemmel kell lenni az elektromos autóbuszok optimális működési feltételeinek megteremtésére (töltőhálózat illesztése a fordaszerkezethez, töltőhálózat lokációja, töltési módok kiválasztás, hajtóanyagellátás energetikailag optimalizált megoldását és az elektromos autóbuszok vontató akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdéseket (degradáció, újra hasznosítás és második életciklus).

A tematikus irodalomkutatói fejezetben leírtak alapján összefoglalva látható, hogy a legtöbb gazdasági modellszámítás szerint középtávon az elektromos buszok üzemeltetésének rentábilisa egyelőre kétséges! Azonban kérdésként merül fel, hogy valóban igaznak fogadhatók-e el a bemutatott hazai és nemzetközi számításokat. Ugyanis a megalkotott, bemutatott modellek és módszertanok, a maguk logikai rendszerében kitűnők, de meglátásom szerint nem kellőképpen teljeskörűek. A tanulmányokban bemutatott gazdasági keretrendszerek önmagukban logikusak és rendkívül részletesek, hiszen kalkulálnak az akkumulátor kapacitásával, fordák hosszával, töltési lehetőségekkel ( legyen az telephelyi, fordulóponti, vagy menetközbeni), a flotta összetételével, töltési idővel, működési és beruházási költségekkel és egyéb gazdasági mutatókkal. Véleményem szerint a modellek hiányossága abban rejlik, hogy a szerzők modelljüket nem egy összetett ökoszisztémába helyezték el, ahol a sziget szerűen működő rendszereket összekapcsolják, hanem egy szoliter gazdasági modellel megelégednek.

Ezért a publikációban bemutattam egy jóval komplexebb modellt, amely a logisztika tudomány módszertánával felépített ökoszisztémát alkot. Ebben nem csupán az elektromos autóbuszok TCO-ját, beruházási (CAPEX) és üzemeltetési költségeit (OPEX) veszem figyelembe, hanem az elektromos buszokban, az elhasznált akkumulátorokban és a töltőállomásokban rejlő egyéb üzleti lehetőségek bevételi oldalát is vizsgálom, számba véve az elektromos áram, tehát az üzemanyag saját termelési és kereskedelmi lehetőségeit, mellyel egy rendkívül komplex, de realisabb képet lehet alkotni az elektromos buszok alkalmazásának lehetőségeiről.

### 4.1 Módszertan

Az innovatív működési modell elméleti háttérét a következő struktúrában ismertetjük:

- A rendszer modell logisztikai értelmezése
- A rendszer határai, alkalmazási területe, kizárások, korlátozások kijelölése
- A rendszer logisztikai folyamatai (áramlatok) és entitásai
- A rendszerkapcsolatok folyamatok és entítások között
- Adatkapcsolatok, információáramlás, entításokból származó input adatok halmaza
- Az adatközpont szerepe, kialakítása

- Az adatközpontból származó irányítási információk és beavatkozási területek meghatározása az adatvezérelt működési modell szolgáltatásai

#### 4.1.1 A rendszer modell logisztikai értelmezése

A holisztikus modell elméleti megalapozására kiinduló pontként a gráfelméletből és a hálózatelméletből célszerű kiindulni, majd ezen elméletek alkalmazásának egy speciális módjaként a korábban össze nem kapcsolt folyamatokat és entitásokat egy logisztikai hálózatba lehet összekapcsolni.

A matematikában a gráfelmélet a gráfok tanulmányozása, amelyek olyan matematikai struktúrák, amelyeket az objektumok közötti párkapcsolatok modellezésére használnak. A gráf ebben az összefüggésben csúcsokból áll (más néven csomópontok vagy pontok), amelyeket élek (más néven ívek, hivatkozások vagy vonalak) kapcsolnak össze. Különbséget teszünk az irányítatlan gráfok között, ahol az élek szimmetrikusan kapcsolnak össze két csúcsot, és az irányított gráfokat, ahol az élek aszimmetrikusan kapcsolnak össze két csúcsot. A grafikonok a diszkrét matematika egyik fő vizsgálati tárgyai.

A hálózatelmélet a gráfok tanulmányozása vagy szimmetrikus relációk, vagy általánosabban diszkrét objektumok közötti aszimmetrikus kapcsolatok reprezentációjaként. A hálózatelmélet a gráfelmélet része: a hálózat olyan gráfként definiálható, amelyben a csomópontok és/vagy élek attribútumokkal (pl. nevekkkel) rendelkeznek. Számos tudományterületen alkalmazzák, beleértve a statisztikai fizikát, részecskefizikát, számítástechnikát, elektrotechnikát, biológiát, közgazdaságtant, pénzügyet, műveleti kutatást, klimatológiát és szociológiát.

*GLISTAU*, 2024 szerint a logisztika olyan alkalmazás-orientált tudomány, amely elemzi, modellezi és számszerűsíti a humán, technológiai és szervezeti rendszerek működését a térben és időben a hálózatokat képző objektumok áramlása alapján. Az áramlások lehetnek fizikai típusúak (pl. anyagáramlás, áruk áramlása, stb.) és ezekhez kapcsolódó informatikai, pénzügyi és energetikai jellegűek. [81]

A jelen publikációban bemutatott modell a közlekedéslogisztika folyamatba illesztett közlekedési eszközcsoport, az elektromos járműflotta teljes élettartam költségének vizsgálata alapján kívánja javítani egy vegyes flottát üzemeltető vállalkozás gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi fenntarthatóságát, és ebből a célból egy komplex modellbe integrálja az elektromos járművek energiaellátási és akkumulátor visszautas logisztikai folyamatrendszerét. Mindezt úgy, hogy érvényesül a körkörös és az Ipar 4.0 informatikai eszközeiből származó információkra épülő adatvezérelt működés.

#### 4.1.2 A logisztikai rendszer határai, alkalmazási területe

A logisztika modell a helyi, elővárosi és helyközi közszolgáltató autóbussz közlekedés vállalkozások esetében azon szervezetre alkalmazható, melyek jelentős vegyes járműflotta kialakítása céljából elektromos autóbusszok hatékony integrálásával a járműállomány teljes élettartamköltségét tartják szem előtt, és ehhez figyelembe veszik az energiaellátás diverzifikált megoldásait, és hosszabb távon kezelik az akkumulátorok fenntarthatósági és gazdaságossági problémáit is. Az elektromos járművek (EVs) csoportjába tartozó hibrid elektromos járművek – melyekben az elektromos motorokat a belső égésű motorok kiegészítő meghajtásaként használják – már a 1990-es évek végén elterjedtek, majd a 2000-es évek végén megjelentek az úgynevezett plug-in-hibrid járművek (PHEV), amelyekben az elektromos motorok domináns hajtásként, nem pedig kiegészítőként használják. Ezek a technológiák első sorban a személygépkocsik esetében voltak jellemzők, míg az autóbusszok tekintetében az akkumulátoros elektromos járműkonstrukció (BEB)

elterjedése kezdődött el a 2010-es években. A logisztikai rendszer kidolgozásánál ez utóbbi konstrukciót vizsgáltam, mert a autóbuszflottákban egyre gyakrabban alkalmazott hidrogén hatású üzemanyagcellás járművekről (FCV, H2FC) megbízható, üzemelési adatokkal alátámasztott, publikált adatok nem állnak rendelkezésre.

A tematikus irodalomfeldolgozás alapján megállapítottam, hogy a különböző publikációkban, kutatásokban és tanulmányokban a szerzők eltérő szinteken működő modelleket fejlesztettek ki. A modelleket a teljes tulajdonlási költségre (TCO) gyakorolt hatásuk alapján hierarchizáltam 1-től 5-ös szintig.

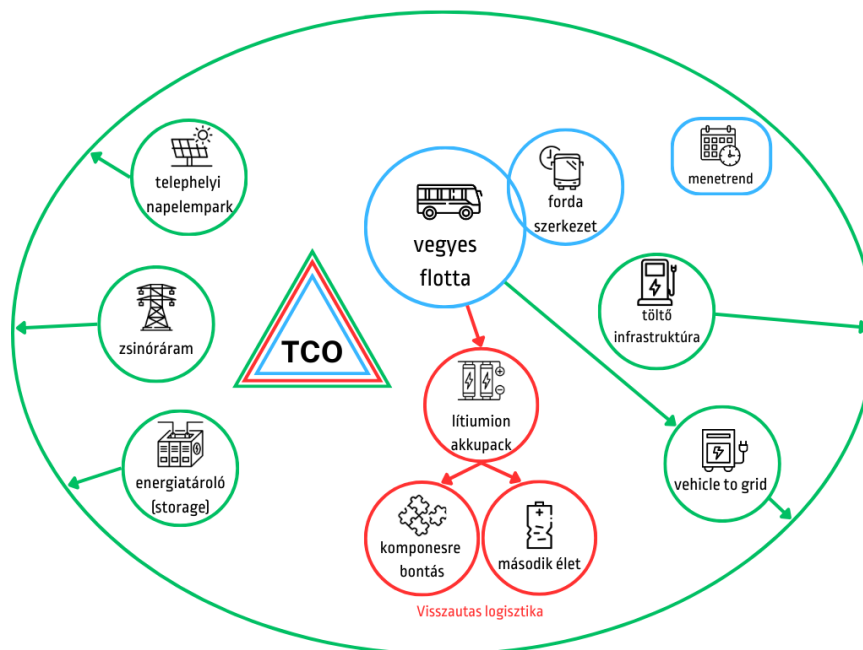
1. szintű modell: A járműflottában különböző márkájú, típusú és autóbuszokat hajtáslánccal üzemelő autóbuszok TCO-ját hasonlították össze,
2. szintű modell: Az 1. szintű modell tapasztalatra alapozva vegyes flotta összetétel kialakítása céljából meghatározták az eltérő hajtásláncú járművek arányát alapvetően az hajtóanyagköltségek és fordaszerkezet, valamint hatótávolság figyelembevételével,
3. szintű modell: Az előzők mellett ez a modell már figyelembe veszi a töltési infrastruktúra lehetőségeit és a töltési módokat,
4. szintű modell: Ez foglalkozik a dekarbonizáció szempontjából az akkumulátorok második életciklusával és hasznosítási lehetőségeivel
5. szintű modell: A dolgozatban bemutatott, adatvezérelt innovatív megoldás, amely körforgásos gazdasági és logisztikai modellben az Ipar 4.0 lehetőségeinek kihasználásával holisztikus formában beilleszti az energetikai logisztikai folyamatot is. A disszertációban bemutatott, az 1. tézissel alátámasztott modell természetesen alapoz az alacsonyabb szintű modellekben kidolgozott azon megoldásokra, amelyek alkalmasnak bizonyultak a holisztikus modell logisztikai folyamataiba és entitásaiba történő beillesztésre.

Az 5. szintű modell szerint logisztikai folyamatokat a következő fejezetekben mutatjuk be. A 4.1.3 fejezetben a 9. ábra mutatja be azt a három körforgásos kapcsolatban álló logisztikai folyamatot, amelyek részletesebb kifejtése a 4. fejezetben megtalálható. Az áttekintő ábrákon használt színek konzekvensen jelzik az adott folyamatot, így a kék szín a közlekedési, a zöld az energetikai, míg a piros az akkumulátor visszautas logisztikai folyamatokra vonatkozik.

#### 4.1.3 Logisztikai folyamatok és entitások

A **9. ábrán** bemutatott rendszer három logisztikai folyamatot (logistic flows) fog össze abból a célból, hogy az elektromos autóbuszok (BEB) vegyes flottába történő beillesztése a TCO szempontjából is igazolható legyen. Ezek a folyamatok, amelyeket az entitások szintjén részletesebben is bemutatok, a következők:

- A vegyes autóbusz flottával kiszolgált közlekedési rendszer folyamatai és entitásai (kék színnel jelölve)
- Az elektromos autóbuszok ökoszisztémaként kezelt energetikai ellátási rendszere (zöld színnel jelölve)
- Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak visszautas logisztikai rendszere (piros színnel jelölve)



9. ábra A három körforgásos logisztikai folyamat logikai ábrája (saját szerkesztés), [P/6]

A következőkben bemutatom azokat az entitásokat, amelyek alapvetően meghatározzák a három körforgásos logisztikai folyamat működését. Ezek a következők:

- **A vegyes autóbusszflotta által kiszolgált közlekedési rendszer**

Az elektromos járművek (EVs) csoportjából az elektromos autóbusszok, a magyar szakmai nyelvben sokszor villanybuszoknak nevezett személyszállító járművek integrációja jelentett kihívást az addig dízel és gáz üzemanyaggal működő járműparkkal rendelkező közlekedési szolgáltatók számára.

A közlekedés logisztikai rendszer entitásai a következők:

- Az akkumulátoros elektromos járműveket is tartalmazó vegyes autóbusszflotta
- A közlekedési szolgáltató a megrendelőtől vagy közlekedésszervezőtől elvárt
- A vegyes flottával kiszolgált menetrend
- A menetrend betartásához szüksége fordaszerkezet

Az elektromos autóbusszok esetében a hatótávolság, a fajlagos energiafogyasztás és a teljes élettartam tartoznak azon jellemzők közé, amelyek a környezetvédelmi előnyük mellett a vizsgálat tárgyát képezi. Az ellátásért felelős szervezettől elvárt menetrend végrehajtására alkalmas fordaszerkezet kialakításánál kulcskérdés, hogy az elektromos járművek hatótávolsága és akkumulátorainak töltés módja megfelelően a fordák biztonságos lebonyolításának. Az elektrifikációt és dekarbonizációt folyamatként tekintve, a vegyes flotta technikai összetétele is folyamatosan változik a szerint, hogy a teljes élettartam költségek összehasonlítása alapján, milyen arányban történhet meg az elektromos autóbusszok integrációja.

- **Az elektromos autóbusszok energetikai ellátási rendszere (energy flows)**

A rendszert alkotó entitások:

- Az elektromos autóbusszok töltési rendszere

A tematikus irodalomkutatás 2.31. fejezete részletesen bemutatja az elektromos autóbuszok vontató akkumulátorainak töltését biztosító infrastruktúra megfelelő kialakításának fontosságát és a gyakorlatban bevált töltési megoldásokat.

- Vehicle-to-Grid (V2G)

A járművekbe beépített vontató akkumulátorok az üzemidő alatt átmenetileg vagy az forda befejezésekor, a telephelyi töltés előtt rendelkezhetnek jelentős elektromos kapacitással, melyet a villamos energia rendszerhez csatlakozva értékesíteni lehet, vagy a közlekedési szolgáltató energiarendszerében más energetikai célú hasznosításra lehet fordítani.

- Napelempark

A közlekedési szolgáltató a telephelyén, de akár a közlekedési infrastruktúrájának más helyein (végállomások, megállóhelyek) kialakíthat napelem kapacitásokat, melyek a körforgásos energiaellátás integráns részét képezhetik.

- Hálózati áram- Zsinór áram

A közlekedési szolgáltató az áramszolgáltató vállalattal kötött átgondolt szerződési feltételekkel kihasználhatja, hogy adott időszakban olcsó zsinóráramot tud beszerezni, amelyet vagy közvetlenül töltésre használhat fel, vagy energiátároló rendszerében később vesz igénybe.

- Storage – Energiatárolók

A kedvező áron megszerzett vagy előállított villamosenergia tárolása kulcsfontosságú az energetikai körforgásos folyamat szempontjából, a közlekedési szolgáltatónál helyesen kialakított akkumulátor menedzsment pedig lehetővé teszi, hogy az elektromos autóbuszok vontatásra már nem használható akkumulátorai a visszautas logisztika rendszerbe bekerülve - megfelelő feltételek teljesülés esetén – energiátárolóként (storage) működhessenek.

- Harmadik feles energia értékesítés

A közlekedési szolgáltató az általa a megújuló energiaforrásból előállított vagy kedvező áron beszerezett villamosenergiát külső partnerek, vevők számára nyújtott akkumulátor töltési szolgáltatása is felhasználhatja, amely tevékenység a TCO-t javíthatja.

Az elektromos autóbuszok akkumulátorait a napi fordához illeszkedően szükséges úgy feltölteni, hogy következő napi forda végrehajtására alkalmasak legyenek. Az akkumulátor kapacitása lehetővé teheti, hogy telephelyi töltés kerüljön alkalmazásra, hosszabb fordák esetében szükséges lehet a forda végrehajtása során beillesztett töltés. Az elektromos autóbusz akkumulátorban tárolt energia az ún. V2G rendszerrel visszatáplálható az elektromos hálózatba. A megújuló energia kézenfekvő megoldás az elektrifikáció során használt energia előállítására. A rendelkezésre álló energiabeszerezési lehetőségek közül a hálózati kapcsolaton keresztül optimalizálható az eladás és vétel opciók megvalósítása. Az elektromos járművek a hajtási láncban már nem alkalmas akkumulátorai is részt vállalnak az energetikai áramlat kialakításában. [P/6]

• **Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak visszautas logisztikai rendszer**

A visszautas logisztikai rendszer entitásai a következők:

- Elektronikus, elektromos hulladék kezelés, komponensre bontás
- Storagekénti hasznosítás külső felek számára (is)

Az elektromos akkumulátorok ugyan lehetővé teszik, hogy a villanybuszok zéró emisszióval működjenek, azonban a használt akkumulátorok hasznosítása, az új akkumulátorok gyártási folyamatát is zöldítheti, továbbá egy második életciklus révén fontos energiátárolási lehetőségeket is teremthet. Az akkumulátorok töltési módjának optimalizálása, degradációs folyamatának nyomonkövetése révén szervezhető meg a visszautas logisztikai folyamat.

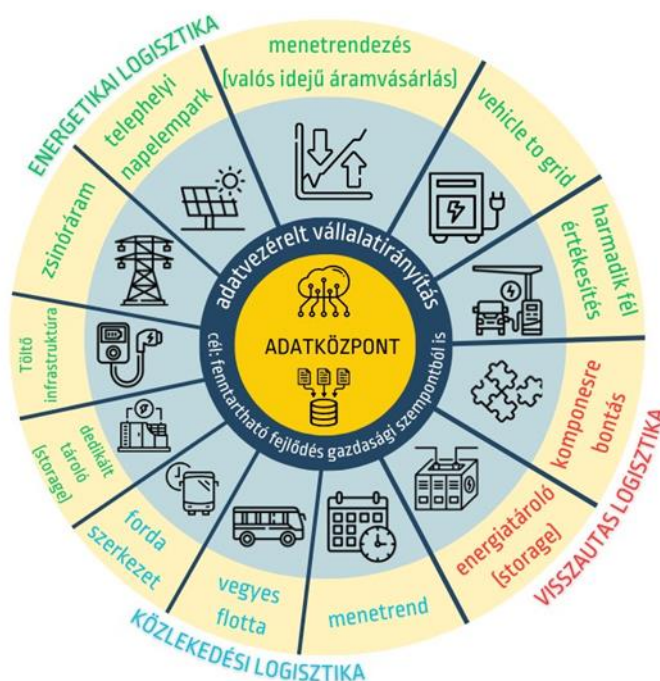
#### 4.1.4 Információs folyamat és entitásai

A 4.1.3 fejezetben bemutatott, körforgásos kapcsolatban lévő logisztikai folyamatok mellett az adatvezérelt működést és az Ipar 4.0 lehetőségeinek kihasználást lehetővé tevő informatikai folyamat és entitásainak ismertetése ebben a fejezetben történik meg. Az adatok köre, fajtája és forrása alapvetően a folyamatokban résztvevő entításokhoz kapcsolódik, ill. ezekből származik. Az információk továbbításának módja az Ipar 4.0 lehetőségeinek kihasználásán, az IoT eszközök alkalmazásával történik. Ez biztosítja a lehetőségét az adatközpont számára az irányítási, vezérlési funkciókhoz szükséges számítások elvégzésére, és az adatalapú és adatvezérelt irányítási rendszer működtetésére.

### AZ INFORMÁCIÓS FOLYAMAT ENTITÁSA

#### - Az adatközpontoz csatlakozó logisztikai entítások

A logisztikai folyamat entitásai informatikai szempontból az adatközpontoz kapcsolódnak, amely logisztikai entításokban keletkezett adatok feldolgozását és az adatvezérelt modell szerinti felhasználásának támogatását az adatközpont biztosítja. (10. ábra) Ez az ábra a 9. ábra bővített változata, amely ugyanazon szín jelöléseket alkalmazza, mint a korábbi logikai ábra.



10. ábra Az adatközpontoz kapcsolódo logisztikai entítások (saját szerkesztés), [P/6]

- **A logisztikai entitásokban keletkező adatok köre, fajtája és forrása**

A logisztikai entitásokban képződő hatalmas adatmennyiséget (Big Data) és -féleséget a **1. táblázat** mutatja be.

**1. táblázat: Az innovatív modell szerinti rendszerben keletkező és felhasznált adatstruktúra adatsomagok szerint**

LOGISZTIKAI FOLYAMATOK	ADATCSOMAG	ENTITÁSOK	Volumen	ADATOK
<b>KÖZLEKEDÉS</b>	KE-FO	FORDASZERKEZET	darabszám	fordák hossza fordaútvonal
	KE-VF	VEGYES FLOTTA Járműtipusok hajtáslánc szerint	darabszám	fajlagos fogyasztás típusonként kW/km akkumulátor kapacitás kWh
		- BEB	darabszám	hatóvolság km fajlagos fogyasztás típusonként liter/100/km
		- DÍZEL	darabszám	fajlagos fogyasztás típusonként kg/100/km
	KE-MR	KÖZLEKEDÉSI MENETREND	darabszám	tervezett menetrendi távolság menetrendi eltérések
	<b>ENERGETIKA</b>	EE-TI	TÖLTŐ INFRASTRUKTÚRA	kapacitás korlát
		- telephelyi töltés		lokáció a fordaútvonalon
		- végállomási töltés	igen/nem	lokáció a fordaútvonalon
		- megállóhelyi töltés	igen/nem	lokáció a fordaútvonalon
		ZSINÓÁRAM		
		- völgy időszaki áram	ár: Ft/kWh - valós idejű adat	számított vételezés volumen
		- csúcsidőszaki áram	ár: Ft/kWh - valós idejű adat	számított vételezés volumen
		- normál	ár: Ft/kWh - valós idejű adat	számított vételezés volumen
EE-NE		TELEPHELYI NAPELEMPARK	teljes beépített kapacitás PkW valós idejű teljesítmény (kW)	számított energiamennyiség kWh
EE-ÁV		ÁRAMVÉTELI MENETRENDEZÉS	fogyasztási jelleggörbe kWh/időszak tárolási jelleggörbe kWh/időszak	
EE-ET	ENERGIATÁROLÓ (STORAGE)	teljes kapacitás	töltés/vételezés számított energiamennyisége	
EE-VG	VEHICEL-TO-GRID		vontató akkumulátor értékesíthető energiamennyisége a hálózatra kWh	

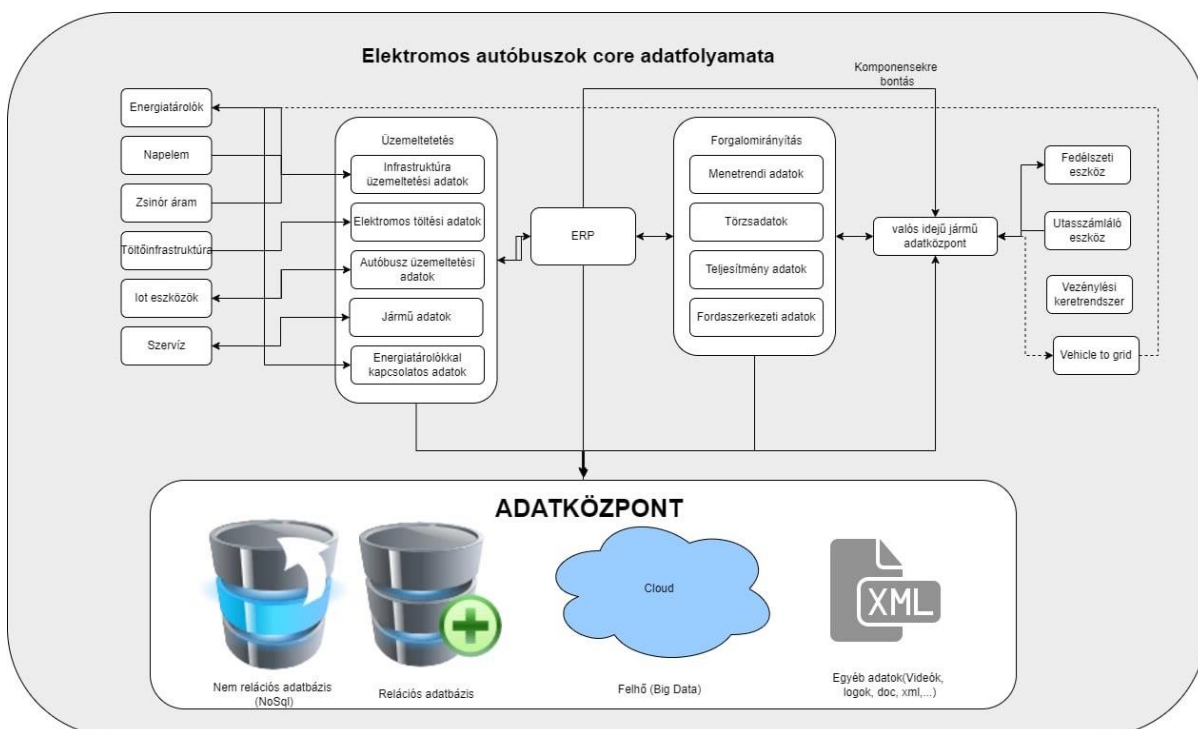


<b>AKKUMULÁTOR</b>	<b>AE--BÜ</b>	<b>BEB ÜZEMBEN LÉVŐ</b>	darabszáma kapacitása	töltöttségi állapota	
				<b>SOH</b>	<b>SOC</b>
	<b>AE-VA</b>	<b>VISSZAUTAS AKKUMULÁTOROK</b> - tároló akkumulátor céljára	darab kapacitása	<b>SOH</b>	értékesítési árbevétel (HUF)
		- komponensre bontott hulladék	mennyisége	műszaki összetétele	értékesítési árbevétel (HUF)

### - Az adatközpont adatfolyamatai

Az adatközpont az adott közlekedési szolgáltató szervezeti és működési szabályainak, folyamatainak megfelelően biztosítja az adatvezérelt vállalatirányítási és döntéshozatali folyamatot.

Az entitásokból az adatok az adatközpont tárházába kerülnek, ahol megtörténik azok feldolgozása. A valós idejű információk alapján végzett információs output a forgalomirányítás, energiagazdálkodás, karbantartási szakapparátushoz kerül továbbításra, és lehetővé teszi az azonnali beavatkozást az adott területen. A **11. ábra** bemutatja az elektromos autóbuszokhoz kapcsolódó core adatfolyamatokat.



11. ábra Az elektromos autóbuszok core adatfolyamata (saját szerkesztés), [P/6]

Az adatközpontot több logisztikai folyamat entitása szolgálja ki adatokkal, ahol elkészülnek és real-time frissülnek az optimális üzemeltetéshez szükséges adatmodellek.

A főbb logisztikai folyamatok és azok entitásai:

- Forgalmirányítás – **Adatforrásai**
  - Fedélzeti IoT eszközök
  - Utasszámláló eszközök
  - Vezénylési, fordaszerkesztési, jegyértékesítési, fődizspécseri keretrendszer
- Forgalmirányítás – **Logisztikai folyamatok**
  - Fordaszerkezet
  - Flotta összetétel
  - Menetrend
- Üzemeltetés – Energetikai **adatforrásai**
  - Töltő infrastruktúra
  - Zsinóráram
  - Telephelyi napelempark
  - Áramvételi menetrendezés
  - Energiatároló (Storage)
  - Vehicel-To-Grid
- Üzemeltetés – Akkumulátorral kapcsolatos **adatforrásai**
  - Beb üzemben lévő
  - Visszautas akkumulátorok
- Üzemeltetési - logisztikai folyamatok
  - Infrastruktúra üzemeltetési folyamatok
  - Elektromos töltési folyamatok (Energia- töltés-felhasználás)
  - Jármű üzemeltetési folyamatok
  - Törzsadatkezelés
  - Energetikai folyamatok (Napelemek, tárolók, zsinóráram, stb....)
- Visszautas logisztikai folyamatok

Ha az elektromos buszok üzemeltetési szemszögéből vizsgáljuk az logisztikai folyamatokat, akkor azt látjuk, hogy három fő adatáramlási entitást lehet megkülönböztetni

- Energetikai logisztikai információs folyamatokból származtatott adatok
- Közlekedés logisztikai adatok
- Visszautas logisztikai adatok

Mindhárom entitásnál meghatározott üzleti folyamatok mentén keletkeznek adatok, amelyek egymástól függetlenül és összemérhetetlenül érkeznek meg egy központi adatsilóba. Ahhoz, hogy ezeket később felhasználhatóvá tegyük először az adatokat konszolidálni kell és egy egységes meta struktúrát kell hozzájuk rendelni, és egy adatközpontba kell áthelyezni, hogy a későbbi Üzleti intelligencia elemzésekhez rendelkezésre álljanak. Ez az adatközpont és metarendszer garantálja, hogy az üzleti döntéshozatal minden szintjén ne következhesen be információtorzulás.

#### - **Adatvezérelt vállalatirányítás**

A logisztikai folyamatokban keletkező meglévő adatvagyonnak, és az új technológiák bevezetésével keletkező Big data adatok (IoT, Autóbuszról származó Real-time adatok, eseményvezérelt irányítási adatok) kialakításához egy modern, szolgáltatás orientált és kellően

rugalmas adatelemzési platform bevezetése szükséges. Ahhoz, hogy ezeket a létező logisztikai entitásokból jövő adatokat tudjuk kezelni szükséges:

- Valós időben keletkező adatok és meglévő statikus rendszerekben tárolt adatok felett egységes adatelemzési réteg kialakítása. Eltérő struktúrájú és formátumú adatok egységes kezelése, több adattárolási megoldás egységes menedzsmentje. Adatköri metaadatok egységesítése. (PL A CAN-buszon mér fogyasztás tartalmazza-e a rekuperációs energiát, vagy hol mérjük az elektromos meghajtás fogyasztását?)
- Adattisztaság biztosítása és megbízható üzleti adatok előállítása. ( Extrém adatok szűrése , logok elemződése AI-val)
- Statisztikai és mesterséges intelligencia alapú elemzések hatékony elvégzése.
- A kapott eredmények visszacsatolása lehetővé teszi az autóbusszfordák optimalizálását, az autóbusszvezetői stílusok, szokások elemzését, az energiavisszanyerésre és elektromos áram vásárlására vonatkozó prediktív döntések meghozatalát.
- Személyszállításhoz kapcsolódó szolgáltatások javítása trendek és előrejelzések alapján.
- Vezetői dashboardok létrehozása.
- Központi adatvagyon katalógus kialakítása, melyben az üzletileg osztályozott meta-adatok elérhetők, adatbiztonsági kategóriákba szervezhető, kereshető, szerepkör szerint maszkolva megtekinthető.

Az **12. ábra** foglalja össze az adatvezérelt vállalatirányítás top-down hierarchiáját. Az adatvezérelt vállalatirányítás az adatokra épülő döntéshozatalt helyezi a középpontba a szervezet minden szintjén. A top-down megközelítés azt jelenti, hogy a vállalati vezetés a rendelkezésre álló adatok alapján határozza meg a stratégiát, célokat és operatív döntéseket, majd ezek az irányelvek kerülnek felfelé az operatív szervezeti szintekre.



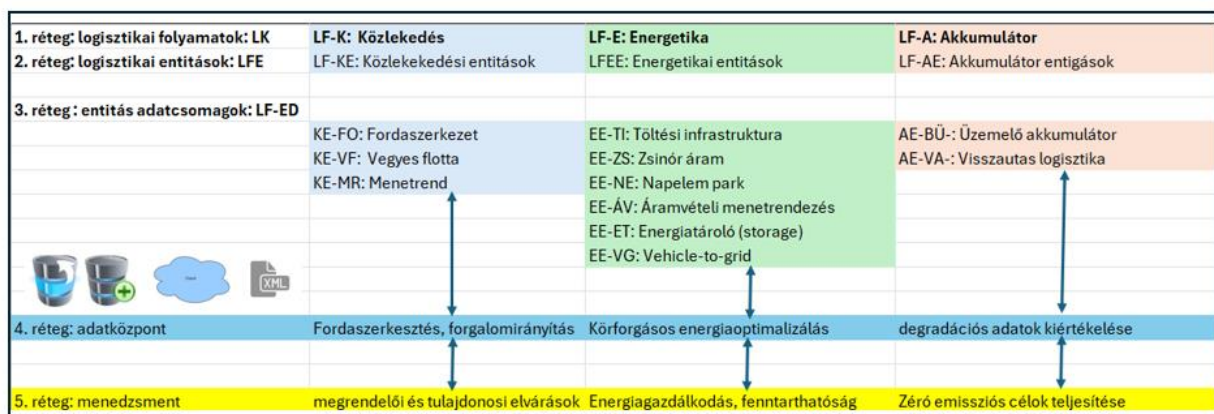
12. ábra Adatvezérelt vállalatirányítási rendszer logikai ábrája (saját szerkesztés), [P/6]

## Főbb jellemzők:

1. **Adatalapú döntéshozatal:** Ebben a modellben a döntések és irányelvek fentről lefelé terjednek. Először definiáljuk az üzleti célokat és a hozzájuk tartozó adatokat. Az adatok biztosítják a tényeken alapuló megközelítést, amely csökkenti a kockázatokat és növeli a döntések pontosságát.
2. **Top-down irányítás:** A top-down megközelítésben a felsővezetés határozza meg a stratégiai célokat és azokat a kulcsfontosságú mérőszámokat (KPI-kat), amelyek mentén a teljes szervezet teljesítményét mérik. Az alsóbb szintek ennek megfelelően alakítják az adatgyűjtést és adatfeldolgozást és a hozzájuk tartozó tevékenységeket.
3. **Szabványosított adathasználat:** A modell lényege, hogy egységesítsük a modellben használt adatokat, amelyeknek szabványosítottnak kell lenniük, hogy egységesen értelmezhetők és összehasonlíthatók legyenek. Ez lehetővé teszi az összehangolt célkitűzéseket és teljesítménymérést.

## 4.2 Az üzemeltetési rendszer holisztikus modellje

Azt az innovatív ökoszisztémát, amely lehetővé teszi az üzemeltetés adatvezérelt és fenntartható működtetését a **13. ábra** szemlélteti. Az ábra megmutatja a **4. fejezetben** leírt folyamatok és azok entitásai között fennálló rendszer-, informatikai, adat- és irányítási kapcsolatokat. Az ábra baloldali oszlopában a modell első rétegét a három (a korábban is használt kék, zöld és piros színjelöléssel ellátott) logisztikai folyamata jelenti, amely alatt vannak a hozzájuk tartozó entitások, és a 3. rétegben az entitásokban keletkező adatcsomagok. A negyedik rétegben az adatközpontban feldolgozásra kerülnek az 1. táblázat szerinti adatcsomagok szerinti adatok a **11. ábra** szerinti core adatfolyamatban. Végül az 5. réteget jelentő menedzsment rétegben valósul meg a **12. ábrán** bemutatott adatvezérelt vállalatirányítási rendszer, amely egyaránt figyelembe veszi és teljesíti a felelős megrendelő és a tulajdonos elvárásait, tekintetbe veszi az energiabiztonsági és a klímacélok teljesítését.



13. ábra Autóbuszflottát üzemeltető vállalat innovatív működési modellje (saját szerkesztés), [P/6]

A **4. fejezetben** bemutatott adatokon alapuló gazdasági számításoka és a vállalati irányítási rendszerben való felhasználásukat az **1. melléklet** tartalmazza egy a Volánbusz Zrt.-re vonatkozó

esettanulmány formájában. Az esettanulmányban kettő gazdasági modellt ismertetek, amely támaszkodik az első hipotézisemben megalkotott elméleti keretrendszerre.

Az első modellben az elektromos és dízelbuszok összehasonlításakor kizárólag az üzemanyagárakat vizsgáltam 20 éves időtartamra. Ebben a modellben nem telepítetek sem napelemet sem tárolót, csupán a legszükségesebb töltőinfrastruktúrát építem ki. Az első változatban a megtérülés az elektromos autóbuszok esetében minimum 250 Km/nap futásteljesítményt figyelembe véve – átlagosan a Volánbusznál az autóbuszok 300 Km/ napi futásteljesítmény van – és az áram ára körülbelül egyharmada a dízel árának, akkor a megtérülés 20 éven belül megvalósul, így érdemes 1000 db dízelbuszt elektromos autóbuszra cserélni.

Második modellben már napelemeket és hozzájuk tartozó tárolókat is telepítetek a telephelyeimen. A megtermelt áramot, amelyet saját felhasználásra már nem tudom elfogyasztani értékesítem, így az értékesítésből származó bevétel javítja a megtérülést. A modell szerint, amennyiben a megtermelt áram 50%-át értékesíteni tudom, 20 éven belül megtérül ez a beruházás is. A lehetséges kimenetek alapján bátran kijelenthetem, hogy megvalósítható olyan zöld átmenet Volánbusz Zrt. életében, amely nem csupán környezeti, hanem gazdasági szempontok alapján is hosszútávon fenntartható. Természetesen a megtérülést mindkét esetben nagyban befolyásolja az áram és a dízel árának különbözete, továbbá a napon belüli áramár ingadozás, de az energiára hosszútávú előrejelzése alapján az áram dízel ár közötti jelentős különbség fennmarad, így a megtérülés is biztosított. A modellek részletes ismertetése, azok paraméterei és lehetséges kimenetei megtalálhatóak a disszertáció függelékében.

Ebben a fejezetben az első hipotézisem igazolásához megalkottam egy új, innovatív működési modellt, amely segítségével az autóbust üzemeltető vállalatok, meg tudnak felelni a környezetvédelmi előírásoknak, jelentősen csökkenteni tudják a károsanyag kibocsátásukat oly módon, hogy gazdaságilag is fenntartható legyen működésük. Részletesen ismertettem a közlekedés, visszautas és az energetikai logisztika adatáramlási folyamatait és az ezekre épülő döntési módszertant. Az elméleti modellem igazolását gyakorlatban is igazoltam, amely részletes ismertetése a függelékben megtalálható. Bemutattam, hogy adott paraméterek és működési modell mellett gazdaságilag is fenntartható a zöld átállás, így egy vállalat életében hosszútávon biztosítható a környezetvédelmi célkitűzések.

## ELSŐ TÉZIS

**A 4. fejezetben bemutatott eredmények alapján fogalmaztam meg I. tézisem. Feltártam az eddig az autóbusszal szolgáltató közúti közlekedési vállalkozásoknál alkalmazott üzemeltetési modellek eredményeit és hiányosságait, és egy innovatív, adatvezérelt, körforgásos logisztika modell alkottam, amelyben a közlekedési, energetikai és visszautas logisztikai folyamatok összekapcsolva egy gazdaságilag, környezetvédelmileg és társadalmilag fenntartható működés biztosítható. [P/1],[P/2], [P/3], [P/4], [P/5], [P/6]**

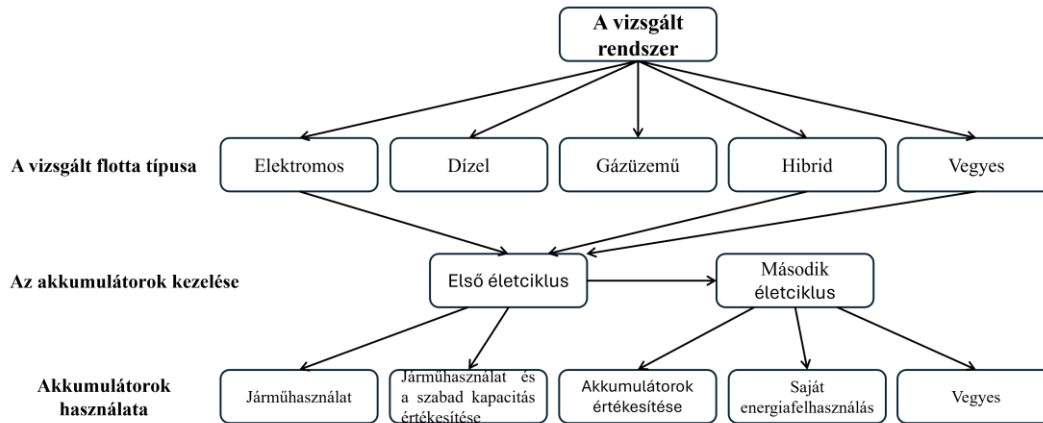
## 5 Autóbuszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntés modell és módszer kidolgozása

Az üzemeltető társaság számára megfelelő flotta kiválasztása számos döntési szempont figyelembevételét, valamint egy normalizálás alapú, minden lényeges szempontot figyelembe vevő döntési módszer alkalmazását igényli. Ez a fejezet ismerteti a figyelembe vehető rendszerváltozatokat, valamint a megfelelő flotta kiválasztásának kritériumait és döntési módját.

### 5.1 A tesztelhető rendszerváltozatok leírása

A kidolgozott döntéshozatali módszer minden közszolgáltató autóbusz-szolgáltatásban részt vevő társaságra alkalmazható, függetlenül a vizsgált flotta típusától és az akkumulátorok kezelésének és felhasználásának módjától. A vizsgálati lehetőségeket a **14. ábra** tartalmazza. A vizsgálat során egy adott járműtípusból álló - az elvárt napi futásteljesítmény elérésére alkalmas - flotta optimális kiválasztására kerül sor. Ha a vizsgálat elektromos flottát is tartalmaz, akkor csak az akkumulátorok első, illetve első és második életciklus-hatásait lehet figyelembe venni. Az akkumulátorok első életciklusában vizsgálható a járművek üzemeltetésének és a szabad kapacitás értékesítésének lehetősége is az áramszolgáltatónak. Ha az akkumulátorok kapacitása egy előre meghatározott határ alá esik, és hosszabb ideig képesek ellátni a szükséges feladatokat, azaz a napi futásteljesítményt, akkor másodlagos használat válik szükségessé. Ez utóbbi magában foglalhatja a következőket: az akkumulátor értékesítése a piacon, például tárolás céljából; mint saját tartalék, például a nap- vagy

szélergia által termelt energia tárolása, a csúcsidőszaki villamos energia tárolása a járművek meghajtására csúcsidőszakban stb.; vagy ezek kombinációja.



14. ábra Tesztelhető rendszer változatok leírása (saját szerkesztés), [P/7]

## 5.2 A döntéshozatali módszer ismertetése

Az optimális flottatípusú meghatározásához a következő lépések végrehajtása szükséges:

### 5.2.1 A flottahasználat követelményeinek meghatározása

Ebben a részben a flotta üzemeltetése során teljesítendő követelmények kerülnek meghatározásra, melyek közül a legfontosabbak a következők:

- átlagos környezeti hőmérséklet és annak ingadozása,
- a járművek várható átlagsebessége,
- várható futásteljesítmény,
- rendelkezésre álló erőforrások,
- környezeti követelmények,
- rendelkezésre álló és működőképes infrastruktúra

### 5.2.2 A megvásárlandó járművek számának meghatározása

A szolgáltatás előre jelzett futásteljesítményének megtételéhez és a megfelelő szolgáltatási színvonal (SLA) biztosításához szükséges gépjárművek számának meghatározása

### 5.2.3 A vizsgálandó járműtípusok meghatározása

Ebben a lépésben határozzuk meg azokat a járműtípusokat, amelyek megfelelnek az 1. lépés követelményeinek és az üzemeltető igényeinek.

### 5.2.4 A döntési kritériumok meghatározása

Számos értékelési módszer alapvető problémája, hogy csak költségalapú összehasonlítást végeznek, anélkül, hogy figyelembe vennének más tényezőket, mint például a minőségi és a szubjektív szempontok. Az általunk kidolgozott döntéshozatali módszer alkalmazásakor a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- Teljes tulajdonlási költség (TCO),
- Karbonlábnyom,
- Ügyfél- és utaselégedettségi tényező
- A célfüggvény értékeinek normalizálása
- A megvásárolni kívánt flotta típusának kiválasztása

#### 5.2.4.1 Teljes tulajdonlási költség (TCO)

Ez a jármű beszerzésére fordított beruházási ráfordítás (CAPEX) és a kapcsolódó üzemeltetési költségek (OPEX) összege. A modell nem veszi figyelembe az inflációt és az értékcsökkenést, mivel ez a két tényező egyformán befolyásolja mind az elektromos, mind a dízelbuszok gazdasági megtérülési rátáit. A szakirodalmi definíciók nem veszik figyelembe az akkumulátorok lehetséges második életciklusát, amely az üzleti gyakorlatban egyre inkább költségcsökkentő tényezővé válik. Ennek megfelelően a vizsgált flottatípus TCO-ját a következőképpen kell meghatározni.

Tőkeráfordítás a vizsgált időszakra:

$$C_i^{CAP} = C_i^{AMv} + C_i^{AMI} - R_i^{II} - R_i^O, \quad (5.1)$$

ahol:

- $C_i^{AMv}$ : az  $i$  típusú flotta járművei amortizációs költségének jelenértéke
- $C_i^{AMI}$ : az  $i$  típusú flotta infrastruktúra amortizációs költségének jelenértéke
- $R_i^{II}$ : az  $i$  típusú flotta járművei akkumulátorainak második életciklusából származó többletbevétel jelenértéke
- $R_i^O$ : az  $i$  típusú flotta járművei és a kapcsolódó infrastruktúra eladásából származó bevétel jelenértéke

Működési költségek a vizsgált időszakban:

$$C_i^{OP} = C_i^{OPM} + C_i^{OPF} + C_i^{OPS} + C_i^{OPo}, \quad (5.2)$$

ahol:

- $C_i^{OPM}$ : az  $i$  típusú flotta karbantartási költségeinek jelenértéke
- $C_i^{OPF}$ : az  $i$  típusú flotta üzemanyag költségeinek jelenértéke
- $C_i^{OPS}$ : az  $i$  típusú flotta humán ráfordításainak jelenértéke
- $C_i^{OPo}$ : az  $i$  típusú flotta egyéb költségeinek (pl. útdíj, parkolás, stb.) jelenértéke

Teljes tulajdonlási költség a vizsgált időszakban:



$$C_i^{TCO} = C_i^{CAP} + C_i^{OP} \quad (5.3)$$

#### 5.2.4.2 Karbonlábnyom

Ez a mutató azt fejezi ki, hogy a vizsgált időszakban egy adott járműtípushoz tartozó flotta gyártásához és későbbi üzemeltetéséhez mennyi szén-dioxid-egyenérték üvegházhatású gáz keletkezik. Ez egy fontos mutató a fenntarthatóság szempontjából, és a flottatípusnál  $CF_i$  -ként jelöljük.

#### 5.2.4.3 Ügyfél- és utaselégedettségi tényező

Ez egy szubjektív mutató, amely kifejezi a vásárlók várható elégedettségét egy adott flottatípussal (pl. biztosított szolgáltatások, járműtípus megbízhatósága). A mutató meghatározása a szolgáltatást igénybe vevők körében végzett felmérés alapján történik, és az  $i$  flottatípusnál  $CS_i$  -vel jelöljük. Ennél a mutatónál az értékek 1-től 10-ig terjednek (a 10 a legjobb értékelés).

#### 5.2.4.4 A célfüggvény értékeinek normalizálása

Ebben a lépésben határozzuk meg a döntés szempontjából releváns döntési kritériumok értékeit, majd normalizáljuk ezeket. A normalizálás során a definiált értékeket úgy alakítjuk át, hogy 0 és 1 közé kerüljenek, így bekerülhetnek a célfüggvénybe.

A teljes birtoklási költség normalizálása

$$C^{TCO(max)} = \max_i \{C_i^{TCO}\} \quad (5.4)$$

A karbonlábnyom értékének normalizálása:

$$CF^{(max)} = \max_i \{CF_i\} \quad (5.5)$$

$$\alpha_i^2 = CF_i / CF^{(max)} \quad (5.6)$$

Ügyfél- és utaselégedettségi tényező normalizálása:

$$CS^{(max)} = \max_i \{CS_i\} \quad (5.7)$$

$$\alpha_i^3 = 1 - CS_i / CS^{(max)} \quad (5.8)$$

#### 5.2.4.5 A megvásárolni kívánt flotta típusának kiválasztása

Ebben a lépésben a szóban forgó vállalat szakértőinek meg kell határozniuk az egyes értékelési szempontok súlyozását fontossági sorrendben (ezek összege 1 legyen, ahogy az alábbiakban látható). Ezt követően kialakul a normalizált célfüggvény összetevőinek súlyozott összege, így a minimális értékű flottatípus a legmegfelelőbb választás a vállalat szempontjai szerint

A célfüggvény komponensek súlyának meghatározása:

$$0 \leq \partial_h \leq 1, \quad (5.9)$$

$$\sum_{h=1}^3 \partial_h = 1$$

A célfüggvény meghatározása:

$$F = \min_{\gamma} \sum_{h=1}^3 \partial_h \cdot \alpha_{\gamma}^h \quad (5.10)$$

### 5.3 Esettanulmány: A döntéshozatali módszer alkalmazása a Volánbusz Zrt.-nél

A vizsgált rendszer Magyarország legnagyobb tömegközlekedési autóbusz-társasága, a Volánbusz Zrt. vegyes elektromos és dízel autóbusz-flottájának üzemeltetésére vonatkozik. A döntéshozatali módszer kidolgozásának célja, hogy az adott körülmények között kiválasszassa azt a flottát, amely a jövőben leginkább megfelel a cég kritériumainak. Az előzetes felmérések alapján a cég követelményeinek kétféle flotta felel meg: egy dízel és egy elektromos.

Az előző pontban ismertetett döntéshozatali módszernél csak a teljes életciklus költségét vettük figyelembe, feltételezve, hogy már csak ezen mutató alapján is az elektromos busz a jobb választás (az elektromos busz szénlábnyoma egyértelműen jobb, és a vevői elégedettség szempontjából nincs jelentős különbség a lehetőségek között). Vállalati titoktartási okokból nagy mennyiségű tényszerű adat nem tehető közzé, de az alábbi általános következtetések vonhatók le:

- az akkumulátorok költsége a megvásárolni kívánt elektromos buszok árának közel 50%-át teszi ki, de ez a jövőben várhatóan csökkenni fog,

- a feladatok elvégzéséhez szükséges teljesítmény 300-320 kW körül van, így egy 400 kW-os akkumulátornál akár 25%-os leromlás is elfogadható,

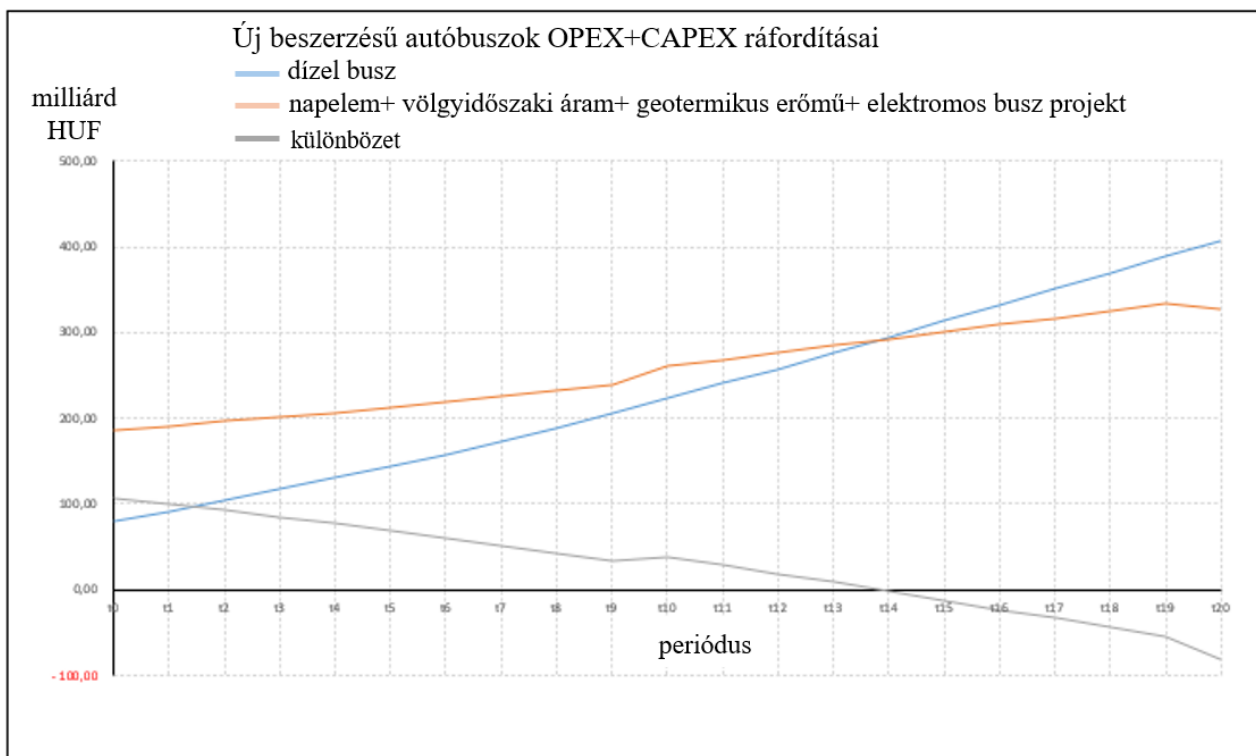
- tapasztalati mérések szerint az elektromos buszok átlagos fogyasztása 1 kWh/km,

- az akkumulátorok leromlást követő második életciklusa jelentős tényező a költségek csökkentésében/a bevétel növelésében,

- a leromlási mérések azt mutatják, hogy az akkumulátorokat 6-8 év után fokozatosan kivonják a járművekből a kapacitásvesztés miatt, miközben a jelentős fennmaradó kapacitás a második életciklusban felhasználható,

- Az elektromos buszok karbantartási költsége körülbelül a fele a dízelbuszokénak.

Az akkumulátorok második életciklusának hatását TCO-értékére a **15. ábra** mutatja, összehasonlítva az elektromos és dízel üzemű autóbuszokat.



15. ábra Elektromos és dízel autóbuszok TCO összehasonlítása ((saját szerkesztés, forrás Volánbusz Zrt.)

Látható, hogy a vizsgált flottatípusoknál az elektromos buszok használata már 12,4 év után előnyösebb a cég számára. Természetesen az a tény, hogy az elektromos buszok szénlábnyma előnyösebb, mint dízel társaiké, illetve, hogy a vevői elégedettség tekintetében nincs jelentős különbség, súlyt ad a döntésnek.

#### 5.4 Az esettanulmány kapcsán levonható következtetések

Tartós és visszafordíthatatlan tendenciának tekinthető az elektromos járművek elterjedése a közlekedésben, amelyet az Európai Unió klímavédelmi törekvései nyomán kialakult jogszabályok és környezetvédelmi elvárások is megerősítenek. A Magyarországon működő Volánbusz Zrt. autóbusz-flottája már úgynevezett vegyes flottának számít. A menetrend szerinti járatokban használt elektromos autóbuszok aránya 2032-re várhatóan eléri az 50%-ot, jelenleg 0,9%. Az elektromos autóbuszok üzemeltetése egyre inkább hangsúlyozza az akkumulátorok kapacitásának, élettartamának és öregedési folyamatának (leépülésének) fontosságát. Ezért a Volánbusz Zrt. már a fenntartható működést jelentősen befolyásoló újrahasznosítási stratégia megvalósítására összpontosít, beleértve a lítium-ion akkumulátorok második életciklusának tervezését is.

A részletes irodalmi elemzés eredményeként megállapítottuk, hogy az ideális flottakiválasztási folyamatból több lényeges összetevő hiányzik, ami hibás döntéshozatalhoz vezet. E tényezők közé tartozik az akkumulátorok másodlagos életciklusának, a fenntarthatóságnak és a logisztikának a figyelembevétele. Egy általános és innovatív döntéshozatali módszert dolgoztunk ki, amely ezeket a hiányosságokat orvosolja a megfelelő flottatípus kiválasztásában. A módszer helyességét a Volánbusz Zrt. adatai alapján esettanulmány igazolta. Kutatásunk következő szakaszában az akkumulátorok másodlagos életciklusához kapcsolódó innovatív működési modellek kidolgozását tervezzük.

**A 5. fejezetben bemutatott eredmények alapján fogalmaztam meg II. tézisem. Feltártam azokat a szempontokat, kritériumokat és tényezőket, amelyek az innovatív üzemeltetési modellben a közlekedéslogisztikai folyamat releváns entitásai, az autóbuszflotta optimális kialakításának módszertanát és döntéshozatali modelljét meghatározzák. Elemeztem a döntési elemzési modelleket, majd alkalmaztam az életciklus-költségelemzést, melyben a teljes életciklusra eső költségeit határoztam meg a dízel és az elektromos autóbustípusokra. Végül meghatároztam az autóbuszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételét szolgáló döntési modellt. [P/7],[P/8],**

## **6 Elektromos autóbuszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában innovatív újrahasznosítási modellek feltárása**

Az elektrifikációra alapozott technológiai transzformáció együtt kell, hogy járjon a dekarbonizációs célok megvalósításával és a közlekedési ökoszisztéma ún. „nettó-zéró” működtetésének megvalósításával is.

Az akkumulátorok visszautas logisztikai folyamata megteremti a körforgásos kapcsolatot az energetikai ellátás folyamataival (lásd 4. fejezet) és az újrahasznosítás során lényegesen hozzájárul a klímacélok teljesítéséhez.

A dekarbonizációs feladatok egy jelentős hányada kapcsolódik az elektromos autóbuszokban használt akkumulátorokhoz. A későbbi fejezetek azt tárják fel, hogy milyen jellegű kérdések merülnek fel az akkumulátoréletről, és milyen megoldások alkalmazhatók a problémák kezelésére. Az elektromos autóbuszok térhódításával együtt jár a gépjármű akkumulátor (EVB Electric Vehicle Battery) igény növekedése, ezért célszerű áttekinteni az akkumulátoros elektromos autóbuszok (BEV) közlekedési ágazatbeli regisztrációjának dinamikus felfutását az utóbbi évek tekintetében.

A piacra kerülő akkumulátorok számának növekedésével együtt nőtt az igény az akkumulátorok életről meghosszabbítására is. Azzal is szembe kellett nézni, hogy bár a lítium-ion akkumulátorok abban az értelemben nem mérgezőek, mint ólom-savas vagy nikkel-kadmium akkumulátorok, tartalmaznak azonban olyan elemeket, amelyek környezetbe kerülését meg kell akadályozni. De legalább ugyanilyen fontos az újrafelhasználható anyagok visszanyerése a használt, selejt akkumulátorokból. A piac soha nem látott növekedésével a nyersanyagok iránti kereslet jelentősen megnőtt, és az újrahasznosítás nagy mértékben elősegíti a környezeti és gazdasági szempontok érvényesülését.

Az elektromos járművek (EV), köztük az elektromos autóbuszok gyártói számára egyre világosabbá válik az az ellentmondás, hogy míg az elektromos járművek a dekarbonizáció szempontjából tisztának tekinthetők, addig az akkumulátoraik előállításához erősen karbon intenzív tevékenység. A probléma a fenntarthatóság szempontjából nem csupán a klímavédelmi törekvések oldaláról jelentkezik, hanem gazdasági oldalról is. Az akkumulátorok előállításához szükséges nyersanyagok és ásványkincsek fogytán vannak, hosszabb távon tehát akár az akkumulátorhiány akadályozhatja az elektromos járművek elterjedését. A 2022. évi Világgazdasági Fórumon (WEF) ezt a kihívást így fogalmazták meg: „A világnak 2 milliárd elektromos járműre van szüksége ahhoz, hogy a net-zéró célkitűzést elérhesse. De van-e elég lítium az összes akkumulátor elkészítéséhez?” [82]

A számítások azt mutatják, hogy a globális tartalékok alig 2,5 milliárd akkumulátor előállításához elegendőek. A Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) Net Zero 2050-ig szóló ütemterve szerint a világnak 2 milliárd akkumulátoros elektromos, plug-in hibrid és üzemanyagcellás elektromos könnyű tehergépjárműre lesz szüksége addig az időpontig, hogy elérje a nettó nulla kibocsátást. A világ összes lítiumtartalma azonban nem kerülhet csak elektromos járművek akkumulátoraiba. A fémeket számos egyéb elemhez, például laptopokhoz és mobiltelefonokhoz, valamint repülőgépek, vonatok és kerékpárok gyártásához is használják. [83]

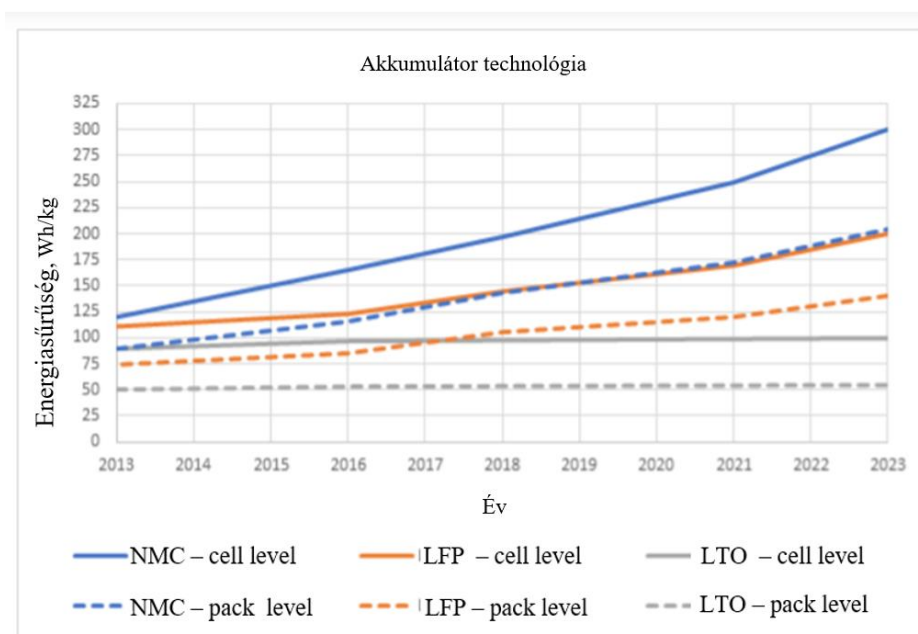
Ráadásul az akkumulátoroknak a járműhöz képesti rövidebb élettartama ronthatja a járművek teljes élettartam költségének (TCO) csökkentésére irányuló erőfeszítéseket. Egy 2023-ban készült elemzés [80] szerint az akkumulátorok felelnek ugyanis az elektromos járműgyártás során keletkező üvegházhatású gázkibocsátás közel 60%-áért.

Az akkumulátorokra alapozott elektrifikáció hosszú távú szerepe a gazdasági szakemberek és a tudományos kutatók körében is napjaink egyik leginkább előtérbe kerülő témája és ez hazánkra vonatkoztatva is különösen igaz, a társadalom és lakosság széles körét foglalkoztató kérdés. Az akkumulátorgyártás és -technológiák rohamos fejlődése, a nyersanyagok szűkössége és használt akkumulátorok kezelése egyaránt hatással van az iparban felhasznált akkumulátor típusok keresletére és beszerzési árára, ami viszont egyaránt befolyásolja mind az elektromos járművek, mind azok vontató akkumulátorainak élettartamát és teljes tulajdonlási költségét (TCO). Különösen fontos tehát hogy az elektromos autóbuszflották kialakítása tekintetében tisztában legyünk az akkumulátor technológiák nyújtotta előnyökkel és hátrányokkal, az egyes akkumulátor típusok várható

életciklusával és az akkumulátor csomagok (battery pack) árára jellemző trendekkel. A következő fejezetben rövid betekintést adók ezekbe a kérdésekbe.

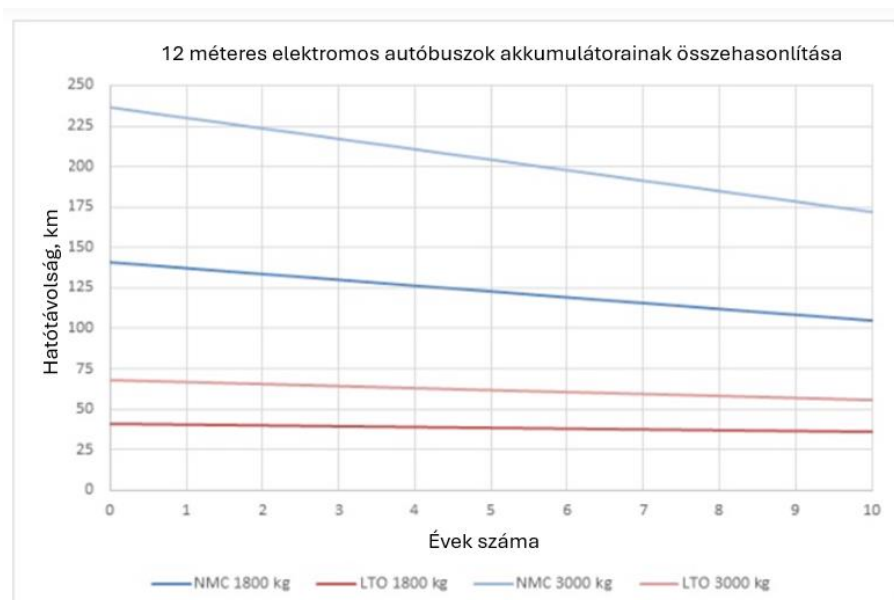
## 6.1 Akkumulátor technológiák, életciklus és ár összehasonlítás

Mint ahogyan az élet minden szegmensében, a lítium-ion akkumulátorok az elektromos járművekben is alkalmazást nyertek, és a technológia fejlődésével megindult a verseny a kWh/km-ben mért energiafogyasztás, akkumulátorok össztömegének csökkentése és a legmagasabb energiasűrűség elérése érdekében. A lítium-ion technológiák három legnépszerűbb típusát jelző mozaikszavak a sejtkemiában használt ásványi anyagok angol nyelvű rövidített megnevezéséből származnak, azaz LTO (Lithium Titanium Oxid), az LFP (Lithium iron phosphate) és az NMC (Nickel Manganese Cobalt). Az **16. ábra** mutatja, hogy a *BMZ POLAND*, 2021 elemzése [84] szerint az NMC az energiasűrűség, de az egység súly és térfogat tekintetében is vezető szerepet tölt be.



16. ábra Az NMC, LFP és LTO technológiák fejlődésének összehasonlítása az energiasűrűség tekintetében cella és akkumulátor csomag szinten. [84]

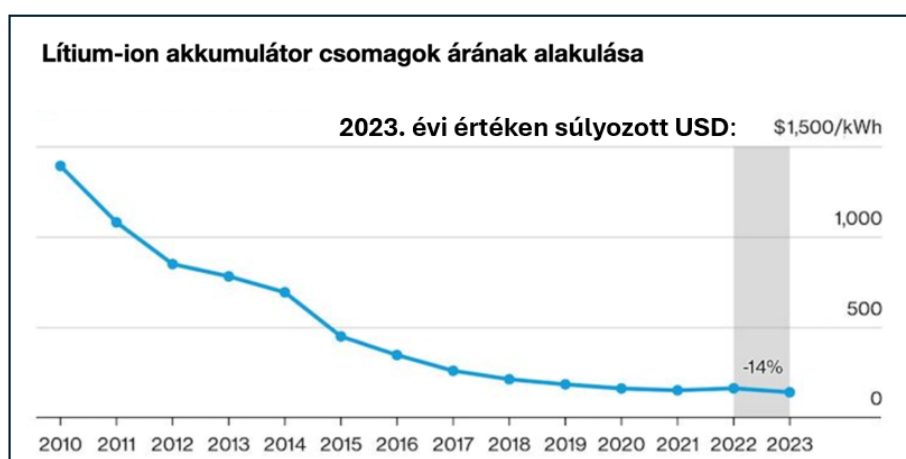
A **17. ábrán** egy 12 méteres elektromos autóbuszba beépített, négy különböző típusú vontató akkumulátor ( NMC 1800 kg, LTO 1800 kg, NMC 3000 kg, LTO 3000 kg) összehasonlítása látható. 60000 km éves futási teljesítmény esetében jól érzékelhető a hatótávolságok típustól függő 70-80 %os csökkenése.



17. ábra Az NMC és LTO akkumulátor összehasonlítás egy 12 méteres elektromos autóbusz esetében 10 éves időtartam alatt a hatótávolság tekintetében, BMZ Polan, 2021 [84]

A hatótávolság csökkenése erősen befolyásolja az adott elektromos autóbusz napi forda távolságának teljesíthetőségét és ezáltal szükségessé teszi vagy a vegyes autóbuszflotta járműösszetételének változtatását, vagy a vontató akkumulátor csomag cseréjét, végső esetben a forda áttervezését. A megfelelő méretű akkumulátorral ellátott elektromos autóbusz kiválasztásának jelentősége meghatározó a megfelelő szolgáltatás biztosítása szempontjából, hiszen az akkumulátor cseréjének az akkumulátorok árának alakulása döntően befolyásolja.

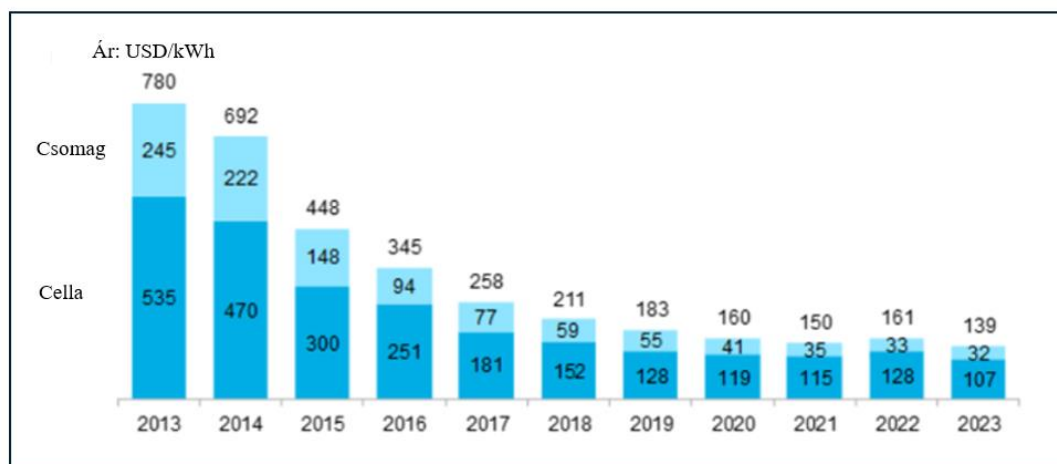
A 18. ábrán a BloombergNEF, 2023 elemzése [85] alapján Pataki, 2024 [86] szerkesztésében készült grafikon mutatja a lítium-ion akkumulátor csomagok árának alakulását 2010-től 2023-ig. Látható, hogy folyamatos csökkenő tendencia mellett az árak USD/kWh-ban számított súlyozott átlaga 2023-ra 14%-kal csökkent.



18. ábra Lítium-ion akkumulátor csomagok árának összehasonlítása, BloombergNEF, 2023, [85]

Az ábrán szereplő értékek elektromos személygépkocsik, haszongépjárművek, autóbuszok, két- és négykerekű járművek és stacionárius energiaforrásokban használt lítium-ion akkumulátorok árának súlyozott átlagaként értendők.

Értékes információval szolgál a **19. ábra [85]** a lítium-ion akkumulátor csomagok és cellák árának alakulásáról, amelyek az előzőekhez hasonlóan képzett súlyozott átlagon alapulnak 303 adatforrás felhasználásával.



19. ábra Lítium-ion akkumulátor csomag és cella árának összehasonlítása 2013-2023 közötti időszakban, BloombergNEF, 2023, [85]

A grafikon alapján megállapítható, hogy 1 kWh kapacitás ára 10 év alatt 780 USD-ről 139 USD-re, a kezdő ár 17,8 %-ára csökkent, ami kedvező tendencia mind a OPEC, mind a CAPEX számítása szempontjából.

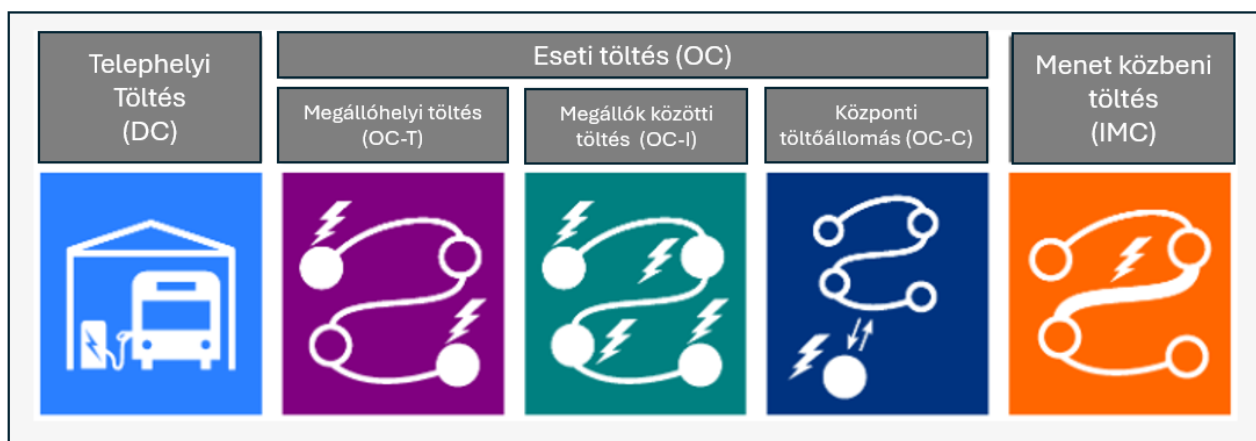
Az üzemeltető számára a teljes birtoklási költség (TCO) szempontjából középtávon optimális flotta kialakítását azonban az is befolyásolja, hogy melyik akkumulátor típus lesz a jövő akkumulátora, milyen technológiák jelentik a jelenleg domináló lítium-ion akkumulátorok kihívóit. A lítium-ion (Li-ion) akkumulátorok mellett megjelentek a lítium-vasfoszfát (LFP) akkumulátorok, amelyek olcsóbbak és hosszabb élettartamúak, bár alacsonyabb energiasűrűségűek. További előnyük, hogy kevésbé gyúlékonyak, és élettartamuk alatt akár 10,000 ciklust is kibírnak komolyabb degradáció nélkül. [86]

A modern nátrium-ion (Na-ion, NIB) akkumulátorok elsősorban energiatárolásra alkalmasak, különösen a megújuló energia túlermelésének gazdaságos tárolására. A nátrium-alapú akkumulátorok nagy előnye, hogy nem gyúlékonyak, és akár 50,000 töltési ciklust is kibírnak, ami tízszerese a lítium-ion akkumulátorok töltési ciklusainak. [86]

## 6.2 Az akkumulátorok töltésének illesztése a fordaszerkezetbe

Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak töltési módja, a töltők kiválasztása, azaz a töltési stratégiai az e-mobilitás egyik sarkalatos pontja és alapvetően befolyásolja a rendszer életciklus költségeit, a közösségi közlekedés infrastruktúrájának és szolgáltatási folyamatainak kialakítását. Ezáltal egy új szervezeti-működési struktúra megvalósítását igényli.





20. ábra Elektromos autóbuszok töltési stratégiái Jefferies, 2020, [68]

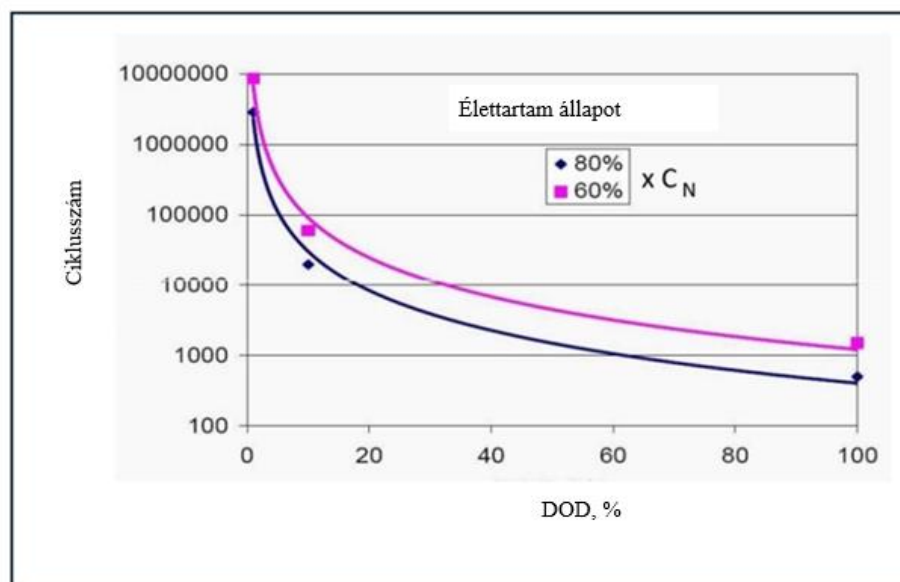
A töltési folyamat nagyban befolyásolja a forda kialakítását, hiszen figyelemmel kell lenni a várakozási és töltési időkre is. A közlekedési szolgáltatók alapvetően három csoportba sorolható töltési módot alkalmazhatnak. A telephelyi vagy depó (DC) töltés megfelelő hálózati erőforrások esetén zsinóráramról történik, ugyanakkor a telephelyekre telepített napelemparkokból származó elektromos töltési energia is egyre gyakoribb. Az eseti töltés (OC opportunity charging) lehet megállóhelyi (OC-T) vagy megállók közötti (OC-I), sok esetben központi töltőállomási (OC-C). A jármű mozgása közben történő (IMC -In-motion-charging) töltési technológia azokra a városokra jellemző, amelyek már rendelkeznek trolibusz-hálózattal. IMC technológiának tekinthetők azonban a közúti burkolatba ágyazott vezeték nélküli töltés rendszerek, amelyek jelenleg még kísérleti (pilot projekt) stádiumban tartanak.



21. ábra Töltési logika alapján vezérelt folyamat sémája Jefferies, 2020, [68]

Az akkumulátorok töltési folyamatának menedzselése más fontos tényezők mellett (hőmérséklet, kisütési mélység, idő/kisülési ciklus, stb.) jelentősen befolyásolja azok élettartamát, degradációját és második élettartamának lehetőségét. A töltési folyamat szempontjából fontos tényező az akkumulátor töltöttségi állapota, azaz az SOC (State of Charge). Az SOC értéke azt mutatja meg, mennyi a tárolt rendelkezésre álló kapacitás az akkumulátorban. Fontos megjegyezni, hogy az akkumulátor SOC értéke és a feszültsége egymástól függő értékek. Az akkumulátor SOC és az áram ismeretében az akkumulátor feszültsége levezethető. Általánosságban elmondható, hogy magasabb SOC magasabb kapcsolófeszültséget eredményez, ami alacsonyabb anódpotenciált és magasabb katódpotenciált jelent. Ez felgyorsíthatja az akkumulátor öregedési folyamatait. Az alacsonyabb SOC viszont magasabb anódpotenciált és alacsonyabb katódpotenciált jelent, ami általában előnyös az akkumulátor élettartamára. Azonban túl alacsony SOC esetén az anód réz áramgyűjtőjének korróziója és a katód aktívanyag szerkezetének szétesése negatívan befolyásolhatja az akkumulátor élettartamát.

A DOD (Depth of Discharge), azaz a kisütés mélysége, szintén komplex hatással van az akkumulátor élettartamára. A szakmai vélemények szerint elmondható, hogy létezik egy optimális DOD az akkumulátor élettartamát tekintve, azonban ez a DOD általában túl kicsi ahhoz, hogy megfeleljen a vezetési tartományra vonatkozó követelményeknek.



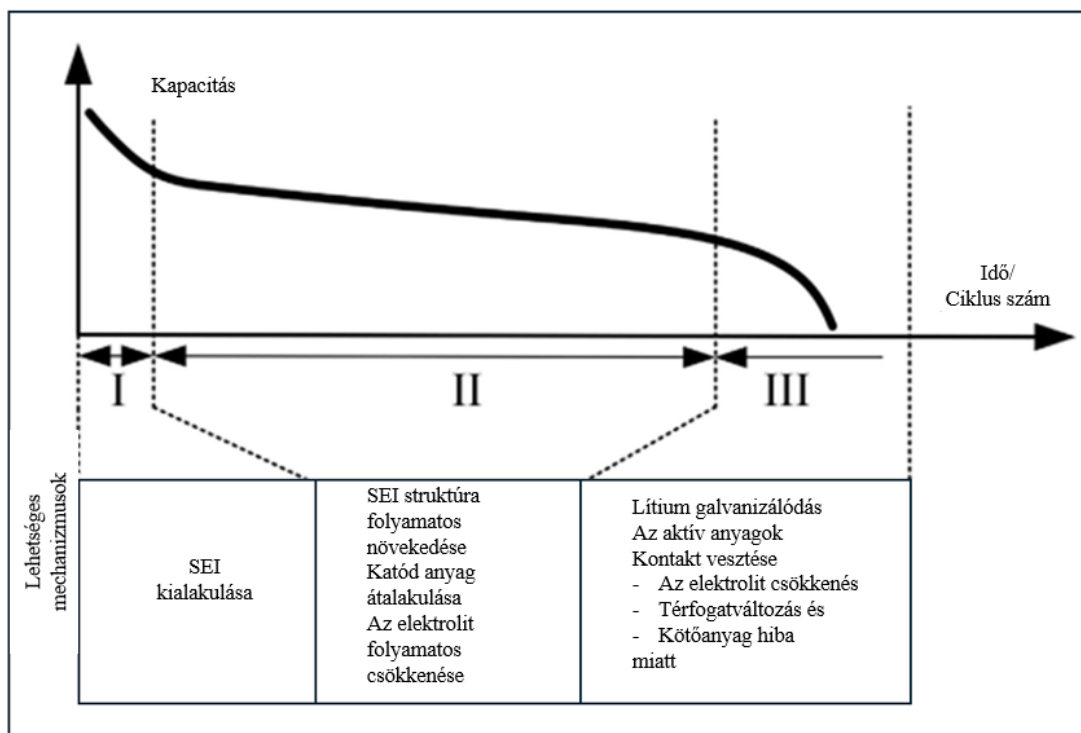
22. ábra A kisütés mélységének (DOD) hatása az akkumulátor degradációjára [43]

### 6.3 Az akkumulátorok degradációja

Az akkumulátorok degradációja számos összetett folyamat következménye, ahol a ciklikus öregedés és a naptári öregedés együttesen játszanak szerepet és a belső ellenállás növekedésével járnak. A ciklikus öregedés során az akkumulátor kapacitása csökken, főleg a töltési és kisütési ciklusok gyakoriságának növekedése miatt. Ennek háttérében az áll, hogy a belső szilárdelektrolit-interfázis réteg növekszik, az elektródok degradálódnak és ciklikus lítiumvesztés következik be. Ellenben a naptári öregedés a töltési állapot, az idő és a hőmérséklet hatására jelentkező önkisülési reakciókat írja le, ami szintén kapacitásvesztéshez vezet. Ezek a jelenségek különösen fontosak az elektromos járművek esetében, mivel az akkumulátorok jelentős degradációja növelheti az elektromos járművek teljes energiafogyasztását és az azonos vezetési ciklusban megtett kilométerenként az elektromos járművekhez kapcsolódó üvegházhatású gáz kibocsátást.

Az akkumulátorok élettartam-garanciája gyártóktól függően 5 és 10 év közötti időtartamot jelent. A garanciát a gyártók a kémiai összetétel, az üzemeltetés és a töltés függvényeként határozzák meg.

Amennyiben nem csak egy cella, hanem egy egész akkumulátorrendszer degradációját szeretnénk vizsgálni, elmondható, hogy a rendszer teljesítményét az egyes cellák teljesítménye határozza meg, így a cellák öregedése vezethet a rendszer öregedéséhez, viszont az az akkumulátorrendszer teljesítményét nagyban befolyásolják a cellák közötti ellentmondások, különbségek. HAN, (2019) [44]



23. ábra A degradáció mechanizmusa, HAN, 2019 [44]

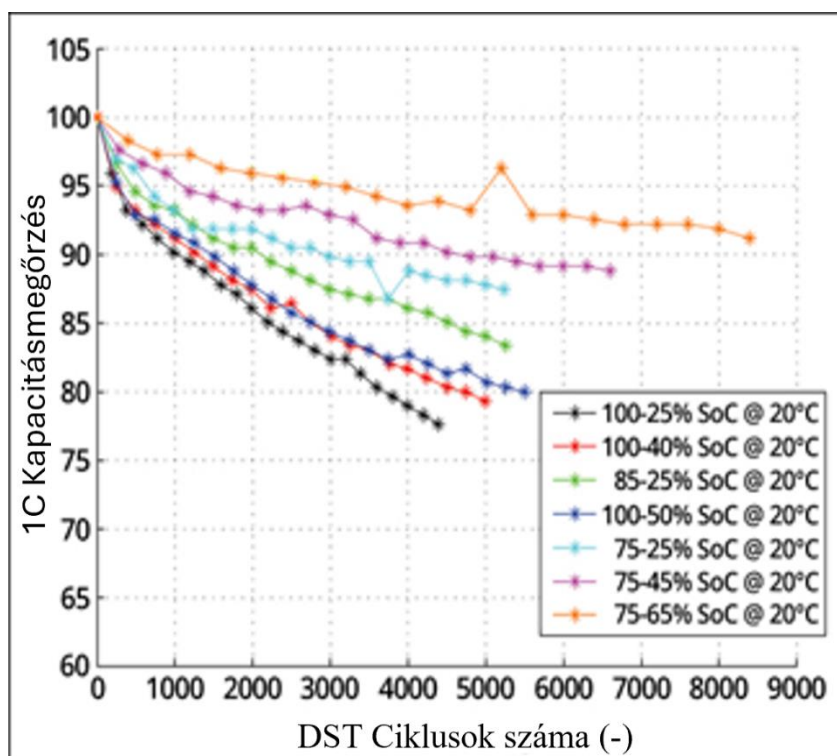
Az akkumulátorok nemlineáris öregedése három szakaszra bontható:

1. szakasz: szilárd elektrolit határreteg képződés; hirtelen, gyors degradáció
2. szakasz: további szilárd elektrolit határreteg képződés, katód anyag strukturális elváltozása, elektrolit veszteség; lineáris szakasz
3. szakasz: lítium galvanizáció, folyamatos anyagvesztés; hirtelen, gyors degradáció

Általánosságban elmondható, hogy az elektromos járművekben jelenleg használt legtöbb akkumulátor általában nemlineáris öregedési jellemzőt mutat, amely nagyjából három szakaszra osztható, ahogy azt a **23. ábrán** láthatjuk. Az első szakaszban az akkumulátor kapacitása gyorsan csökken az első néhány töltési ciklus során. A második szakaszban az akkumulátor teljesítménye folyamatosan csökken a különböző reakciók miatt, amelyek az akkumulátoron belül zajlanak. A harmadik szakaszban az élettartam végéhez közeledve gyors kapacitáscsökkenés és ellenállásnövekedés következik be. Ennek oka lehet a lítiumion-készlet gyors elvesztése és/vagy az aktív anyagvesztés az elektrolit elvesztése miatt, a kötőanyag meghibásodása és a térfogatváltozás miatt.

## 6.4 A lítium-ion akkumulátorok degradációjának mérésével kapcsolatos nemzetközi tapasztalatok

A **24. ábra** a dinamikus stresszteszteket (DST) szemlélteti, amely különféle töltési és kisütési sáv szélességeken mutatja a kapacitásvesztést a Li-ion akkumulátorban.



24. ábra Optimális akkumulátorfelhasználás a kapacitás megőrzésével (Xu ,2016) [42]

A legnagyobb kapacitásvesztés akkor fordul elő, ha egy teljesen feltöltött Li-ion akkumulátort 25%-ig (fekete) merítenek. A 85 és 25 százalék közötti (zöld) hosszabb élettartamot biztosít, mint a 100 százalékos és 50 százalékos (sötétkék) töltés. A legkisebb kapacitásvesztést akkor lehet elérni, ha a Li-ion akkumulátort 75% -ig töltik, és 65% -ig merítenek. Ez azonban nem használja ki az akkumulátort.

A Li-ion töltése és kisütése csak részben hosszabbítja meg az akkumulátor élettartamát, de csökkenti a kihasználtságot.

- 75–65% SoC a leghosszabb ciklusidővel rendelkezik, de 10% - os akkumulátorhasználattal.
- 75–25% -os SoC 50% -os akkumulátorhasználattal.
- 85–25% -os SoC, 60% -os akkumulátorhasználattal.
- 100–25% SoC; hosszú üzemidő, 75% -os akkumulátorhasználattal. Rövid életű.

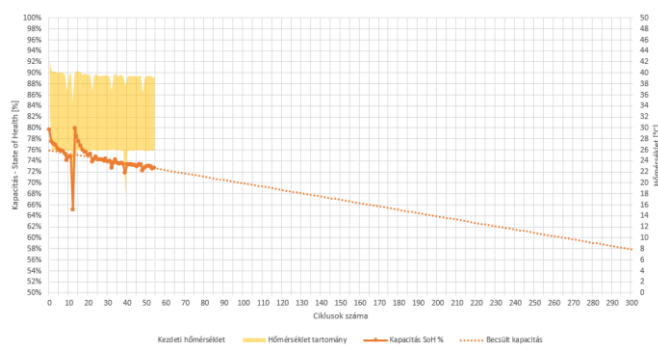
## 6.5 A degradációra vonatkozó saját mérések és megállapítások

A VOLÁNBUSZ Zrt.-nél - mint autóbuzsos közösségi közlekedési közszolgáltatást végző társaságnál - stratégiai alternatívaként már kidolgoztam a fenti elveknek megfelelő elektromos járműfejlesztési koncepciót és ennek keretében az autóbuzs állomány jelentős fiatalítását és fejlesztését célul kitűző cselekvési programot. Ezen járműfejlesztés mentén a társaság már 102 db tisztán elektromos hajtású autóbuzst üzemeltet.

Az elektromobilizáció jegyében történő fejlesztés egyik fő mozgatórugója a technológiai fejlődés és a szolgáltatási színvonal növelésének igénye, az energiafelhasználás hatékonyságának javítása, valamint a károsanyag kibocsátás csökkentése mellett az, hogy a villamos energiát, mint üzemanyagot a társaság saját maga számára is meg tudja termelni, mindezzel csökkentve a fosszilis üzemanyagfelhasználásának mértékét, valamint növelve az energiabiztonságát és energiafüggetlenségét.

A saját energiatermelési képesség kialakításának vizsgálata mentén és ahhoz kapcsolódóan a társaság kutatási célú projektet indított, melynek keretében piaci szereplőkkel és egyetemekkel együttműködve vizsgálja, hogy pl. az elektromos autóbuszokból kikerülő akkumulátorok a körforgásos működés elve mentén, másodlagos hasznosítás keretében az infrastruktúrába épített storage-ként hogyan tudják tovább szolgálni a társaság működését és érdekeit. Ezen továbbhasználatnak a jelentősége többes. Az autóbuszokban lévő akkumulátorokat - melyek jelentős beszerzési költséggel bírnak - a gyártói és a felhasználói tapasztalatok alapján elvileg 10 évente cserélni szükséges azok kapacitásvesztése okán. Ezen gyártói garanciavállaláson túli, de működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre tudja az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, így javítva a beruházási költségek megtérülését. Az előző fejezetben láthattuk, hogy az akkumulátorok 15 éves optimális felhasználása esetén még lehetőség van másodlagos felhasználásra, amely elősegíti a körforgásos gazdasági modellünk alkalmazhatóságát. A VOLÁNBUSZ Zrt. – az általam meghatározott célok elérése érdekében - egy kiválasztott akkumulátortípussal kapcsolatos degradációs méréseket végzett, amely az alábbi eredményekkel zárult.

A **25. ábra** a VOLÁNBUSZ Zrt.-nél használt akkumulátortípusnál az általam meghatározott módszertan alapján végeztetett teszteltetés mérési eredményeit összegzi.



25. ábra Valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 1. mérés (Forrás: Volánbusz Zrt., saját szerkesztés)

Az X tengely a teljes ciklusok számát jeleníti meg. A ciklusok 0.5C töltéssel és 1.0C merítéssel kerültek elvégzésre. A bal oldali Y tengelyen az eredeti kapacitáshoz viszonyítva látható az akkumulátor megmaradt kapacitása, azaz százalékos állapota, a mérési pontokat a narancssárga pontok ábrázolják. A narancssárga szaggatott vonal az adatok lineáris extrapolációját mutatja, azaz egy becslést, hogy ugyanilyen ütemű töltés-merítés esetén milyen további kapacitásvesztés várható. (Az akkumulátorok kapacitáscsökkenése azonos körülmények között lineárisnak mondható.)

A bemutatott mérések alapján 60%-os megmaradt kapacitásig igaz ez a linearitás, onnantól fokozatosan erőteljesebbé válik a kapacitás csökkenése (az akkumulátor öregedése), majd egy bizonyos szintnél teljesen összeesik az. Így általában azt érdemes szem előtt tartani, hogy mikor csökken le a kapacitás 60% alá, mert ezen érték alatt már rohamosan csökken a vontató akkumulátorok kapacitása, és így nem képesek eredeti funkciójuknak megfelelően működni

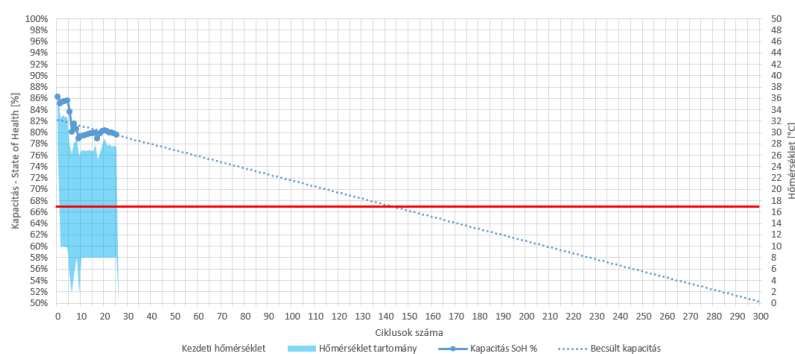
A tesztelés során 55 teljes ciklus került a mérés során az akkumulátorba. A tesztelt akkumulátornál a 60% alá csökkenés várhatóan a ~265. ciklusnál fog bekövetkezni, azaz az akkumulátor a mostani állapotához képest még ~210 ciklust tud. Attól, hogy 60% alá esik a megmaradt kapacitása, attól még

használható marad az akkumulátor, akár 40-50%-os szintig is lehet használni, viszont a jelenlegi mérésből a 60% alatti intervallumra nem lehet becslést adni. A kimért kapacitásvesztési trendet lehet erre a szakaszra egy felső becslének venni.

Az elvégzett mérés alapján 100 ciklus alatt ~6%-nyi kapacitást veszít az akkumulátor, így arra lehet következtetni, hogy 60%-os megmaradt kapacitásról 40%-os megmaradt kapacitásra kevesebb, mint 333 ciklusra lesz szükség. Ezek alapján, ha a tesztelt akkumulátor a mostani 72.6%-os állapotáról további használatra kerül 40%-os állapotig, akkor legfeljebb  $\sim 210 + 333 = \sim 543$  teljes (100%-0%-100%) merítési-töltési ciklusra lehet számítani. Ennél valószínűleg kevesebb lesz, de erre a jelenlegi adatokból nem lehet pontosabb becslést adni. Ez abból is következik, hogy nem mindegy, hogy milyen szintre kerül feltöltésre és lemerítésre az akkumulátor. Például, ha nem 100%-0%-100% merítés-töltési ciklusban történik az akkumulátor használata, hanem mondjuk 75%-25%-75%, akkor akár duplájára is lehet növelni az akkumulátor élettartamát (felére lehet csökkenteni az öregedését, kapacitásvesztését).

A jobb oldali Y tengely a hőmérsékletet mutatja. A citromsárga terület pedig azt mutatja, hogy az egyes mérési ciklusok során milyen hőmérséklet tartományban volt az akkumulátor. (A mérési ciklusok során az akkumulátor javarészt 26-40°C-os tartományban üzemelt.)

Az **26. ábra** a hűtött közegben történt akkumulátor tesztelés akkumulátor mérését összegzi. A tengely jelölések és a diagram elemek ugyanazt jelentik, mint a **25. ábrán**, csak a mérési értékek különbözőek.



26. ábra Valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 2. mérés (Forrás: Volánbusz Zrt., saját szerkesztés)

A tesztelés során 39 teljes ciklus került az akkumulátorba. A tesztelt akkumulátornál a 60% alá történő kapacitás csökkenés körülbelül a 210. ciklusnál fog bekövetkezni, azaz az akkumulátor a mostani állapotához képest még körülbelül 170 ciklust tud. Az elvégzett mérés alapján 100 ciklus alatt ~10.6%-nyi kapacitást veszít az akkumulátor, így arra lehet következtetni, hogy 60%-os megmaradt kapacitásról 40%-os megmaradt kapacitásra kevesebb mint 188 ciklusra lesz szükség. Ezek alapján ha a tesztelt akkumulátor a mostani 78%-os állapotáról további használatra kerül 40%-os állapotig, akkor legfeljebb  $\sim 170 + 188 = \sim 358$  teljes (100%-0%-100%) merítési-töltési ciklusra lehet számítani.

A grafikon világoskék területe azt mutatja, hogy az egyes mérési ciklusok során milyen hőmérséklet tartományban volt az akkumulátor. (A mérési ciklusok során az akkumulátor javarészt 8-28°C-os tartományban üzemelt.)

A **6. fejezetben** korábban leírtak szerint az optimális akkumulátor használatra az **2. táblázat** szerinti paraméterek vonatkoznak.

## **2 táblázat: Optimális akkumulátorfelhasználás**

	100-25%	100-40%	85-25%	100-50%	75-25%	75-45%
Kihasználtság	75%	60%	60%	50%	50%	30%
Kapacitásvesztés	5%/1400 ciklus	5%/2000 ciklus	5%/2500 ciklus	5%/2000 ciklus	5%/4000 ciklus	5%/5000 ciklus
Élettartam (SoH < 60%):	8400 kapacitássegység	9600 kapacitássegység	12000 kapacitássegység	9600 kapacitássegység	16000 kapacitássegység	12000 kapacitássegység

A táblázat alapján levonható következtetések:

- 85-25-% SoC között a belső ellenállás nagyjából állandó, azon kívül nagyobb értékű
- A belső ellenállás az akkumulátor élete során folyamatosan nő
- Magasabb hőmérsékleten (>25°C) az akkumulátor gyorsabban öregszik (gyorsabban nő a belső ellenállása, és gyorsabban csökken a kapacitása)
- Alacsony hőmérsékleten (<10°C) az akkumulátor belső ellenállása nagyobb, használható kapacitása kisebb
- A nagyobb terhelés (magasabb C érték) jobban öregíti az akkumulátort
- A hosszú élettartam végett az akkumulátorokat 85-25% vagy 75-25% töltöttségi szint között érdemes használni

## **6.6 A visszautas logisztika szerepe elektromos járművek akkumulátorainak második életciklusában**

A holisztikus logisztikai modellben (4.2 fejezet) integráns részt képviselő akkumulátor visszautas logisztikai folyamat támaszkodik az akkumulátor menedzsmenttel foglalkozó publikált eredményekre és tanulságokra. (2.3 fejezet), és különösen hasznosnak találtam a következőkben hivatkozott kutatások megállapításait.

A visszautas logisztika fogalomrendszerét illetően **Kohut, 2005 [87]** támaszkodtam, míg a Miskolc Egyetemen a visszautas logisztikai rendszer ellátási lánc energetikai optimalizálásának szerepével kapcsolatos publikáció (**Akkan, 2022 [88]**) volt jól hasznosítható a témakör szempontjából.

**Yükseltürk, 2021 [89]** az elhasználódott elektromos jármű akkumulátorokat visszagyűjtő központjának kialakítását vizsgálta a flottaméret-előrejelzés alapján, **AZADNIA, 2021 [90]** az ún. TISMA-MICMAC megközelítés módszerével a visszautas logisztika alkalmazásának akadályait elemezte. **HAO, 2021[91]** elektromos járművek akkumulátorainak visszautas logisztikai hálózatterve a kockázatokra fókuszált. **GONZALES-GALIENCES, 2022 [92]** egy kanadai esettanulmányt publikált a lítium-ion akkumulátorok fordított logisztikai folyamatának modellezésére és a modell alkalmazására. **ZHAO, 2022 [93]** kutatása összekapcsolta a logisztikai folyamatot az anyagellátástól az akkumulátor menedzsmentig bezárólag. **Ugyanebben a témakörben BARMAN, 2023 [94]** az ellátási lánc szempontjából kritikus nyersanyagokat tekintette át. Jelentős aggodalomra okot adó területeket mutat be, beleértve az erőforrás-tartalékokat, a kínálatot, a keresletet, a földrajzi eloszlást, az akkumulátorok újrafelhasználását és az újrahasznosító iparágakat. **HARPER, 2023 [95]** cikke megerősíti a fenntartható körforgásos gazdaság jelentőségét a jövő

akkumulátor technológia fejlesztéseinél. A több részterületet is elemző és bemutató áttekintés együttesen átfogó képet ad az újrahaznosítás jelenlegi állásáról, és arról, hogy ezek a technológiák várhatóan hogyan fognak fejlődni a jövőben. **TINNES, 2024 [96]** magának a logisztikának a dekarbonizációjával foglalkozik, ami abból a szempontból is lényeges, hogy a visszautas logisztika szállításai feladatait is egyre nagyobb mértékben akkumulátoros elektromos szállítóeszközök fogják elvégezni.

A 6.6. fejezetben hivatkozott publikációk a figyelmet a visszautas logisztika és a körforgásos gazdaság összekapcsolásának fontosságára irányítják és azt igazolják, hogy az akkumulátorok degradációján nyomonkövetésén alapuló üzemeltetési modellben ezen megoldások a rendszer nélkülözhetetlen elemeiként tekintendők.

## 6.7 Az akkumulátorok degradációjának nyomonkövetésén alapuló üzemeltetési modell

A degradációra vonatkozó mérések egyértelművé teszik, hogy az akkumulátorok élekciklusa rövidebb, mint az elektromos autóbuszok tervezett üzemi tartási időtartama, így amikor az akkumulátor az eredeti funkciójának betöltésére már nem alkalmas, de még jelentős értéket képvisel, a környezetvédelmi és gazdasági szempontok is alátámasztják, hogy foglalkozni kell ezek második élekciklusával (angol szakirodalomban: second life).

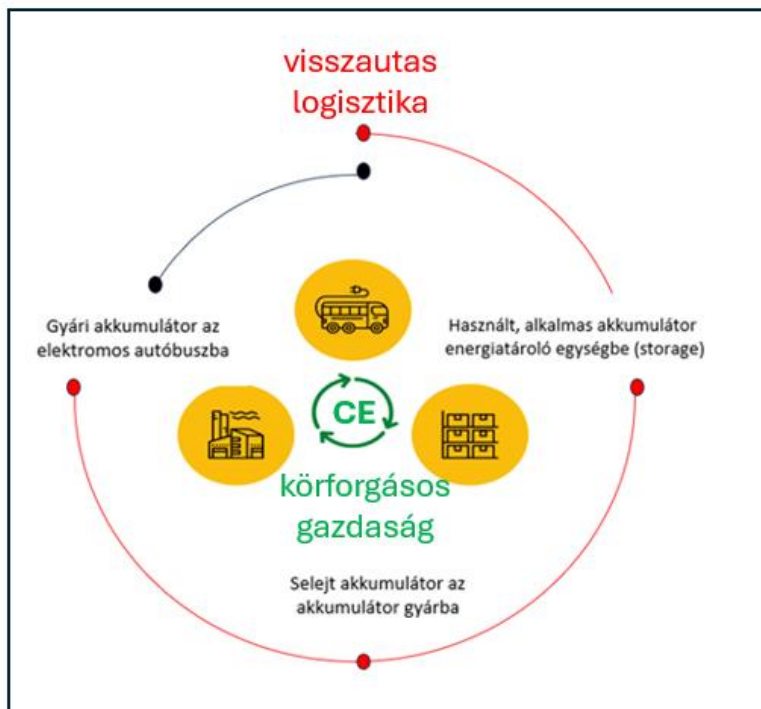
Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak degradációjával kapcsolatos publikáció egy-egy részterületre vonatkoztak. Ezek eredményei jól felhasználhatók egy holisztikusabb üzemeltetési modellben, amelyben az akkumulátorok degradációjának pontos ismerete lehetővé teszi azok második életének megtervezését annak érdekében, hogy a flotta teljes élekciklus költsége optimális legyen. Az akkumulátorok második élekciklusának tervezésében kiemelt szerepet kap a járműállományban lévő akkumulátorok degradációs és töltési jellemzőinek pontos ismerete, ami az üzemeltető tényleges mérési eredményeinek birtokában érhető el. Ilyen komplex modell a szakirodalomban nem lelhető fel, ezért adott összetételű elektromos autóbuszparka és fordaszerkezetre vonatkozóan egy ilyen megközelítésű rendszer bemutatása történik.

Tegyük fel, hogy egy elektromos autóbusz akkumulátor 400 kW-os. A szakirodalmi ajánlás szerint ideális alkalmazás során az akkumulátorok töltöttsége 85% és 25% között mozog. A 6. ábra alapján ezen üzemeltetési paraméterek mellett az akkumulátor élettartama 8000 ciklus, míg eléri azt a degradációs értéket, amikor már nem tudja kiszolgálni a közlekedési feltételeket. Amennyiben azt feltételezzük, hogy egy busz évente 300 napot van üzemeltetve és naponta egyszer töltjük fel és sűtjük ki, ez azt jelenti, hogy 8000 ciklust több, mint 26 év alatt tesz meg. Ez egy szuboptimális eset, ilyen hosszú élettartamot nem várnak el az autóbuszoktól. Amennyiben 15 éves élettartammal számolunk évi 300 napos üzemidővel, napi egyszeri töltés-kisütéssel, úgy 4500 ciklus élettartamot várhatunk egy elektromos autóbusz akkumulátortól. Az 1. táblázat alapján az üzemeltetés során 25% és 100% között kell tartanunk az akkumulátor töltöttségi szintet, hogy ezt az élettartamot elérhessük. Ebben az esetben az akkumulátorban 300kW teljesítmény marad, amely kapacitás 1 kWh/km fogyasztás esetén megfelel egy átlagos napi fordának. (Saját üzemeltetési tapasztalat ugyanis, hogy időjárástól függetlenül az elektromos autóbuszok fogyasztása átlagosan körülbelül 1 kWh/km. Ez a kihasználási arányt is növeli, az előbbi 60%-ról 75%-ra. Az elsődleges élettartam végén az akkumulátor kapacitása még mindig 300-320 kW, amit további alkalmazásokban, például tárolóként, hasonló töltöttségi körülmények között használva további 3900 ciklusig alkalmazhatunk. Ez hasonlóan évi 300 ciklussal számolva további 13 évnél is több tárolási kapacitást jelent.

A **27. ábra** azt a körforgásos modellt mutatja be, melyet a VOLÁNBUSZ Zrt. **alkalmaztam** a járművekből kikerülő használt, üzemképes, azonban járműben történő használatra már gazdaságosan



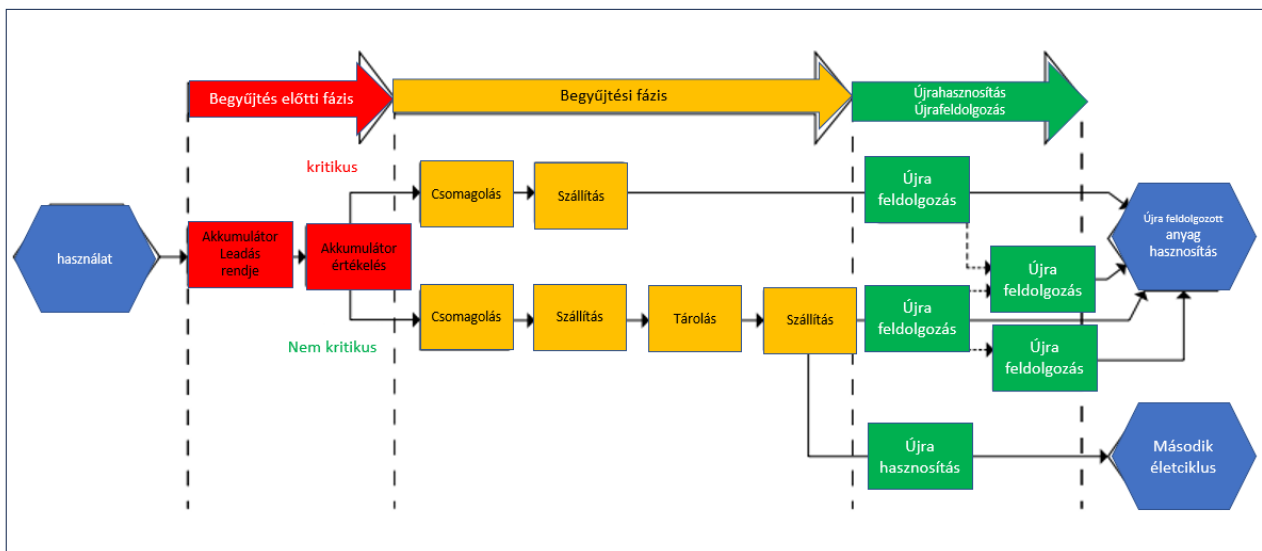
nem alkalmas akkumulátorokat további használatra fogná be, ezzel második életciklust adva az akkumulátoroknak.



27. ábra Akkumulátorok második életciklusának kialakítása a körforgásos gazdaságban (saját szerkesztés)

A koncepció szerint a járművekben üzemelő akkumulátorok a kapacitásvesztésük okán kb. 6-8 év után kikerülnek a járművekből, azonban ahelyett, hogy hulladékká válnának, az egyes telephelyeken storageként kerülnének használatra a telephelyen megtermelésre kerülő villamos energia eltárolása érdekében. Az eltárolásra kerülő villamos energia ezáltal bármikor felhasználható.

A 28. ábrán látható, hogy az akkumulátorok használata során azok állapotát egy szabályozott folyamatban értékelni szükséges, ami történhet egyrészt a járművekbe szerelt on-line, valós idejű diagnosztikai rendszer alapján, másrészt pedig a 6.5. fejezetben bemutatott mérésekkel. Ez – az ábrán pirossal jelölt fázis – kritikus az akkumulátorok begyűjtési fázisát tekintve (sárga színnel jelölt fázis), mert a visszautas logisztikai folyamat lefolyása ez alapján dől el. A közlekedési vállalat elektromos akkumulátorainak menedzsment rendszerét ezekre a folyamatokra alapozva célszerű felépíteni.



28. ábra A vállalati akkumulátor menedzsment folyamata (saját szerkesztés)

A járművekből kikerülő, ámde működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre tudja az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, így javítva a beruházási költségek megtérülését. Ezen túlmenően a hulladékká válás időszaka is évekkel kitolható, ezzel is csökkentve a környezeti terhelést. A storage-ként funkcionáló akkumulátorok ezeken felül jövedelemtermelő képességgel is bírhatnak, hiszen a társaság a megtermelt, de felhasználásra nem kerülő villamos energiát akár értékesítheti is a lakosság, vagy piaci szereplők számára rendelkezésre bocsátott töltő infrastruktúra által.

A szolgáltató járműállományát (V) dízel (D), elektromos (E) és gázüzemű autóbuszok (G) alkotják, azaz  $V=D+E+G$ .

Az elektromos autóbuszok töltés fogyasztása minden jármű egyednél 0,9 kWh/km és 1,1 kWh/km közé esik. Mivel az elektromos autóbuszok akkumulátorainak kapacitása  $C_e$  átlagosan 300 kWh, ezért az ilyen buszokkal teljesíthető forda hatótávolság (dei) 300 km. Ezen kalkulációt alapul véve megállapítható, hogy az elektromos autóbuszok darabszámát technológiai szempontból a fordaszerkezet és a töltési mód befolyásolja, azonban a teljes életciklus költség meghatározása egy gazdálkodó szervezetnél elengedhetetlen szempont.

Az életciklus költség összehasonlítása a dízel üzemű járművekéhez viszonyítva javasolt, hiszen – a helyközi személyszállításban meglévő 300 km fölötti fordák esetében – a dízel autóbuszokra is szükség van az ún. vegyes flottában (mixed fleet).

Az akkumulátorok degradációjának nyomonkövetésén alapuló adatvezérelt fordított logisztika alkalmazásával a dízel autóbuszok TCO-jához képest TCO  $\delta$  megtakarítás érhető el.

$$TCO \delta = TCO_e - TCO_d$$

A modell alkalmazásával elvégzett számítások az igazolják, hogy az elektromos autóbuszok az ismertett feltételrendszer mellett versenyképes alternatívát jelentenek belsőégésű motorral üzemelő társaikhoz képest. A TCO összehasonlítást az 5. fejezetben lévő 15. ábra mutatja be.

**A 6. fejezetben bemutatott eredmények alapján fogalmaztam meg III. tézisem. Feltártam azokat a kérdésköröket, amelyek az első tézisben megfogalmazott innovatív üzemeltetési modellben, valamint a második tézisben megfogalmazott optimális autóbuszflotta tekintetében az elektromos járművek vontató akkumulátorainak környezetvédelmi szempontjait a visszautas logisztika megoldásai révén érvényesíti és ugyanakkor a modell teljes tulajdonlasi költségét jelentősen javítja. [P/9], [P/10]**

## 7 Összefoglalás

### 7.1 A tézisek tudományos és gyakorlati megalapozottsága

A disszertációban megfogalmazott tézisek rendszerszemléletű és innovatív választ adnak a közlekedési logisztika területén az elektrifikációs és dekarbonizációs folyamatok kiemelkedő kihívást jelentő problémáira. Az első tézis jelentősége abban van, hogy komplex modellként tekint a rendkívül összetett rendszer elemeire, entitásaira, és az így kialakuló ökoszisztémára. A második tézis a komplex rendszer egy olyan elemére ad innovatív szemléletű megoldási javaslatot, amelynek feladata a hosszú távon fenntartható, zöld közlekedési logisztikai rendszer működtetése a változó energiaellátási erőforrásokhoz igazodva. A harmadik tézis az elektromos járművek zéró emissziós működése szempontjából kritikus elemnek számító vontató akkumulátoroknak a logisztikai

körfolyamatba illesztéséről szól, amelyben szerepet kap a visszautas logisztika és az akkumulátorok második életciklusának integrálása a komplex rendszerbe.

## 7.2 További kutatási irányok:

Érdemes tovább kutatni az informatika, az energetika és a körforgásos gazdaság logisztikai hálózatának összefüggéseit. Az ipar 4.0 módszere milyen módon tudna hozzájárulni egy környezeti is gazdasági szempontból is fenntartható közlekedéshez. Az ipar 4.0 belül rohamosan fejlődő AI és ChatGPT milyen módon fogja támogatni a valós idejű, adatalapú vállalati döntések meghozatalát, amely segítségével még hatékonyabban tudnánk elérni a két legfontosabb kitűzött célt, környezetvédelem és gazdasági hatékonyság.

A javasolt komplex rendszernek fel kell tudni dolgoznia az egyre szélesebb körben elterjedő megújuló energiákra alapozott közlekedéslasztikai rendszerek üzemszerű működése alatti kockázatokat és azok kezelésére alkalmas módszereket. Elemzések sora hívja fel a figyelmet arra, hogy a fosszilis energiáról történő leválás milyen kihívás elé állítja a megújuló energiaforrásokra áttérni kívánó felhasználókat . [ö1], [ö2]

Az autóbusszflották kialakítása esetében is vannak intő példák arra, hogy az összetétel optimális diverzifikálása nélkül komoly nehézségek, akár közlekedési káosz is előállhat. Többek között a klímatis viszonyok extrém változása is okozhatja ezt, mint Hollandiában és Németországban az elmúlt években, és a közelmúltban az oslói helyi közlekedést kiszolgáló elektromos autóbusszok esetében. Itt kizárólag elektromos autóbusszokkal teljesíthető koncessziókat hirdetett meg, azonban a helyenként -16 °C-os téli hideg kifogott a járműveken. [ö3]

A használt akkumulátorok újrahaznosításának fontosságát jelzi, hogy hét japán cég összefogásából létrejövő megegyezés szerint 2027-re bevezetik az „akkumulátor-útlevelet”, amely megmutatja az akkumulátorok romlásának mértékét és maradványértékét is. Ez elősegíti a visszautas logisztika alkalmazását ezen a területen. [ö4]

Az összefoglaláshoz még felhasználható szakirodalom

[ö1] **YORK, R., BELL, S. E.:** *Energy transitions or additions? : Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy*, Energy Research & Social Science

Volume 51, May 2019, Pages 40-43, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008>

[ö2] **FOUQUET, R.:** *The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service*, Energy Policy, Volume 38, Issue 11 , November 2010, Pages 6586-6596, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.029>

[ö3] <https://magyarbusz.info/2023/12/07/kaosz-osloban-megszenvedik-a-telet-az-elektromos-buszok/>

[ö4] <https://www.portfolio.hu/global/20240711/a-tavol-keleti-hatalom-autogyartoi-osszefogtak-az-elektromos-jarmuforradalomban-ezzel-eloznek-a-piacot-698065>

## 8 IRODALOMJEGYZÉK

### 8.1 Értekezés témakörében használt saját publikációk

[P/1] **KRUCHINA, V.:** *The industrial revolution of our age: the opportunities in the electrification of public transport buses*, Advanced Logistic Systems – Theory and Practice, Vol. 17, No. 1 (2023), pp. 21-26

[P/2] **KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T.:** *Az elektrifikáció térnyerése és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepe a fenntartható közösségi közlekedésben, I. rész.* Közlekedéstudományi Szemle, LXXIII. évf. 3. sz., 2023, pp. 17–34 <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.3.2>

[P/3] **KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T.:** *Az elektrifikáció térnyerése és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepe a fenntartható közösségi közlekedésben, II. rész.* Közlekedéstudományi Szemle, LXXIII. évf. 4. sz., 2023. 4–12. oldal, <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.4.1>

[P/4] **KRUCHINA, V.:** *The possibility of electrification in public transport bus services*, Győr, XIII. International Conference on Transport Sciences, 2023. ISBN 978-615-6443-17-5

[P/5] **KRUCHINA, V.:** *The possibility of electrification in public transport bus services*, Acta Technica Jaurinensis, 2023. 10.14513/actatechjaur.00713

[P/6] **KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T.:** Autóbuszflottát üzemeltető vállalatok innovatív működési modellje, *Advanced Logistic Systems – Theory and Practice*, (2024)

[P/7] **KRUCHINA, V., TAMÁS, P., ILLÉS, B.:** *An innovative decision-making method for choosing a bus fleet based on logistics and sustainability aspects*, *Acta Logistica -International Scientific Journal about Logistics*, Volume: 11 2024 Issue: X Pages: x-y ISSN 1339-5629

[P/8] **SZILASSY, P. Á., KRUCHINA, V.:** *Vegyes autóbuszflotta optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló módszertan az autóbusz-fordulóterv figyelembevételével*, *CoTS*, 2024, Győr

[P/9] **KRUCHINA, V., ILLÉS, B., TAMÁS, P.:** *The importance of inverse logistics for public transport companies operating a large battery electric bus fleet*, *Advanced Logistic Systems – Theory and Practice*, Vol. 17, No. 4 (2023), pp. 23-32.

[P/10] **KRUCHINA, V.:** *The Role of Degradation of Electric Bus Traction Batteries on Their Second Life and Thus on the Total Cost of Ownership of These Vehicles*, Konferencia előadás, Central European Conference on Logistics 2024 (CECOL 2024),

## 8.2 Értekezés témakörében használt idegen publikációk

[1] **CELEX\_32022R1379\_HU\_TXT:** A BIZOTTSÁG (EU) 2022/1379 RENDELETE az (EU) 2017/2400 rendeletnek a közepes és nehéz tehergépjárművek és nehéz autóbuszok CO<sub>2</sub>-kibocsátásának és tüzelőanyag-fogyasztásának meghatározása, valamint az elektromos járművek és egyéb új technológiák bevezetése tekintetében történő módosításáról, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R1379&from=HU>

[2] **HVG.HU:** Az Európai Bizottság 2030-ra csak elektromos városi buszokat szeretne az unióban, [https://hvg.hu/gazdasag/20230214\\_Megszavaztak\\_2035tol\\_csak\\_elektromos\\_autokat\\_lehet\\_eladni\\_az\\_EUban](https://hvg.hu/gazdasag/20230214_Megszavaztak_2035tol_csak_elektromos_autokat_lehet_eladni_az_EUban)

[3] *Integrált közlekedésfejlesztési operatív program (IKOP) 2014-2020*, Pályázati Portál, <https://archive.palyazat.gov.hu/download.php?objectId=52537>

[4] **WARTIOVAARA, A., ASPIVAARA, C., NYMAN, S.:** *Megatrends 2023: these are the trends we cannot ignore*, 2023, <https://www.sitra.fi/en/news/megatrends-2023-these-are-the-trends-we-cannot-ignore/>

[5] *Eight Electrification Trends Forecasting EV Adoption in 2023 & Beyond*, 2022, <https://www.exro.com/industry-insights/electrification-trends-forecasting-ev-adoption-in-2022-beyond>,

[6] *Electric Cars Have Hit an Inflection Point*, 2021, <https://www.theatlantic.com/newsletters/archive/2021/09/electric-cars-have-hit-inflection-point/620233/>

[7] **GYÖNGYÖS, B., SZABÓ, Gy.:** *Lantos Csaba az Indexnek*, 2023, <https://index.hu/gazdasag/2023/01/25/energia-lantos-csaba-ellatasbiztonsag-gazszerzodes-elektromos-aram-paks-mol-mvm-megujulo-energia/>,

[8] **M. ORBÁN, A.:** *Nem csökken a villamosenergia-igény Magyarországon*, 2023, <https://magyarnemzet.hu/gazdasag/2023/02/nem-csokken-a-villamosenergia-igeny-magyarorszagon-2> , magyarnemzet.hu,

- [9] CELEX\_32014L0094\_HU\_TXT: *Európai Unió irányelve az alternatív üzemanyagok infrastruktúrájának kiépítéséről*, EUR-Lex, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=celex:32014L0094>
- [10] *Lenullázható az ÜHG-kibocsátás a közlekedésben?*, 2024, Közlekedéstudományi Intézet, <https://kozlekedesbiztonsag.kti.hu/lenullazhato-az-uhg-kibocsatas-a-kozlekedesben/>
- [11] HAGYMÁSI, G., JANGEL Mátyás (BKV Zrt.) LAJOSNÉ TÖRÖK, M., MAKRA, N., MÉSZÁROS-PINTÉR, Sz.: *A fenntartható zöld közlekedés lehetőségeinek vizsgálata*, <https://www.mkt.hu/wp-content/uploads/2023/02/A-fenntarthato-zold-kozlekedes-lehetosegeinek-vizsgalata.pdf>
- [12] EURÓPI BIZOTTSÁG: *A demográfiai változások hatása Európában*, [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/new-push-european-democracy/impact-demographic-change-europe\\_hu](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/new-push-european-democracy/impact-demographic-change-europe_hu)
- [13] *Literature review*, <https://wikis.ec.europa.eu/display/ExactExternalWiki/Literature+review>
- [14] MENGIST, W., SOROMESSA, T., LEGESE, G.: *Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research*, *MethodsX* 7 (2020) 100777
- [15] KAMARÁSI, V.; MOGYORÓSY, G.: *Szisztemikus irodalmi áttekintések módszertana és jelentősége. Segítség a diagnosztikus és terápiás döntésekhez*, *Orvosi Hetilap* 156 (38), pp. 1523-1531., (2015).
- [16] BORÉN, S., NURHADI, L., NY, H.: *Preferences of Electric Buses in Public Transport; Conclusions from Real Life Testing in Eight Swedish Municipalities*, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol:10, No:3, 2016, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:911643/FULLTEXT01.pdf>, PDF,
- [17] PELLETIER, S., JABALI, O., MENDOZA, J. E., LAPORTE, G., : *The electric bus fleet transition problem*, *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, Volume 109, December 2019, Pages 174-193 (2019), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X1930868X>,
- [18] LI, X., GORQUINPOUR, C., SCLAR R., CASTELLANOS, S.: *How to enable electric bus adoption in cities worldwide*, *World Resources Institute, Ross Center*, (2019), PDF
- [19] EDITORIAL: *Why the automotive future is electric*, 2021, McKinsey Center for Future Mobility, PDF
- [20] AAMODT A., CORY, K., CONEY, K.: *Electrifying transit: a guidebook for implementing battery electric buses*, *National Renewable Energy Laboratory*, 2021, PDF
- [21] SHAH, K.J., PAN,S-Y., LEE, I., KIM, H., YOU, Z., ZHENG, J-M, CHIANG, P-C. : *Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies*, *Journal of Cleaner Production* 326 (2021) 129392 PDF,
- [22] LI, L., LO, H. K., XIAO, F., CEN, X. : *Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs*, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 60, May 2018, Pages 104-118, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.001>
- [23] LI, L., LO, H. K., XIAO, F.: et al.: *Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints*, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 104, July 2019, Pages 443-462, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.009>

- [24] LEE, J., SHON, H., PAPAKONSTANTINO, I., SON, S.: *Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 100, November 2021, 103066, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103066>,
- [25] CUI, S., GAO, K., YU, B., MA, Z., NAJAFI, A.: *Joint optimal vehicle and recharging scheduling for mixed bus fleets under limited chargers*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 180, December 2023, 103335, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103335>
- [26] WEI, R., LIU, X. C., OU, Y.: *Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system*, Journal of Transport Geography 68:160-168, (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>
- [27] FIORI, Ch., MONTANINO, M., NIELSEN, S., SEREDYNSKI, M., VITI, F.: *Microscopic energy consumption modelling of electric buses: model development, calibration, and validation*, Transportation Research Part E, 98 (2021) 102978, PDF, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102978>
- [28] DIRKS, N., SCHIFFER, M., WALTHER, G.: *On the integration of battery electric buses into urban bus networks*, Transportation Research Part C, Emerging Technologies, Volume 139, June 2022, 103628, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103628>
- [29] HARRIS, A., SOBAN, D., SMYTH, B. M., BEST, R. : *Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies*, Renewable and Sustainable Energy Review, Volume 97, December 2018, 569-579 oldal, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.045>
- [30] *Battery demand for EVs continues to rise*, 2023, Global EV Outlook -Trends in batteries, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries>,
- [31] LIU, W. PLATZKE, T., CHAU, K., T.: *Overview of batteries and battery management for electric vehicles*, Energy Reports, Volume 8, November 2022, Pages 4058-4084, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.016>,
- [32] CHEN, L., TIAN, B., LIN, W., JI, B., LI, J., PAN, H.: *Analysis and prediction of the discharge characteristics of the lithium-ion battery based on the Grey system theory*, IET Power Electronics, Research Article 2015, Vol. 8, Iss. 12, pp. 2361–2369 2361&, <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-pel.2015.0182>
- [33] TSENG, K-H., LIANG, J-W., CHANG, W., HUANG, S-C.: *Regression Models Using Fully Discharged Voltage and Internal Resistance for State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries*, Energies 2015, 8(4), 2889-2907; <https://doi.org/10.3390/en8042889>
- [34] GAO, Z., LIN, Z., LACLAIR, T. J., LIU, C., LI, J-M., BIRKY, A. K., WARD, J. : *Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service*, Energy, Volume 122, 1 March 2017, Pages 588-600, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>
- [35] SCHIFFER, M., WALTHER, G.: *The electric location routing problem with time windows and partial recharging*, European Journal of Operational Research, Volume 260, Issue 3, 1 August 2017, Pages 995-1013, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.011>
- [36] WANG, Y. HUANG, Y., XU, J., BARCLEY, N.: *Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis*, World Transit Research, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>



- [37] **ROGGE, M. VON DER HURK, E., LARSEN, A., SAURER, D. U.:** *Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure*, Applied Energy, Volume 211, 1 February 2018, Pages 282-295, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>
- [38] **LIN, Y., ZHANG, K., SHEN, Z-J., YE, B., MIAO, L.:** *Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 107, October 2019, Pages 423-443, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>
- [39] **HE, Y., LIU, Z., SONG, Z.:** *Optimal charging scheduling and management for a fast-charging battery electric bus system*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 142, October 2020, 102056, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102056>
- [40] **LIU, T., CEDER, A.:** *Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 114, May 2020, Pages 118-139, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.009>
- [41] **HE, Y., LIU, Z., SONG, Z.:** *Joint optimization of electric bus charging infrastructure, vehicle scheduling, and charging management*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 117, April 2023, 103653, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103653>
- [42] **XU, B., OUDALOV, A., ULBIG, A., ANDERSSON, G. :** *Modelling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment*, IEEE Transactions on Smart Grid, Volume: 9 Issue: 2, June 2016 99(2):1-1, <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>
- [43] **HOMAN, J.:** *Description of a S-N Curve*, Fatec Engineering, <https://www.fatec-engineering.com/2018/02/20/description-of-a-s-n-curve/>, 2018,
- [44] **HAN, X., LU, L., ZHENG, Y., FENG, X., LI, Z., LI, J., OUJANG, M.:** *A review on the key issues of the lithium ion battery degradation*, eTransportation, Volume 1, August 2019, 100005, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>
- [45] **SEVERSON, K. A., ATTIA, P. M., JIN, N., PERKINS, N.:** *Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation*, Nature Energy 4(5):1-9, May 2019, <https://www.nature.com/articles/s41560-019-0356-8>
- [46] **JOHNEN, M., PITZEN, S., KAMPS, U., KATERI, M., DECHENT, P., SAUER, D. U.:** *Modelling long-term capacity degradation of lithium-ion batteries*, Journal of Energy Storage, Volume 34, February 2021, 102011, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102011>
- [47] **SHCHUROV, N. I., DEDOV, S.I., MALOZYJONOV, B. V., SHLANG, A. A., MARTYUSHEV, N. V., KLYUEV, R. V., ANDRIASHIN, S. N. :** *Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex*, Energies 2021, 14(23), 8072; <https://doi.org/10.3390/en14238072>
- [48] **ZHANG L., WANG, S., QU, X.:** *Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Volume 154, October 2021, 102445, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102445>
- [49] **O'KANE, S.E., KIRKALDY, N., OFFER, G. J., MARINESCU, M.:** *Lithium-ion battery degradation: How to model it*, 2022, Physical Chemistry Chemical Physics, No. 13, p. 202224(1–2), 2022, <https://doi.org/10.1039/D2CP00417H>

- [50] DE LA VEGA, J., RIBA, J. R., ORTEGE, J.A. : *Mathematical Modelling of Battery Degradation Based on Direct Measurements and Signal Processing Methods*, April 2023, Applied Sciences 13(8):4938, <http://dx.doi.org/10.3390/app13084938>
- [51] HEYMANS, C., WALKER, S. B., YOUNG, S. B., FOWLER, M.: *Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling*, Energy Policy, Volume 71, August 2014, Pages 22-30, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.016>
- [52] CASALS L-C., GARCIA, B.A., CANAL, C.: *Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis*, Journal of Environmental Management, February 2019, 232:354-363, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>
- [53] ISERNIA, R., PASSARO, R., QUINTO, I., THOMAS, A., *The Reverse Supply Chain of the E-Waste Management Processes in a Circular Economy Framework: Evidence from Italy*, Sustainability, (2019), 11(8), 2430, <https://doi.org/10.3390/su11082430>
- [54] WEF *Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 - Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*, World Economic Forum, Global Battery Alliance, (2019), [https://www3.weforum.org/docs/WEF A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 Report.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf)
- [55] BERGH, W., *Mapping the European reverse logistics of electric vehicle batteries*, Lund University, Faculty of Engineering, retrieved from <https://lup.lub.lu.se>, (2020)
- [56] PREGER, Y., BARKHOLTZ, H., M., PRESQUEZ, A., CAMPBELL, D. I., JUBA, D. W., ROMÁN-KUSTAS, J., FERREIRA, S. R., CHALAMALA, B.: *Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions*, Journal of The Electrochemical Society, 2020. Volume 167, Number 12, <http://www.doi.org/10.1149/1945-7111/abae37>
- [57] ILLA FONT, C.H., SIQUEIRA, H. V., NETO, J. E. M., FERREIRA, J. L.: *Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: Short Review and Perspectives*, Energies, January 2023, 16(2):953, <http://dx.doi.org/10.3390/en16020953>
- [58] ZHAU, J. ZHU, Y., ZHANG, B., LIU, M., WANG, J., LIU, C., HAO, X.: *Review of State Estimation and Remaining Useful Life Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries Prediction Methods for Lithium-Ion Batteries*, Sustainability, 2023, 15, 5014, <https://doi.org/10.3390/su15065014>
- [59] OFFER, G., J., HOWEY, D., CONTESTABILE, M., CLAGUE, R., BRANDON, N.P.: *Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system*, Energy Policy, Volume 38, Issue 1, January 2010, Pages 24-29, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040>
- [60] FENG, W., FIGLIOZZI, M.: *An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 26, January 2013, Pages 135-145, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>
- [61] LAJUNEN, A.: *Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 38, January 2014, Pages 1-15, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008>

- [62] NURHADI, L., BORÉN, S., NY, H.: *A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities*, Transportation Research Procedia, Volume 3, 2014, Pages 818-827, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.058>
- [63] ZHOU, B., WU, Y. ZHOU, B., WANG, R., KE, W., ZHANG, S., HAO, J.: *Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions*, Energy, Volume 96, 1 February 2016, Pages 603-613, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>
- [64] KUNITH A., MENDELEVITCH, R., GOELICH, D. : *Electrification of a city bus network — an optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems*, International Journal of Sustainable Transportation, Volume 11, Issue 10, 2017, Pages 707-720, <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>
- [65] LAJUNEN, A.: *Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods*, Journal of Cleaner Production, Volume 172, 20 January 2018, Pages 56-67, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066>
- [66] LOZANOVSKI, A.; WHITEHOUSE, N.; KO, N.; WHITEHOUSE, S. *Sustainability Assessment of Fuel Cell Buses in Public Transport*, Sustainability 2018, 10(5), 1480; <https://doi.org/10.3390/su10051480>
- [67] VORA, A. P., JIN, X., GOSALA, V., SHAVER, G.: *Integrating battery degradation in a cost of ownership framework for hybrid electric vehicle design optimization*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D, Journal of Automobile Engineering, October 2018, 233(6):095440701880266, <http://dx.doi.org/10.1177/0954407018802663>
- [68] JEFFERIES, D., GÖHLICH, D.: *A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure Optimisation*, World Electric Vehicle Journal, 2020, 11(3), 56, <https://doi.org/10.3390/wevj11030056>
- [69] BARRAZA, O., ESTRADA, M.: *Battery Electric Bus Network: Efficient Design and Cost Comparison of Different Powertrains*, Sustainability 2021, 13(9), 4745, <https://doi.org/10.3390/su13094745>
- [70] KIM, H.; HARTMANN, N.; ZELLER, M.; LUISE, R.; SOYLU, T. *Comparative TCO Analysis of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Buses for Public Transport System in Small to Midsize Cities*, Energies, 2021, 14(14), 4384; <https://doi.org/10.3390/en14144384>
- [71] [POLOM, M., WISNIEWSKY, P.: *A Review of Experiences and Evaluation of the Current Development Directions*, Sustainability 2021, 13(7), 4009; <https://doi.org/10.3390/su13074009>
- [72] AGER-WICK ELLINGSEN, L., THORNE, R. J., FIGENBAUM, E., WIND, J.: *Life cycle assessment of battery electric buses*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, November 2022, 112(9):103498, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2022.103498>
- [73] ABDELATY H., FODA, A., MOHAMED, M.: *The Robustness of Battery Electric Bus Transit Network under Charging Infrastructure Disruption*, Sustainability, 2023, 15(4), 3642, <https://doi.org/10.3390/su15043642>
- [74] TURNER, S., ULUDAG, S.: *Towards Smart Cities: Interaction and Synergy of the Smart Grid and Intelligent Transportation Systems*, July 2015, In book: Smart Grid: Networking, Data Management and Business Models,

[https://www.researchgate.net/publication/276288597\\_Towards\\_Smart\\_Cities\\_Interaction\\_and\\_Synergy\\_of\\_the\\_Smart\\_Grid\\_and\\_Intelligent\\_Transportation\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/276288597_Towards_Smart_Cities_Interaction_and_Synergy_of_the_Smart_Grid_and_Intelligent_Transportation_Systems)

[75] **BORÉN, S.:** *Electric buses sustainability effects noise energy use and costs*, International Journal of Sustainable Transportation, Volume 14, 2020 - Issue 122020, <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>

[76] **BAUER, C., BURGHARDT, S., DASGUPTA, N. P., AGER-WICK ELLINGSEN, L.:** *Charging sustainable batteries*, Nature Sustainability, VOL 5 (3), March 2022 , 176–178, [www.nature.com/natsustain](http://www.nature.com/natsustain), <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-022-00864-1>

[77] **MCGRATH, T., BLADES, L., EARLY, J., HARRIS, A.:** *UK battery electric bus operation: Examining battery degradation, carbon emissions and cost*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 109, August 2022, 103373, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103373>

[78] **EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY:** *Do lower speed limits on motorways reduce fuel consumption and pollutant emissions?* , 2023, <https://www.eea.europa.eu/themes/transport/speed-limits-fuel-consumption-and>

[79] **FRÖDE P., NOFFSINGER, J., SAHODEV, S.:** *What promise does V2X hold for fleets?*, McKinsey&Company, Automotive & Assembly Practice, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/what-promise-does-v2x-hold-for-fleets>

[80] **LINDER, M., NAUCLÉR, T., NEKOVAR, S., PFEIFFER, A., VEKIĆ, N.:** *The race to decarbonize electric-vehicle batteries*, McKinsey & Company, 2023, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-race-to-decarbonize-electric-vehicle-batteries>

[81] **GLISTAU, E.:** *Logistics as a science and the formation of logistic thinking*, International Conference on Logistics, CECOL 2024, University of Miskolc,

[82] **WEF:** *The world needs 2 billion electric vehicles to get to net zero. But is there enough lithium to make all the batteries?*, 2022, <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/electric-vehicles-world-enough-lithium-resources/>,

[83] **IEA:** *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*, 2021, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>,

[84] **BMZ-POLAND:** *Lithium-ion battery technology in e-buses, according to BMZ Poland*, 2021, <https://www.sustainable-bus.com/news/bmz-poland-lithium-ion-battery-technology-electric-buses/>

[ 85 ] **BLOOMBERG:** *Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh*, <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>

[ 86 ] **PATAKI, G.:** *Melyik akkumulátor a jövő? - Lítium-ion, LFP vagy Nátrium-ion?*, <https://www.linkedin.com/pulse/melyik-akkumul%C3%A1tor-j%C3%B6v%C5%91-l%C3%ADtium-ion-lfp-vagy-g%C3%A1bor-pataki-t7qgf/>

[ 87 ] **KOHUT, ZS., NAGY, A., DOBOS, I.:** *A visszutas logisztika: egy fogalmi keret*, Vezetéstudomány, XXXVI. évf. 2005. 2. szám,

- [ 88] **AKKAD, M. A., RABEE, R., BÁNYAI, T.:** *Energy efficiency optimization of last mile supply system with reverse logistics consideration*, Acta logistica - International Scientific Journal about Logistics, Volume: 9 **2022** Issue: 3 Pages: 315-323 <https://DOI.org/10.22306/al.v9i3.315>
- [ 89] **YÜKSELTÜRK, A., WEWER, A., PILGE, P., DIETRICH, F.:** *Recollection center location for end-of-life electric vehicle batteries using fleet size forecast: Scenario analysis for Germany*, CIRPe **2020** – 8th CIRP Global Web Conference – Flexible Mass Customisation, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.084>
- [ 90] **AZADNIA, A., H., ONOFREI, G., GHADIMI, P.:** *Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: A TISM-MICMAC approach*, Resources, Conservation & Recycling 174 (2021) 105751, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105751>
- [ 91] **HAO, H., SUN, Y., MEI, X., ZHOU, Y.:** *Reverse Logistics Network Design of Electric Vehicle Batteries considering Recall Risk*, Mathematical Problems in Engineering, Volume **2021**, Article ID 5518049, 16 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/5518049>
- [ 92] **GONZALES-GALIENCES, G., YU, B., BENSEBAA, F.:** *Development of a Reverse Logistics Modeling for End-of-Life Lithium-Ion Batteries and Its Impact on Recycling Viability—A Case Study to Support End-of-Life Electric Vehicle Battery Strategy in Canada*, Sustainability **2022**, 14(22), 15321; <https://doi.org/10.3390/su142215321>,
- [93] **ZHAO, G., WANG, X., NEGNEVITSKY, M.:** *Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management*, iSCIENCE, Volume 25, Issue 2, 18 February 2022, 103744, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>
- [94] **BARMAN, P., DUTTA, L., AZZOPARDI, B.:** *Electric Vehicle Battery Supply Chain and Critical Materials: A Brief Survey of State of the Art*, Energies **2023**, 16(8), 3369; <https://doi.org/10.3390/en16083369>
- [95] **HARPER, G., KENDRICK, E., ANDERSON, P., MROZIK, W., CHRISTENSEN, P., LAMBERT, S., GREENWOOD, D., DAS, P. K., AHMEID, M., MILOJEVIC, Z.:** *Roadmap for a sustainable circular economy in lithium-ion and future battery technologies*, Journal of Physics: Energy, **2023**, Volume 5, Number 2, <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acaa57>, PDF
- [96] **TINNES, E., PEREZ, F., KANDER, M., PROBST, T.:** *Decarbonizing logistics: Charting the path ahead*, McKinsey&Company, **2024**, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decarbonizing-logistics-charting-the-path-ahead>
- [97] **SZILASSY, P. Á., FÖLDES, D.:** *Consumption estimation method for battery-electric buses using general line characteristics and temperature*, Energy (Oxford, England), (2022). 261(125080), 125080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125080>
- [98] **SZILASSY, P. Á., FÖLDES, D.:** *Akkumulátoros elektromos autóbuszok fogyasztásának becslése vonali jellemzők és hőmérséklet figyelembevételével*, Közlekedéstudományi Szemle, (2023) 73(1), 38–56. <https://doi.org/10.24228/ktsz.2023.1.3>

## 9 Mellékletek

### 9.1 Melléklet: Az elektromos autóbuszok üzemeltetésének gazdasági lehetőségei a Volánbusz Zrt.-nél

A Volánbusz elektromos buszflottájának bővítése környezetvédelmi szempontból kívánatos, hiszen még a legmodernebb dízel busz is megtett kilométerenként 2,6 kg széndioxidot bocsát ki, ugyanakkor az elektromos buszok magas beszerzési ára gazdasági szempontból kihívások elé állítja a vállalatot. Az alábbiakban azt igazolom, hogy a Volánbusz esetében gazdaságilag is megvalósíthatóvá tehető az elektromos flotta bővítése, ha megfelelően komplex, az egész értékláncot átfogó koncepció valósul meg.

A Volánbusz ~6000 autóbusza közül ~1000 teljesít olyan járatokat, amelynek futásteljesítménye nem haladja meg a napi 300 km-t. A 300 km alatti napi futásteljesítményt a jelenlegi elektromos buszok többsége képes teljesíteni úgy, hogy napközben nem szükséges a buszt tölteni. Ez lehetőséget ad arra, hogy a Volánbusz 1000 darab elektromos buszt üzemeltessen országszerte. Az ezer elektromos busz évente mintegy 65 ezer tonna széndioxid kibocsátást takarít meg.

Az elektromos és dízel buszok élettartam költségének összehasonlításakor azonos futásteljesítményt és azonos üzemeltetési körülményeket feltételezek. A kalkulációban figyelembe vettem az autóbusz beszerzési árakat, a karbantartási költségeket, az üzemanyag fogyasztást, az elektromos buszok töltőinfrastruktúrájának kiépítési költségeit és az elektromos buszok meghajtóakkumulátorainak élettartamát. Nem vettem figyelembe a CO<sub>2</sub> megtakarítás értékét.

Az elektromos buszok meghajtó (nagy feszültségű) akkumulátorainak hasznos élettartama jelenleg tapasztalati úton még nem határozható meg, mert még az első ütemben üzembehelyezett buszokban

elhelyezett akkumulátorok is üzemelnek (néhány hibás koncepcióval megépített busztípus kivételével). Az akkumulátor teljesítmény csökkenésének mért adatai alapján elemző modellek szerint, a busz üzemben elvárt paramétereket (energia sűrűség, teljesítmény leadási képesség, külső hőmérséklet változás tûrése) várhatóan 10-15 éves idôszakra tudják a jelenleg mûködô akkumulátorok biztosítani. A maximum és minimum értékek közötti különbség nem csak az akkumulátor típusától függ, hanem az üzemeltetés körülményeitôl is. (a kisütés mélysége, a feltöltés mértéke, a töltési ciklusok száma, külső hőmérséklet, stb.) A kalkulációban a legrosszabb lehetőséggel számolok és az akkumulátort a mûködés tizedik évében újra cserélem. Tekintettel arra, hogy a tíz éves akkumulátor még 75-85%-os kapacitással rendelkezik és a hasznos élettartalma fixen telepített tárolóban még legalább 10 év, ezért feltételezem, hogy a használt akkumulátor az új akkumulátor árának 50%-ért értékesíthetô. Feltételezem, hogy a cserélt akkumulátor már élelciklusa végéig kiszolgálja az elektromos buszt.

A tervezett 1000 elektromos buszt maximum 25 különbözô telephelyen üzemelne, telephelyenként 20-100 db busz elhelyezésével. Ez az üzemméret lehetővé teszi a buszok hatékony üzemeltetését, és ekkora méretnél a buszok töltéséhez szükséges elektromos energia is reálisan biztosítható.

Az elektromos buszok energia ellátásának két különbözô esetét vizsgálom. Mindkét esetben úgy kalkulálok, hogy egy darab töltôberendezés négy busz töltését képes ellátni kellô üzembiztonsággal. Az elsô esetben a buszok töltése hálózatról vett energiával történik, kizárólag az éjszakai órákban. A második esetben a telephelyekre napelem és akkumulátoros energiátároló rendszer telepítésével számolok, amely zöld energiával látja el a telephely buszait, a telephely egyéb létesítményeit. A különbözô telephelyeken megtermelt energiát egy Volánbusz Energiaközösségen belül a telephelyek megosztják egymással, így elôsegítve a pillanatnyi teljesítmény egyensúly fenntartását. A saját igényekhez képest többlet megtermelt napenergia egy részének értékesítésével kalkulálok. A Volánbusz Energiaközösség számára további üzleti lehetôség aFRR<sup>1</sup> szolgáltatóként is belépni az energiapiacra, de ezzel a jelenleg bemutatott modell nem foglalkozik.

Fontos hangsúlyozni, hogy az elektromos buszok energiafogyasztása jelentôsen megnöveli az üzemeltetô telephelyek energiaigényét. A jelenleg üzemelô 101 elektromos busz tapasztalatai alapján azokon a telephelyeken, ahol a buszok száma 10 vagy a fölötti, a buszok energia fogyasztása már jelentôsen meghaladja a telephely egyéb fogyasztóinak fogyasztását. Nagyobb elektromos busz darabszám esetén a telephely fogyasztása többszörösége növekszik, aminek ellátásához fejleszteni szükséges a hálózatot. Ez a nagy mértékû fogyasztás növekedés indokoltá teszi helyi naperômû vagy egyéb helyi zöld energia elôállító rendszer üzembehelyezését is.

1. Az elektromos buszok üzemeltetésének gazdasági lehetôségei hálózati energia vásárlása esetén
  - a. Az elektromos buszok futásteljesítményének hatása az üzemeltetési költségre

A Volánbusz elektromos buszainak átlagos futásteljesítménye 2023-ban ~150 km/nap volt, ami jelentôsen elmarad a hasonló fordákon üzemelô dízelbuszok 240 km/nap futásteljesítményétôl. Ennek oka, hogy az elektromos buszok üzembeállításukkor olyan fordákba kerültek, amelyeket biztonsággal tudtak teljesíteni az akkumulátor lemerülésének kockázata nélkül.

---

<sup>1</sup> Az "automatic Frequency Restoration Reserve", (aFRR) szolgáltatás az elektromos hálózat pillanatnyi egyensúlytalanságainak (a felhasználni kívánt energia pillanatnyilag kevesebb, vagy nagyobb, mint az éppen megtermelt energia) kiegyenlítését segíti. Az energia tároló a MAVIR igényei és a saját képességei szerint termelôként vagy fogyasztóként lép be a rendszerbe, és ezzel elôsegíti a hálózat egyensúlyának fenntartását.

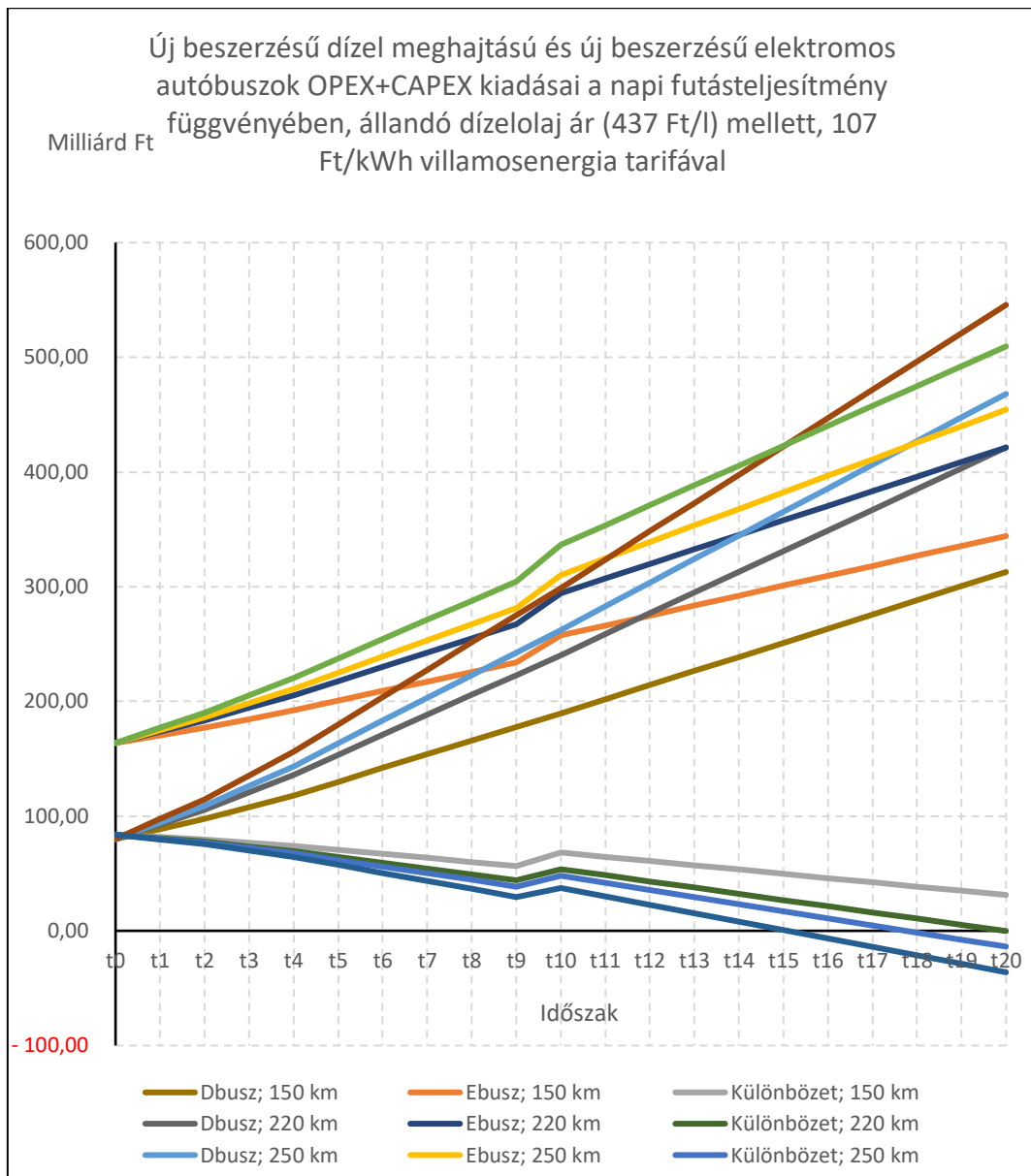
A **29. ábrán** bemutatom, hogy a napi futásteljesítmény növelésének milyen hatása van az elektromos buszok összköltségére, és az hogyan viszonyul az azonos futásteljesítményű dízelbuszok összköltségéhez. Az elemzéshez a Volánbusz jelenleg érvényes villamosenergia tarifáját és a jelenlegi dízelolaj egységárat vettem figyelembe a teljes időszakra.

**3. táblázat: Adatkörök- a villamosenergia díj változás elemzése**

<b>Adatkörök - a villamosenergia díj változás elemzése</b>	
Autóbusz darabszám:	1 000 db
Autóbusz kihasználtsági határfok:	90%
Napi futásteljesítmény:	250 és 300 km/nap
Üzemeltetési napok száma egy évben:	300 nap
E-buszok éves futásteljesítménye:	40 500 000 km
E-buszok átlagos villamos energia fogyasztása:	1,1 kWh/km
Töltőberendezések száma:	250 db
Töltőberendezés és a telepítés beruházási egységára:	15 000 000 Ft/db
Dízelbusz ára	80 000 000 Ft
Elektromos busz ára	160 000 000 Ft
Ebusz/Dbusz üzemeltetési költség aránya (üa.nélkül)	55%
Új akkumulátor egységára e-buszokba (10. évben):	30 000 000 Ft/db
Villamosenergia díj egységár	<b>Változó</b>
dízel üzemanyag ár	437 Ft/l

Az elemzés rámutat arra, hogy a jelenlegi futásteljesítmény mellett az elektromos buszok összköltsége a teljes élettartam alatt magasabb, mint a dízel buszoké. (Ezért jelenleg kizárólag vissza nem térítendő támogatás igénybevételével vásárol Volánbusz elektromos buszokat.) 220 km/nap futásteljesítmény esetén az elektromos és dízel buszok TCO-ja a 20. év végén lesz egyenlő, azaz a buszok életciklusának legvégén. A futásteljesítmény növelésével az elektromos buszok költségelőnyei jobban érvényesülhetnek. Az elmúlt évek üzemeltetési tapasztalatai alapján ismert, hogy a napi futásteljesítmény legtöbb busz esetén növelhető anélkül, hogy a busz akkumulátorának lemerülésétől kellene tartani, ezért javaslom, hogy ahol lehet, növeljék a buszok futásteljesítményét.





29. ábra Új beszerzésű dízel és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében

b. Az elektromos áram árváltozásának hatása az elektromos buszok üzemeltetési költségére

A Volánbusz villamosenergia szolgáltatásra kötött szerződése alapján az ország területén egységes, és a teljes időszakra állandó tarifával vásárolja az energiát. A több fix és forgalomfüggő tétel országos átlaga ~107 Ft/kWh, ami nagyon kedvezőnek mondható. A 2022-es energiaválság ugyanakkor rámutatott arra, hogy az energiaár változása jelentős hatással van a Volánbusz költségeire, és így az elektromos buszok üzemeltetési költségeire is.

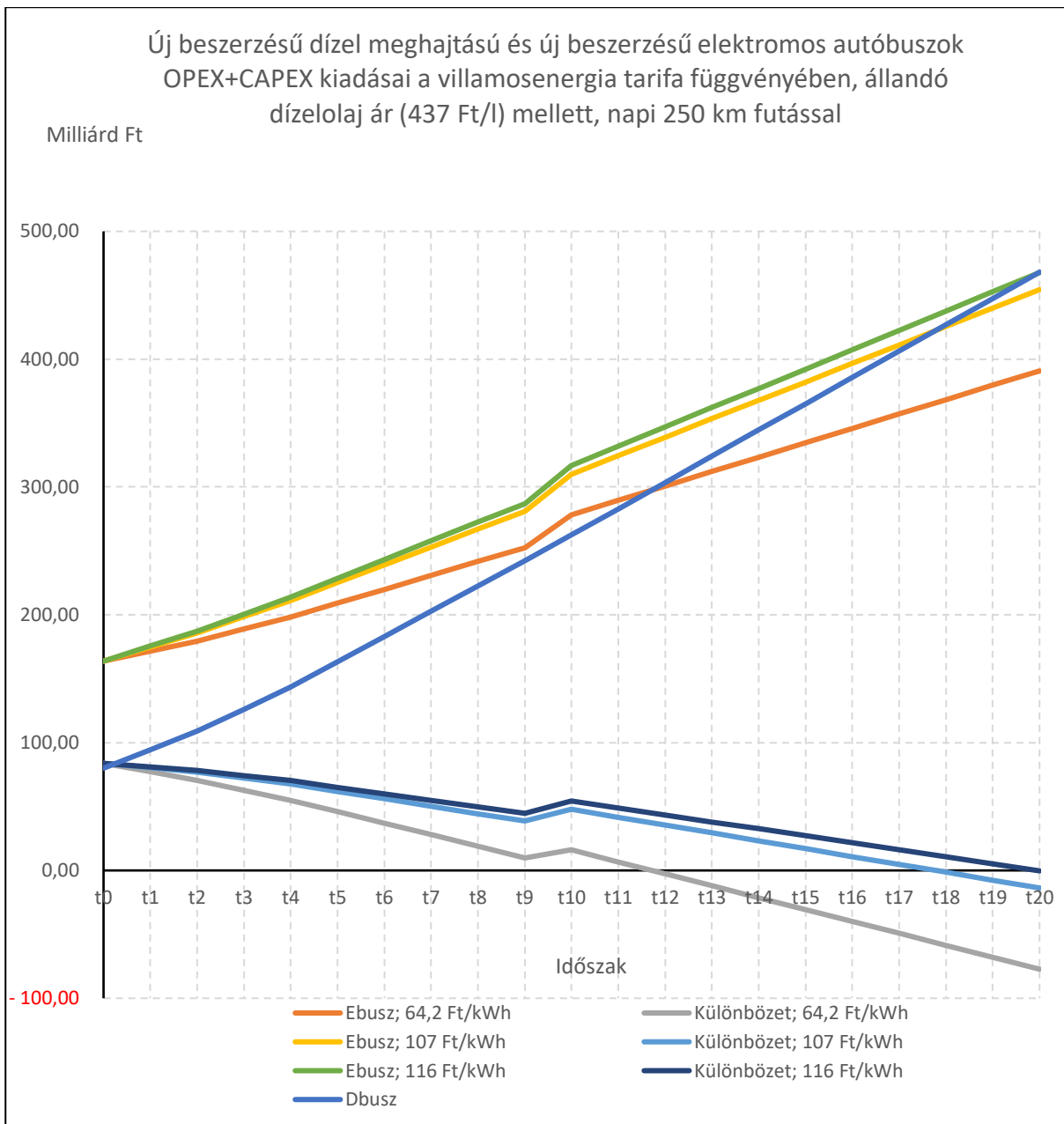
Megvizsgáltam, hogy az energia ár változásának milyen számszerű hatása lehet az elektromos buszok élettartam költségére. Az elemzéshez 250 km/nap, illetve 300 km/nap futásteljesítményt, és a jelenlegi dízelolaj egységárat vettem figyelembe a teljes időszakra. A buszokat kizárólag éjszaka töltik, ezért megvizsgáltuk egy völgyidőszaki tarifa bevezetésének hatását is.

**4. táblázat: Adatkörök - a futásteljesítmény változás elemzés**

Adatkörök - a futásteljesítmény változás elemzés	
Autóbusz darabszám:	1 000 db

Autóbusz kihasználtsági határfok:	90%
Napi futásteljesítmény:	<b>Változó</b>
Üzemeltetési napok száma egy évben:	300 nap
E-buszok éves futásteljesítménye:	40 500 000 km
E-buszok átlagos villamos energia fogyasztása:	1,1 kWh/km
Töltőberendezések száma:	250 db
Töltőberendezés és a telepítés beruházási egységára:	15 000 000 Ft/db
Dízelbusz ára	80 000 000 Ft
Elektromos busz ára	160 000 000 Ft
Ebusz/Dbusz üzemeltetési költség aránya (üa. nélkül)	55%
Új akkumulátor egységára e-buszokba (10. évben):	30 000 000 Ft/db
Villamosenergia díj egységár	107 Ft/kWh
dízel üzemanyag ár	437 Ft/l

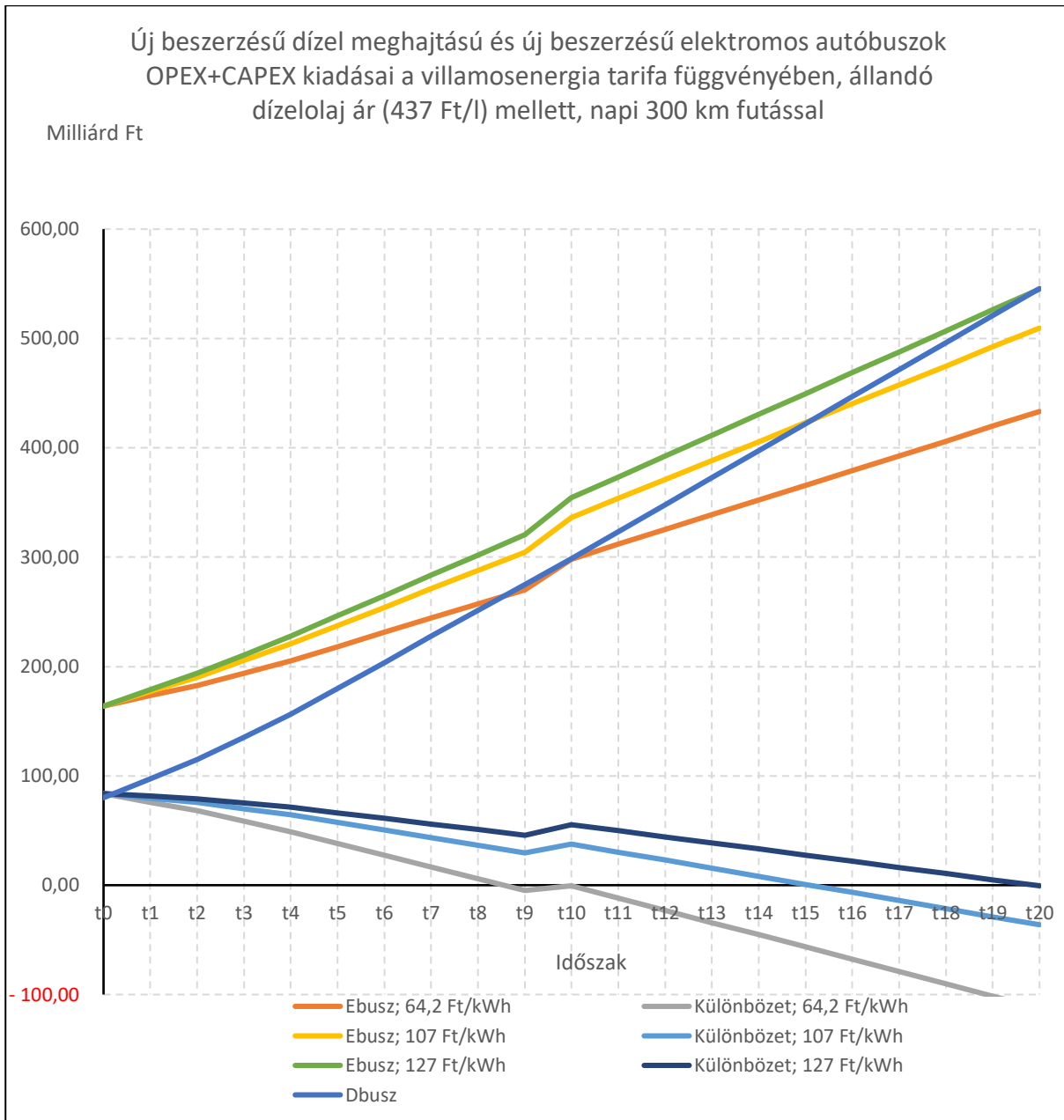
Az **30. ábrán** 250 km/nap futásteljesítmény mellett mutatom a jelenlegi tarifa (107 Ft/kWh) és egy 40%-kal csökkentett völgyidőszaki tarifa, valamint a 20 éves vizsgált időszak végén azonos elektromos és dízel busz TCO-t eredményező tarifa (116 Ft/kWh) mellett a költségek alakulását. 250 km/nap futásteljesítmény esetén a 8,4 % díjrugalmasságot tartalmaz a jelenlegi villamosenergia tarifa, azaz még 8,4 %-kal megemelt díj mellett is azonos lehet az elektromos és a dízel busz élettartamköltsége a tervezett élettartam (20 év) végére.



30. ábra Új beszerzésű dízel és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a villamosenergia tarifa függvényében napi 250 km futással

Az **31. ábrán** 300 km/nap futásteljesítmény mellett ismertetem a jelenlegi tarifa (107 Ft/kWh) és egy 40%-kal csökkentett völgyidőszaki tarifa, valamint a 20 éves vizsgált időszak végén azonos elektromos és dízel busz TCO-t eredményező tarifa (127 Ft/kWh) mellett a költségek alakulását. 300 km/nap futásteljesítmény esetén a 18,7 % díjrugalmasságot tartalmaz a jelenlegi villamosenergia tarifa, azaz még 18,7 %-kal megemelt díj mellett is azonos lehet az elektromos és a dízel busz élettartamköltsége a tervezett élettartam (20 év) végére.

Ábrán nem szerepel, de kiszámoltam, hogy a jelenlegi futásteljesítmény (150 km/nap) mellett 71 Ft/kWh villamos energia díj esetén lenne azonos az elektromos és dízel buszok élettartam költsége.



31. ábra Új beszerzésű dízel és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében napi 300 km futással

Az ábrák alapján megállapítom, hogy

- a villamosenergia tarifaváltozása jelentősen befolyásolja az elektromos buszok élettartam költségét, és már minimális energiaár változás is jelentős kockázatot jelent,
- a jelenlegi, 150 km/nap átlagos futásteljesítmény mellett az elektromos buszok fenntartása magasabb költséggel jár, mint a dízel buszoké,
- a buszok magasabb kihasználtsága (nagyobb futásteljesítmény) egyre jobban kiemeli az elektromos buszok üzemeltetésének a dízel buszokhoz képest mérhető költségelőnyeit,
- legalább 220 km/nap futásteljesítmény esetén, a jelenlegi tarifával számolva, gazdasági hasznot hoz elektromos buszt vásárolni dízel busz helyett abban az esetben is, ha nincs a vásárláshoz vissza nem térítendő támogatás.

2. Napelem és energiatároló rendszer kiépítésének hatása az elektromos buszok üzemeltetésére

Az elmúlt években tapasztalt jelentős energiaár emelkedés és ingadozás, valamint az energiahordozó hiány veszélye arra hívja fel a figyelmet, hogy az energiabiztonság és függetlenség megteremtése érdekében szükséges olyan beruházásokat megvalósítani, melyek ezeket a kockázati elemeket és kiszolgáltatottságot csökkentik.

Az 1000 elektromos busz üzembehelyezése szükségessé teszi a töltéshez szükséges infrastruktúra megteremtését. Ezen felül kiemelt fontosságú, hogy a szükséges villamos energiához a lehető legalacsonyabb áron és a legnagyobb ellátási biztonsággal jussunk hozzá. Ennek lehetőségét biztosíthatja a napelemparkok által termelt és energiatároló rendszerszerben eltárolt, saját előállítású villamos energia, mely a saját igények kielégítése mellett az ipar és közlekedés egyéb résztvevőinek igényét is ki tudná szolgálni, legyen az akár lakossági, akár vállalati.

A napelempark telepítését támasztja alá, hogy Magyarország hasznosítható napenergiában gazdagnak mondható, tekintettel az évi 1500 órát is meghaladó napsütéses órák számára.

A napelem és energiatároló rendszerek alapvető jellemzői

- a napelempark maximális leadható teljesítménye, melynek mértékegysége kWp (kilowatt peak), amely a napelemrendszer ideális körülmények között leadott maximális teljesítményét mutatja meg,
- az energiatároló névleges kapacitása, mértékegysége kWh, amely a tárolóba maximálisan betárolható energiamennyiséget mutatja meg,
- az energiatároló kisütési mélysége (%) az akkumulátor hasznos élettartamának növelése érdekében beállított érték, az akkumulátorból maximálisan kivehető energia arányát mutatja,
- az energiatároló rendszer hatásfoka (%) a be- és kitárolási energiamennyiség közötti arányt mutatja.

Gyártói információk alapján a napelem várható hasznos élettartama 30 év, az energiatároló várható hasznos élettartama 20 év.

A modellben a 25 telephelyen üzemelő 1000 busz és a telephelyek tevékenységének kiszolgálását egységes rendszerben ellátó napelem és energiatároló rendszerrel kalkulálok. A modellben vizsgált napelem és az energiatároló rendszer méretezésekor alapvető szempontként figyelembe vettem, hogy a teljes beruházás (elektromos busz és energiarendszer együtt) élettartam költsége legfeljebb 20 év alatt érje el az azonos körülmények között üzemelő dízelbuszok élettartam költségét.

Az elektromos buszok töltését a modellben az éjszakai órákra időzíttem, azaz a napelem által termelt energiát az energiatárolón keresztül kapják meg a buszok. Annak érdekében, hogy az energiatároló az év nagy részében megfelelő mennyiségű energiát tudjon napközben eltárolni, a napelem méretét az átlag napsütési intenzitás közelébe kell méretezni. Ugyanakkor ez azt is jelenti, hogy a napelem az év jelentős részében sokkal több energiát termel, mint amennyit a tároló képes felvenni. A többlet megtermelt energia hasznosítására több lehetőség adódik, amelyeket akár együttesen is alkalmazni lehet:

- a telephely ipari fogyasztóinak rákapcsolása a napelemes rendszerre – a telephely nappali fogyasztásának jelentős részét képes fedezni ezzel az „ingyen” energiával, javítva a hatékonyságot;
- a telephely közelében elhelyezkedő ipari telephelyek számára villamosenergia értékesítés;
- közületi (futárszolgálat, Posta, éjszakai kiszállítással foglalkozó kereskedők stb.) elektromos flottáinak nappali töltése – ezzel az egyébként nappal kihasználatlan töltőinfrastruktúra is gazdaságosabbá válik, és a közöletek szabályozottan tudnak a töltőkre beállni;
- magánszemélyek elektromos autóinak töltése, ahol erre a telephely kialakítása lehetőséget ad;
- az energia visszatáplálása a hálózatba, amennyiben a jogszabály erre lehetőséget ad.

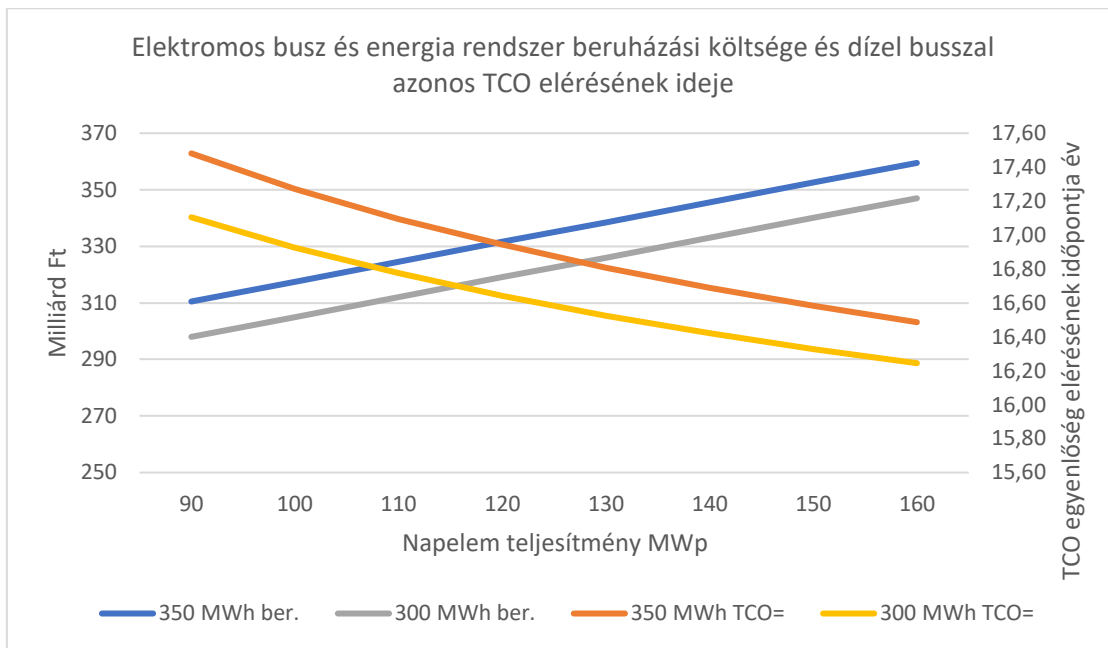
A modell kalkulációban a buszok és a telephely energiaellátását követően még rendelkezésre álló energia 50%-ának, a hálózati villamosenergia tarifa díjának 75%-án történő értékesítésével számoltam.

- a. A napelem és az energiatároló rendszer méretezésének gazdasági hatása az 1000 elektromos buszt üzemeltető Volánbuszra

**5. táblázat: Adatkörök - energiarendszer elemzés**

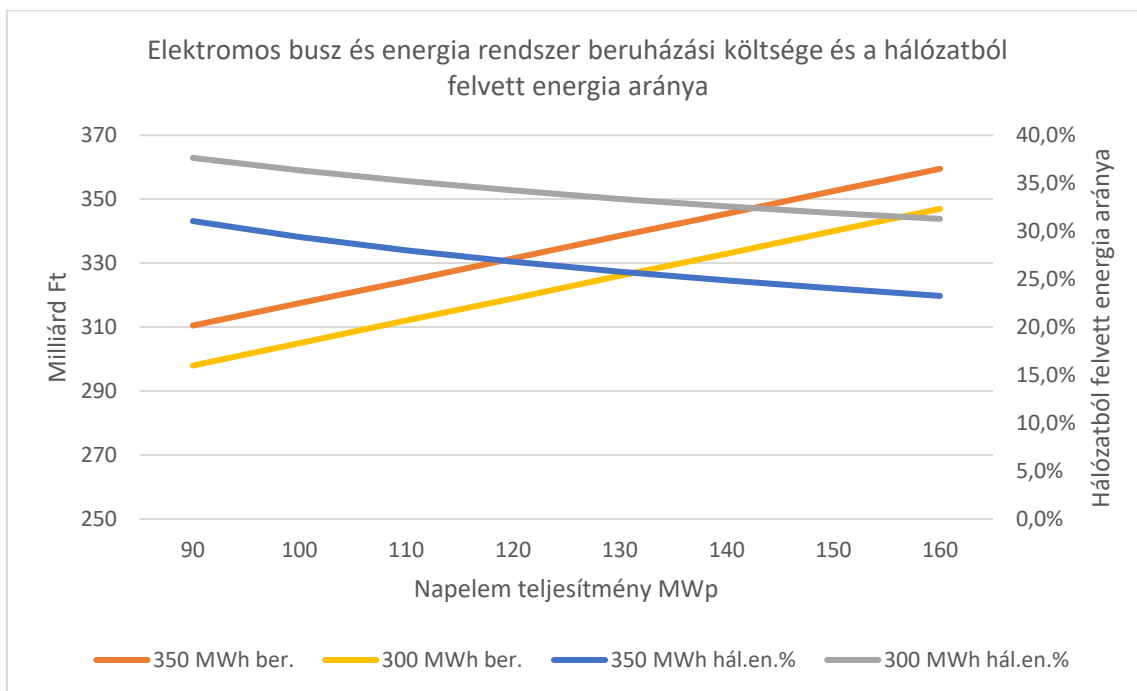
<b>Adatkörök - energiarendszer elemzés</b>	
Autóbusz darabszám:	1 000 db
Autóbusz kihasználtsági határfok:	90%
Napi futásteljesítmény:	300 km/nap
Üzemeltetési napok száma egy évben:	300 nap
E-buszok éves futásteljesítménye:	40 500 000 km
E-buszok átlagos villamos energia fogyasztása:	1,1 kWh/km
Töltőberendezések száma:	250 db
Töltőberendezés és a telepítés beruházási egységára:	15 000 000 Ft/db
Dízelbusz ára	80 000 000 Ft
Elektromos busz ára	160 000 000 Ft
Ebusz/Dbusz üzemeltetési költség aránya (üzemanyag nélkül)	55%
Új akkumulátor egységára e-buszokba (10. évben):	30 000 000 Ft/db
Villamosenergia egységár	107 Ft/kWh
dízel üzemanyag ár	437 Ft/l
Napelem teljesítménye	Változó
Energiatároló kapacitása	Változó
Energiatároló kisütési mélysége	80%
Energiatároló határfoka	90%
Napelem beruházási egységár (tervezés, kivitelezés, infrastruktúra felújítása):	700 000 Ft/kWp
Energiatároló beruházási egységár:	250 000 Ft/kWh
Többlet napenergia értékesítés aránya	50%
Napenergia értékesítés egységárának aránya a vásárolt energia egységárához	75%
Az energiaberuházást üzemeltető telephelyek ipari energia felhasználása	9 586 299 kWh/év
Ebusz - Dbusz élettartam költség egyenlőség időpontja	<b>Változó</b>
A beruházás után is hálózatról vett energia aránya	<b>Változó</b>
Dízel busz beruházás értéke	<b>Változó</b>
Elektromos busz és energiarendszer beruházás értéke	<b>Változó</b>

A **32. ábra** mutatja, hogy nagyobb napelem teljesítmény javítja a megtérülést, de a nagyobb energiatároló rontja azt. A beruházás mértéke lineárisan változik a teljesítmény változással.



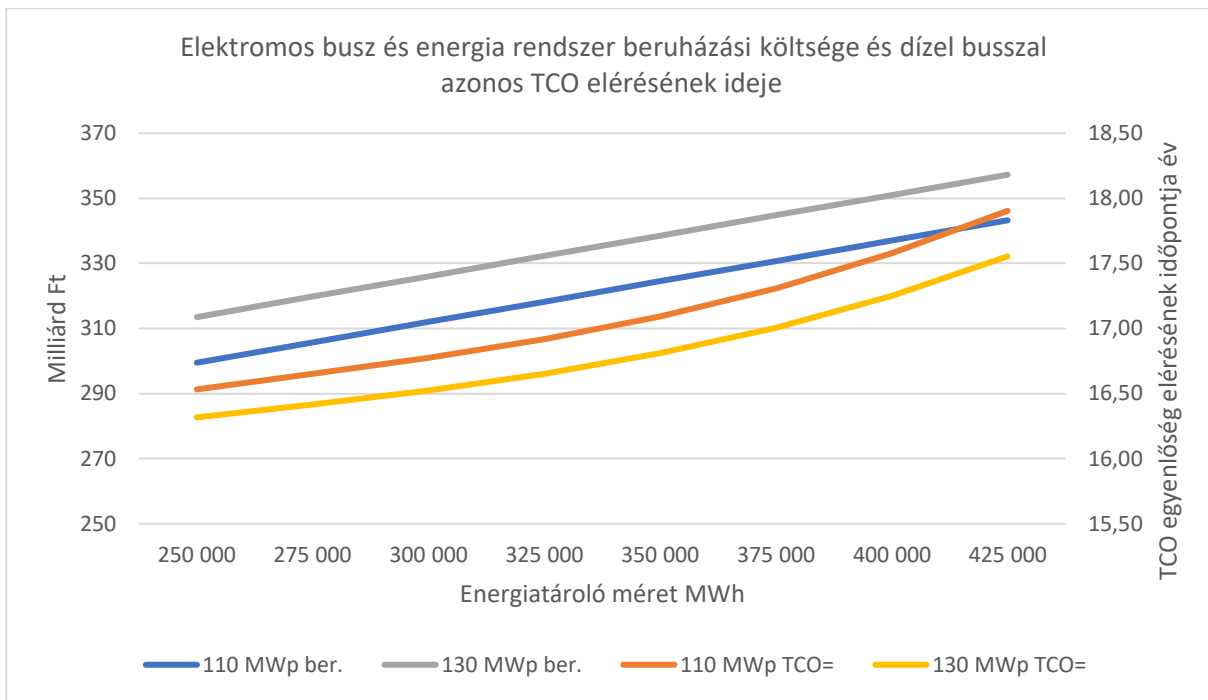
32. ábra Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és dízel busszal azonos TCO elérésének ideje

A beruházás növelésének jelentős hatása van a továbbra is hálózathoz felvett energia mennyiségére, és az 33. ábrán az is látszik, hogy a nagyobb energiatároló kapacitás esetén a hálózati energia felvétel meredekebben csökken.



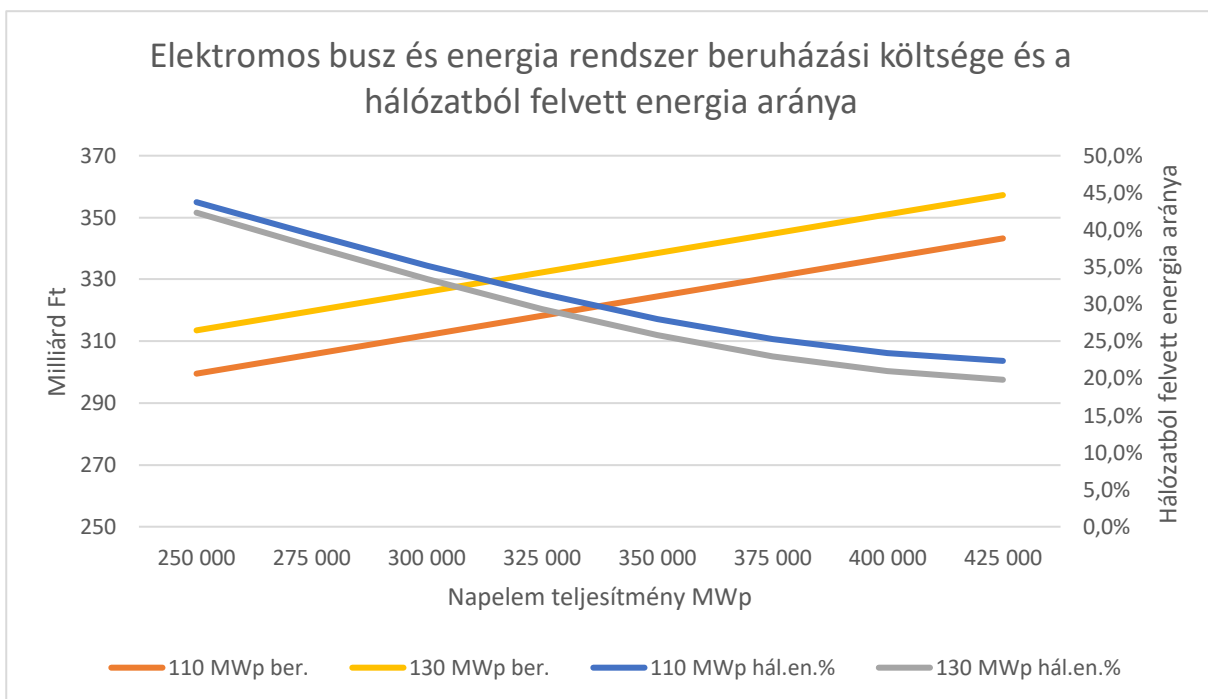
33. ábra Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és a hálózathoz felvett energia aránya

Ahogy az előzők alapján várható volt, a 34. ábrán látható, hogy az energia tároló méretének növelése rontja a megtérülést.



34. ábra Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és dízel busszal azonos TCO elérésének ideje

A 35. ábrán jól látszik, hogy az energiatároló méretének növelése egy pontig lineárisan javítja a hálózati energia megtakarítást, aztán telítésbe fordul.



35. ábra Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és a hálózatról felvett energia aránya

Az elemzés alapján az optimális rendszerméretet kb. 110 MWp napelem és 300 MWh energiatároló jelenti. A beruházás további optimalizálása a rendelkezésre álló pénzügyi források ismeretében végezhető el.



A **6. táblázatban** összefoglaltam az általam optimálisnak tartott rendszer főbb paramétereit.

**6. táblázat: A rendszer főbb paramétereit**

110 MWp napelem és 300 MWh energiatároló, 1000 elektromos busz fő mutatói	
Az ipari tevékenység által közvetlenül felvett napenergia	4 254,3 MWh/év
Az ipari tevékenység által az energiatárolón keresztül felvett napenergia	3 582,5 MWh/év
A buszok által közvetlenül felvett napenergia	0 MWh/év
A buszok által az energiatárolón keresztül felvett napenergia	56 112,1 MWh/év
Az értékesíthető napenergia	62 431,4 MWh/év
A buszok töltéséhez hálózati energiát használó napok száma	358 nap/év
A buszok töltéséhez a hálózatból felvett energia aránya %	37,0%
A telephely (ipari és busz) ellátásához hálózatról felvett energia aránya	35,2%
Dízel busszal azonos TCO elérésének időpontja	16,8 év
Összes hasznosított napenergia	63 949 MWh/év
Energiarendszer és busz beruházás összesen	312 milliárd Ft

Fontos hangsúlyozni, hogy az elektromos busz és energiarendszer beruházás és annak üzemeltetése a 17. év végére kisebb életartam költséget mutat, mint a dízel busz beruházás úgy, hogy az elektromos rendszer beruházása vissza nem térítendő támogatás nélkül valósul meg. Ennek feltételeit újra összefoglalva:

- a buszok futásteljesítménye 300 km/nap,
- a többlet megtermelt napenergia legalább 50%-a értékesíthető,
- a dízel és elektromos energia ára egymással kb. arányosan változik a jövőben (a modell állandó dízel és villamosenergia árral számolt),
- rendelkezésre áll Volánbusz számára annyi terület, amelyen a tervezett napelem mennyiség elhelyezhető.

**Az ismertetett esettanulmány eredménye, különböző gazdasági modelljei alátámasztja a disszertációban ismertetett első hipotézisben megfogalmazott keretrendszert. Bizonyítást nyert, hogy lehetséges olyan zöld átmenet, amely nem csupán környezetvédelmi szempontból, hanem gazdasági aspektusból is fenntartható egy közösségi közlekedésben tevékenykedő vállalatnak.**

## 9.2 Melléklet: Az elektromos töltőből kinyert adatok.

Töltésazonosító	A töltés munkamenet egyedi azonosítója (betűk és számok).
Postai irányítószám	A töltőberendezés telepítési helyének postai irányítószáma.
Város	A töltőberendezés telepítési helyének város megnevezése.
Utca	A töltőberendezés telepítési helyének utca megnevezése.
Töltőberendezés azonosító	Az elektromos járművek töltésére szolgáló töltőberendezés egyedi azonosítója.
Töltőállomás azonosító	Az elektromos járművek töltésére szolgáló töltőállomás egyedi azonosítója.
Csatlakozó száma	Az adott töltőberendezésen a töltés során használt csatlakozó száma.
Csatlakozó azonosító	Az adott töltőberendezésen a töltés során használt csatlakozó egyedi azonosítója.

Átlagos kW	A töltés teljes időtartama során mért villamos teljesítmény átlagos értéke.
Aktuális töltöttség szint (SOC%)	Az elektromos jármű akkumulátorainak %-os arányban meghatározott töltöttség szintje.
Kezdő töltöttség szint (SOC%)	Az elektromos jármű akkumulátorainak %-os arányban meghatározott kezdeti töltöttség szintje.
Extra parkolás	Volánbusz esetében nem használt
Országkód	A töltőberendezés üzemeltetési helye szerinti ország rövidített jelölése.
Töltőpartner azonosító	A töltőberendezés üzemeltetőjének rövidített neve.
Töltés kezdő időpontja (UTC)	A töltés kezdő időpontja amikor a töltőberendezés a járművet sikeresen felismeri.
Töltés befejező időpontja (UTC)	A töltés befejező időpontja, amikor a töltőcsatlakozó a járműről oldódik.
Időtartam (másodperc)	A töltés kezdő és befejező időpontja között eltelt időtartam másodpercekben.
Betöltött energiamennyiség (Wh)	A töltés kezdő és befejező időpontja között a töltőberendezésben elhelyezett töltőberendezés által betöltött energiamennyiség.
Bruttó ár	Volánbusz esetében nem használt
Nettó ár	Volánbusz esetében nem használt
ÁFA	Volánbusz esetében nem használt
Pénznem	Volánbusz esetében nem használt
Rfid kulcs	A járműhöz rendelt, a töltés indításhoz szükséges egyedi RFID azonosító.
Rfid név	A járműhöz rendelt, a töltés indításhoz szükséges egyedi RFID azonosító neve.
Rfid típus	A járműhöz rendelt, a töltés indításhoz szükséges egyedi RFID azonosító típusa.
Számla sorszáma	Volánbusz esetében nem használt
Számlázási azonosító	A töltést vételező társaság egyedi azonosítója számlázáshoz.
Számlázási ország	Számlázás szerint honos ország.
Számlázási város	A töltést vételező társaság székhelyének címe (város).
Számlázási irányítószám	A töltést vételező társaság székhelyének postai irányítószáma.
Számlázási csoportkód	Volánbusz esetében nem használt
Számlázási adószám	A töltést vételező társaság adószáma.
Számlázási telefonszám	Volánbusz esetében nem használt
Menetlevélszám	Elektromos jármű aktuális menetlevelének egyedi sorszáma, mely a jármű azonosítója.
Km óra állás (kézi felvitel)	A jármű km óra állása tankoláskor, mely a töltés során vagy befejezésekor felvett.
Km óra állás mértékegység	A km óra állás mértékegysége.
Azonosító	A tankolást végző gépkocsivezető egyedi azonosítószáma, vállalati töltés esetén.
Rendszám országazonosító	A jármű üzembehelyezés szerint honos országának rövidített jelölése.
Rendszám	A jármű forgalmi rendszáma, amennyiben szükséges, a töltés során vett fel.

### 9.3 Melléklet: Az elektromos autókból kinyert adatok

Töltéssel töltött idő (h)	Amikor a töltő csatlakoztatva van és töltés folyamatban van.
Töltéskor felvett energia (kWh)	A járműbe töltött energia az adott napon.
Dátum	
Alvázszám	VIN szám.
Átlagsebesség (km/h)	Autóbusz átlagsebessége az adott napon ("gyújtás" bekapcsolt állapotban).

Mozgásban töltött idő (h)	Időtartama maikor a busz sebessége nagyobb, mint nulla.
Összes km futás (km)	Megtett összes út a jármű teljes eddigi élettartama alatt.
Napi km futás (km)	Adott napon megtett távolság.
Maximális sebesség (km/h)	Adott napon elért maximális sebesség.
"Durva" gyorsítás (alkalom)	Adott napon a küszöbérték feletti gyorsítások száma.
"Durva" fékezés (alkalom)	Adott napon a küszöbérték alatti negatív gyorsulások (lassulások) száma.
Napi üzemidő (óra)	Az adott napon üzemben töltött idő, beleértve a vezetési időt is.
Visszanyert energia (kWh)	A regeneratív fékrendszerrel adott napon visszanyert (termelt) energia.
Összes fogyasztás (kWh)	Összesített fogyasztás a jármű teljes eddigi élettartama alatt.
Menet fogyasztás (kWh)	Az autóbusz mozgása közben felhasznált energia az adott napon.
Fajlagos fogyasztás (kWh/km)	Kilométerre vetített fajlagos menetfogyasztás.
Üzemi fogyasztás (kWh)	Az autóbusz üzemeltetése közben felhasznált energia az adott napon.
Akkucsomag 1 átlaghőmérséklet (°C)	Az 1-es számú akkumulátorcsomag átlagos hőmérséklete.
Akkucsomag 2 átlaghőmérséklet (°C)	A 2-es számú akkumulátorcsomag átlagos hőmérséklete.
Maximum akkumulátorhőmérséklet (°C)	Akkumulátorok legnagyobb hőmérséklete az adott napon.
Minimum akkumulátorhőmérséklet (°C)	Akkumulátorok legkisebb hőmérséklete az adott napon.
SOC - üzemkezdtekor (%)	Akkumulátor töltöttség szint (SOC%) az adott nap kezdetekor.
SOC - üzemzáraskor (%)	Akkumulátor töltöttség szint (SOC%) az adott nap végén (töltés után).
SOC - napi legkisebb érték (%)	Legkisebb akkumulátortöltöttség érték az adott napon.
SOC - napi legnagyobb érték (%)	Legnagyobb akkumulátortöltöttség érték az adott napon.
Üzem közben felhasznált akkumulátortöltöttség (%)	Akkumulátor töltés szint (SOC%) változás üzem közben, az adott napon.
Felvett töltés (%)	Akkumulátor töltésekor hány százalékot (SOC%) töltése valsult meg.
Töltési ciklusok száma (db)	Adott napon elvégzett töltések száma.
CO2 csökkentés (kg)	Hány kg szén-dioxidtól kímélte meg az autóbusz a légkört az adott napon.
Visszatermelés aránya (%)	A visszatermelt energia aránya a mozgás során felhasznált energiahoz képest.

## 9.4 Melléklet: Az 1. Akkumulátor állapotfelmérési jelentés

# Valence U27-36XP

Egyedi azonosító: CBJ152800214 (1529-006)

Mérést végezte:  
XTALIN Mérnöki Tervező Kft.

## Akkumulátor állapotfelmérés mérőeszközei



## CELLAFESZÜLTÉSÉK ELLENŐRZÉSE

### Leírás

Az akkumulátorban található összes cella feszültségének ellenőrzése a gyári BMS segítségével. Célja, hogy megállapítsuk az akkumulátorról, érdemes-e a többi mérés elvégzése. A cellafeszültségeknek 2.5V és 3.8V között kell lennie.

### Eredmény

Minden cella a biztonságos feszültségtartományon belül tartózkodik.

Cella #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Feszültség [V]	3.293	3.280	3.280	3.282	3.304	3.276	3.279	3.271	3.276	3.278	3.281	3.290

## TÖLTÉS

### Leírás

Számítógépes szoftver által vezérelt tápegységgel töltjük fel az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A töltést az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 0.5C-vel végezzük. A mérés közben mérjük a kiegyenlítés során kisütött energiát.

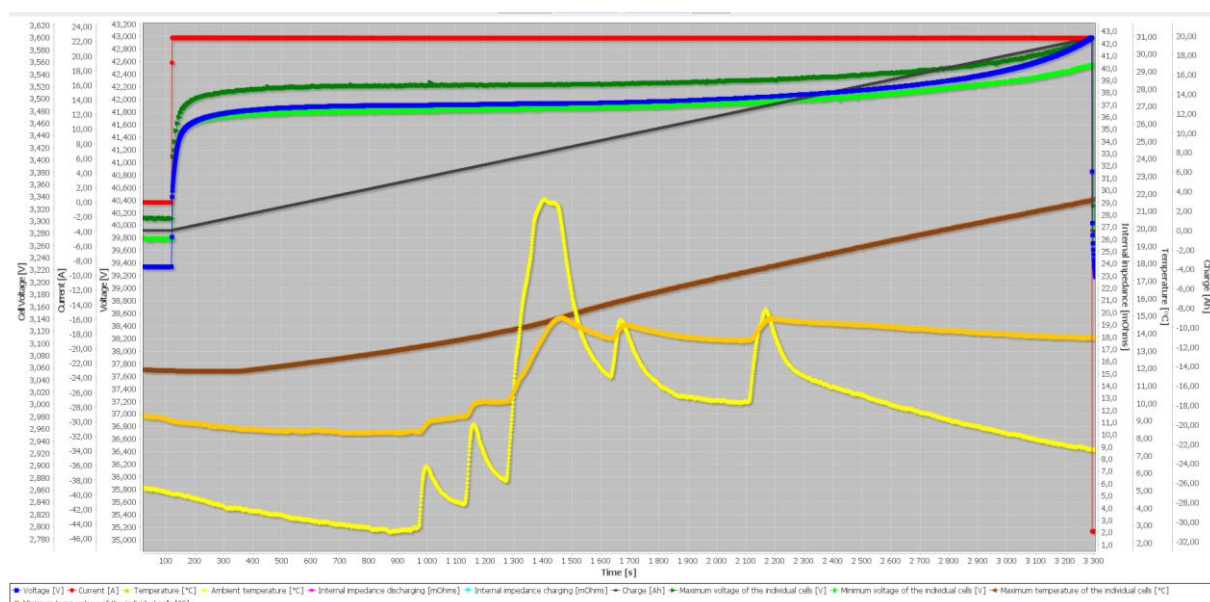
## Eredmény

Log fájl: Valence-U27-36XP-27-2023.11.08.13.21.53.401.xcell\_log

A mérés időtartama körülbelül 1 óra.

Az akkumulátort feltöltöttük, azaz legalább az egyik cella elérte a 3.6V-ot vagy a töltőáram 5A alá csökkent, tovább léphetünk a következő mérésre.

Cella #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Feszültség [V]	3.593	3.575	3.579	3.587	3.598	3.578	3.580	3.556	3.576	3.591	3.596	3.600



A cellafeszültségekből megállapítható, hogy a nincs komoly töltöttségkülönbség a cellák között.

# KAPACITÁS ÉS BELSŐ ELLENÁLLÁS MÉRÉSE

## Leírás

Számítógépes szoftver által vezérelt terhelés és tápegység található a mérési elrendezésben. A terheléssel mérjük az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedura közben mérjük a mérítés során kivett energiát, ebből határozzuk meg a kapacitást, továbbá előre meghatározott szinteknél mérítési és töltési DC belső ellenállást mérünk. Az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 1C-vel mérítjük és 0.5C-vel töltjük. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2.8V alá csökken.

## Eredmény

Log fájl: Valence-U27-36XP-27-2023.11.08.13.21.53.401.xcell\_log

A mérés időtartama körülbelül 1 óra 30 perc.

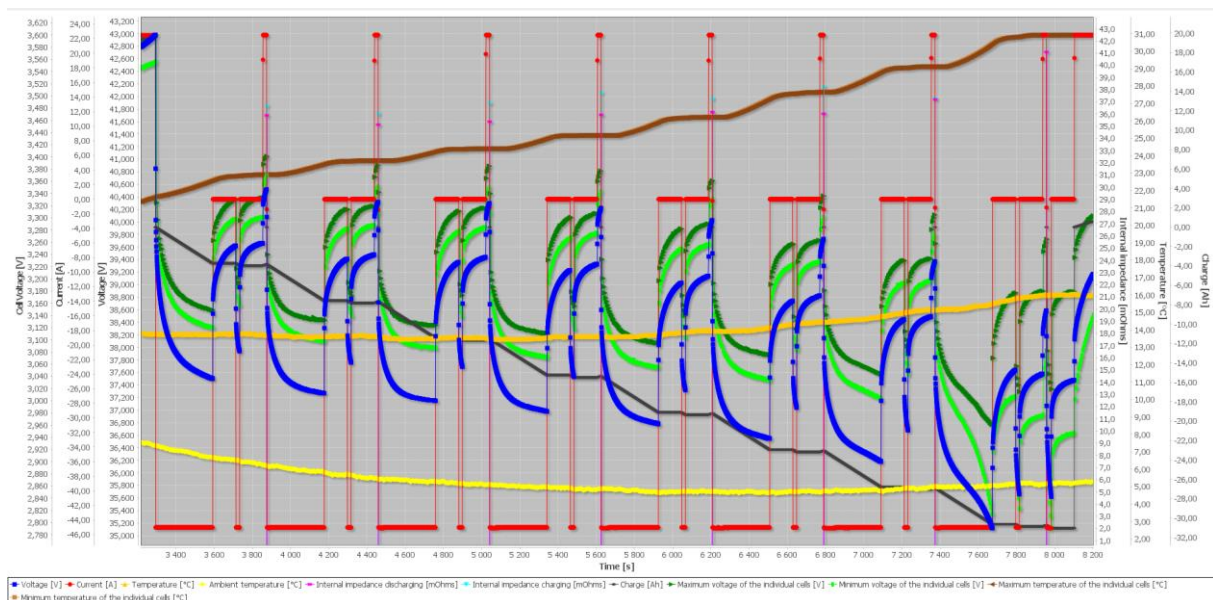
Teljes feltöltés után az akkumulátorból 31.036 Ah-t tudunk kisütni, ez az akkumulátor eredetileg vélt kapacitásának (45Ah) 69.0%-a. A mérítési belső ellenállás töltöttségi szinttől függően 35.1 – 37.2 mΩ között alakult, míg a töltési belső ellenállás 36.0 – 38.2 mΩ között volt.

		Belső ellenállás													
		Kisütött [Ah]	Teljes [mΩ]	C#1	C#2	C#3	C#4	C#5	C#6	C#7	C#8	C#9	C#10	C#11	C#12
Mérítési belső ellenállás [mΩ]	1	3.8	35.9	2.953	2.671	2.691	2.920	3.004	2.682	2.731	2.993	2.707	2.982	3.009	2.753
	2	7.5	35.1	2.896	2.651	2.631	2.876	2.942	2.618	2.664	2.940	2.620	2.938	2.984	2.720
	3	11.3	35.4	2.900	2.633	2.640	2.847	2.911	2.611	2.647	2.911	2.633	2.920	2.967	2.720
	4	15.0	35.9	2.962	2.731	2.718	2.918	2.973	2.696	2.740	2.951	2.696	3.009	3.051	2.829
	5	18.8	36.2	2.989	2.749	2.716	2.929	2.978	2.682	2.622	2.887	2.604	2.911	2.967	2.716
	6	22.5	36.0	3.027	2.773	2.698	2.909	2.942	2.684	2.720	2.929	2.673	3.018	3.087	2.851
	7	26.3	37.2	3.073	2.842	2.784	2.971	3.029	2.740	2.773	3.042	2.738	3.082	3.196	2.909
	8	30.0	41.1	3.307	3.109	3.011	3.193	3.322	3.002	3.020	3.629	3.029	3.338	3.431	3.156
Töltési belső ellenállás [mΩ]	1	3.8	36.6	2.978	2.711	2.764	3.031	2.902	2.760	2.720	2.991	2.720	3.058	3.049	2.809
	2	7.5	36.0	2.874	2.759	2.612	3.003	2.848	2.759	2.741	3.056	2.697	3.061	2.994	2.750
	3	11.3	36.8	2.986	2.840	2.791	3.062	2.915	2.840	2.760	2.955	2.688	2.977	3.080	2.848
	4	15.0	37.7	3.146	2.919	2.830	3.159	2.977	2.910	2.875	3.114	2.861	3.163	3.252	3.012
	5	18.8	37.2	3.141	2.901	2.759	3.101	3.008	2.834	2.857	3.057	2.812	3.150	3.283	2.923
	6	22.5	38.2	3.208	2.941	2.888	3.074	3.061	2.834	2.897	3.052	2.799	3.163	3.265	2.999
	7	26.3	37.2	3.114	2.870	2.821	3.003	3.061	2.799	2.808	3.154	2.777	3.110	3.199	2.959
	8	30.0	42.4	3.399	3.199	3.132	3.354	3.399	3.088	3.154	3.710	3.110	3.488	3.532	3.266

A 8. belső ellenállásokat nem vettem figyelembe, mivel azok már szinte teljesen lemerült állapotban kerültek mérésre.

A Valence U27-36 XP akkumulátorok gyártói adatlapja alapján a belső ellenállásuk 25 mΩ. Sajnos nincs megadva, hogy ez milyen töltöttség és hőmérséklet esetén érvényes, illetve azt sem fejtik ki, hogy ez csak mérítésre, vagy töltésre is egyaránt vonatkozik.

A mérítési átlag belső ellenállás 36.0 mΩ, ami 44%-kal nagyobb a gyári 25 mΩ-nál. A töltési átlag ellenállás 37.1 mΩ, ami 48.4%-kal nagyobb a gyári értéknél.



## KIEGYENLÍTÉS

### LEÍRÁS

A kiegyenlítés célja, hogy azonos feszültség szintre hozza az összes cellát, melyet az akkumulátorban található BMS végez el adott körülmények között. A mérés közben mérjük a kiegyenlítés során kisütött energiát. A gyári BMS 3.36V-os cellafeszültség felett és legalább 0.04V-os feszültségkülönbség esetén aktiválja a kiegyenlítést, azaz nem egyenlít ki 0.04V-nál kisebb eltéréseket. Külön kiegyenlítő mérést nem végeztünk, hanem a teljes mérés során rögzítettük a kiegyenlítés állapotát.

### EREDMÉNY

A kiegyenlítés során valami nem működik megfelelően az akkumulátor BMS-ében, ugyanis a legalacsonyabb feszültségű akkumulátorból sütötte ki a legtöbb energiát. Elképzelhető, hogy szennyeződés van az áramkörön, sérült, vagy hibás.

Cella #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kiegyenlítés során kisütött energia [Wh]	13.82	12.02	13.36	12.92	17.23	12.84	12.99	7.82	12.49	12.96	13.69	13.10
Legutolsó töltés utáni feszültség [V]	3.582	3.916	3.830	3.571	3.400	3.709	3.653	3.545	3.617	3.695	3.771	3.565

# CIKLIKUS KAPACITÁSMÉRÉS

## LEÍRÁS

Számítógépes szoftver által vezérelt terhelés és tápegység található a mérési elrendezésben. A terheléssel mérjük, a tápegységgel töltjük az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedúra közben mérjük a mérítés során kivett, illetve a töltés során felvett energiát, ebből határozzuk meg a kapacitást, továbbá előre meghatározott szinteknél mérítési és töltési DC belső ellenállást mérünk. Az akkumulátor névleges 45Ah kapacitásának megfelelően 1C-vel mérítjük és 0.5C-vel töltjük. A töltési és mérítési ciklusokat egymás után hajtjuk végre, közben nyomon követjük a kapacitás változását.

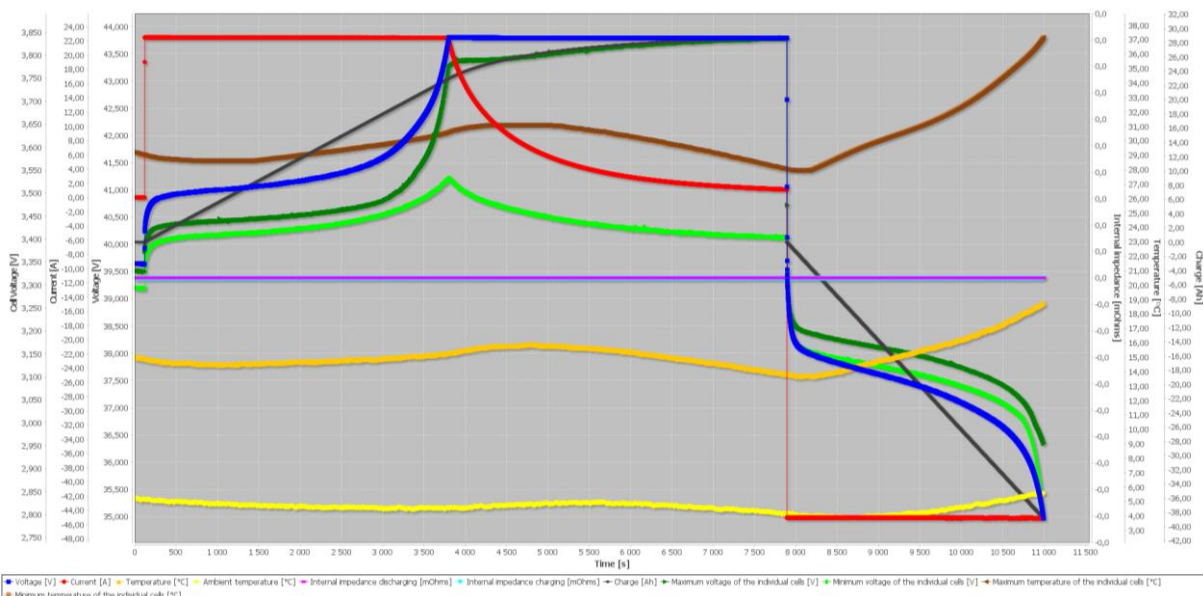
## EREDMÉNY

Log fájlok: Valence-U27-36XP-27-2023.11.08.16.12.38.77.xcell\_log  
Valence-U27-36XP-27-2023.11.10.15.43.16.815.xcell\_log  
Valence-U27-36XP-27-2023.11.11.11.27.09.899.xcell\_log  
Valence-U27-36XP-27-2023.11.12.21.10.04.651.xcell\_log  
Valence-U27-36XP-27-2023.11.13.11.30.25.134.xcell\_log

A mérés időtartama eddig körülbelül 180 óra.

Az összes mérést hűtött környezetben végeztük. A levegő hőmérséklete (sárga vonal)  $-6$  és  $8$  °C között volt minden mérés során. A narancssárga vonal jelöli az akkumulátor felületi hőmérsékletét, míg a barna vonal a BMS által küldött cellahőmérsékletet.

Az első ellenőrző mérést szobahőmérsékletű akkumulátorral indítottuk, de  $5$ °C-os közegben, így a korábbi akkumulátorokkal összehasonlítható ennek az akkumulátornak az állapota.

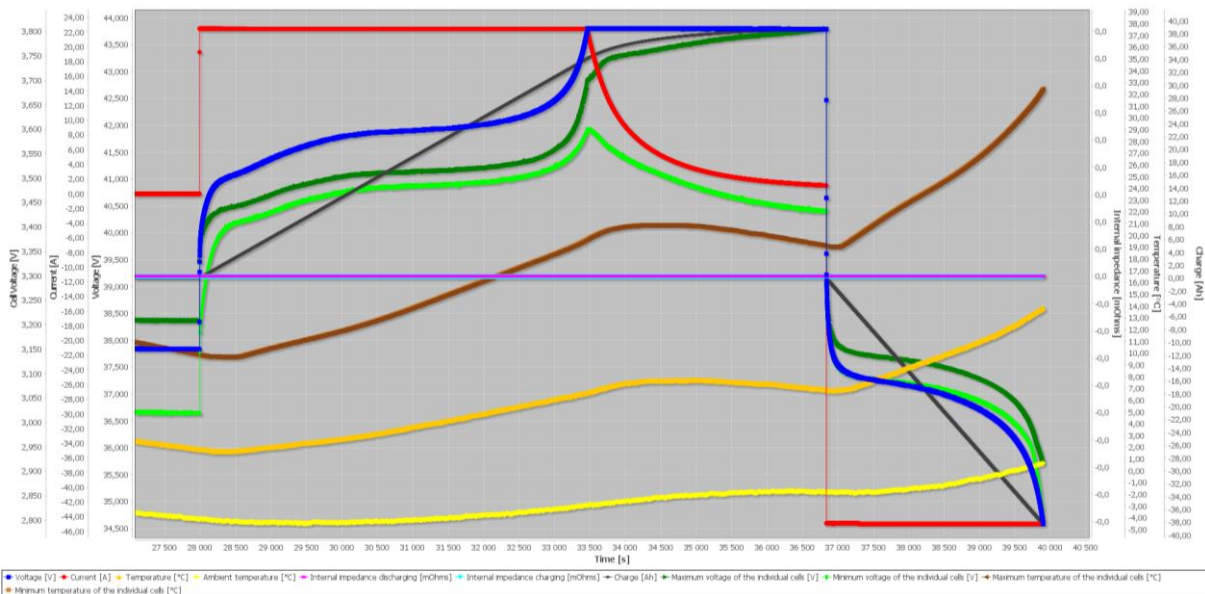


A fenti mérési diagrammokról jól látható, hogy az akkumulátor belső és felületi hőmérséklete jelentősen eltér egymástól ( $15$ - $20$ °C különbség), így az akkumulátor folyamatos használatban

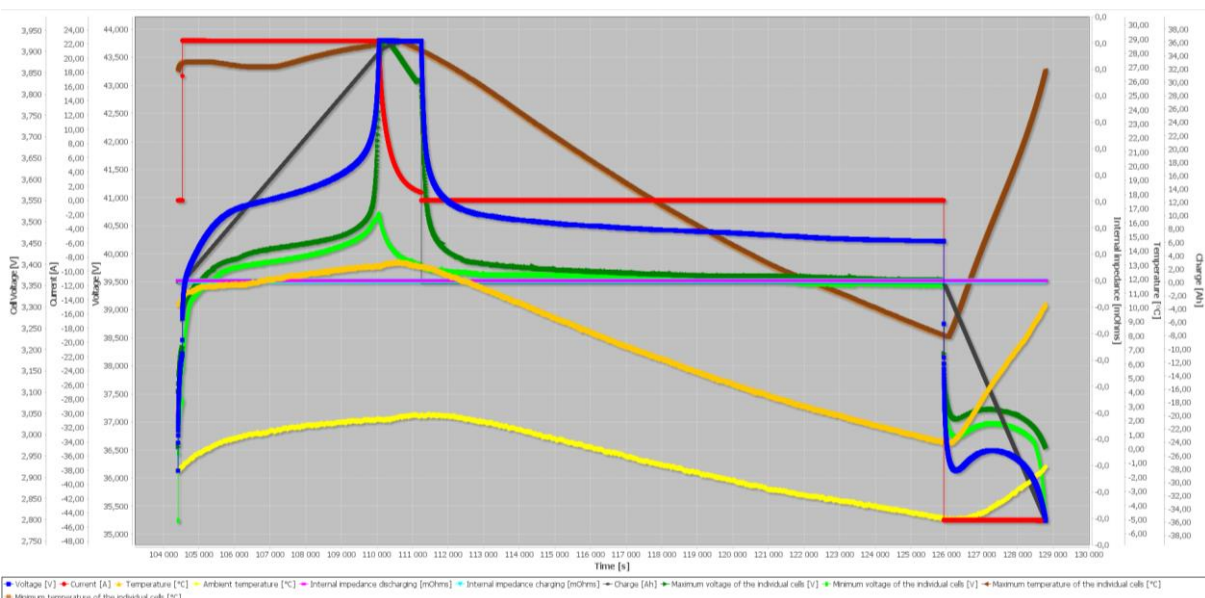


tartásával hideg (4-6°C-os) környezetben is működési hőmérséklettartományban tartható az akkumulátor.

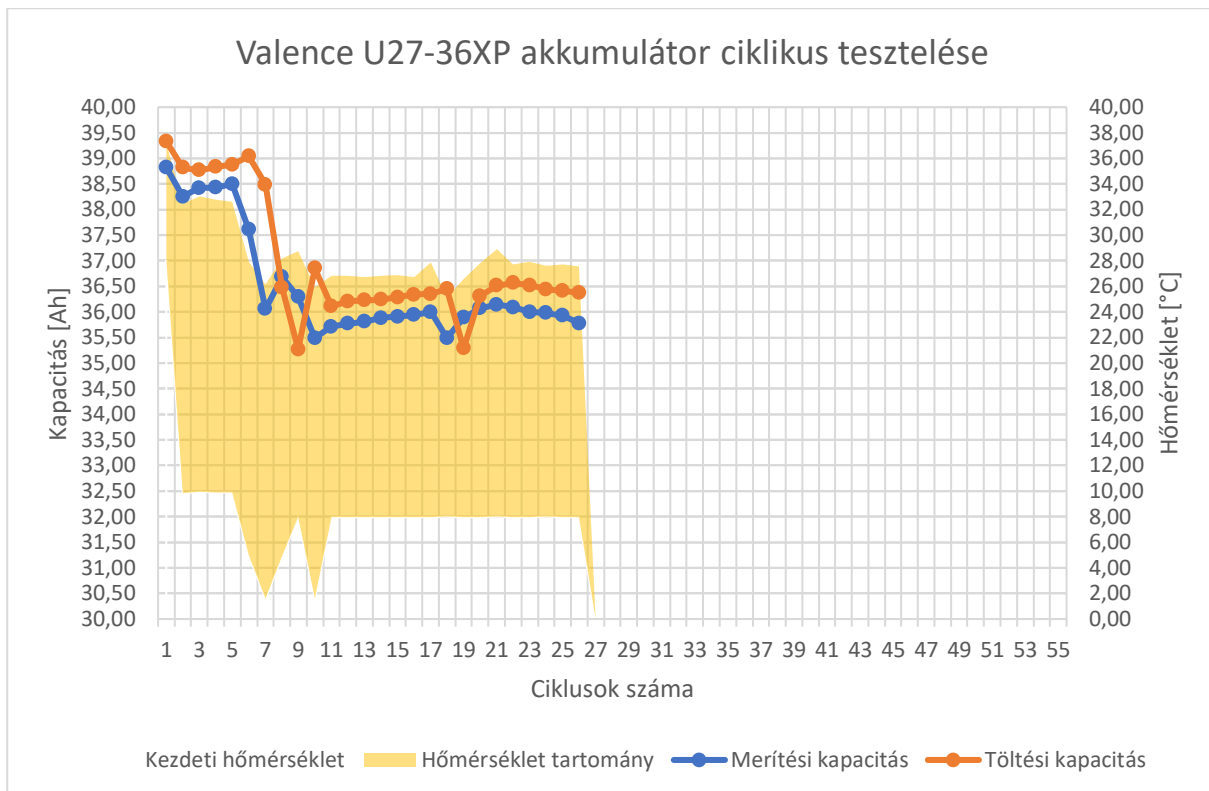
Ezt követte 4 ciklus, melyben a töltés előtti kiinduló hőmérséklet 10°C volt. A teljes töltés végére az akkumulátor 19°C-os hőmérsékletre emelkedett fel, és innen indult a merítés, mely során az akkumulátor 33°C-ig melegedett. Kapacitás tekintetében 38-39 Ah-t mértünk, ami hasonló az előző két akkumulátorhoz.



Ezt követően átállítottuk a mérést úgy, hogy ne töltés előtt, hanem merítés előtt hűtse vissza az akkumulátort 5°C alá. Így a kisütés során mért kapacitás jelentős mértékben csökkent 36 Ah-ra. Az akkumulátorhoz rossz hővezetőképessége miatt nagyon sokáig tart -5°C körüli hőmérsékletű közeggel is 5°C alá hűteni az akkumulátort, ezért a későbbiekben 8°C-ra hűtjük a modult. A töltés és merítés előtti hűtés további 3-4 órával növelte volna meg a 7 órás ciklusidőt, így csak a merítés előtti hűtést használtuk, hogy minél több ciklust tudjunk futtatni.



Az alábbi diagrammon láthatjuk sárgával az adott ciklus során mért cellahőmérsékletek tartományát, narancssárgával a töltés során felvett, míg késsel a merítés során leadott kapacitást. A környezet hőmérséklete -5 és 2 °C között volt, míg az akkumulátor hőmérséklete 8-28°C-os tartományban volt. Az akkumulátor belső ellenállása szobahőmérsékleten 36-38 mΩ volt, míg hidegen 46-50 mΩ.



A diagrammon látszik, hogy a balanszolás előrehaladtával kis mértékben ciklusról ciklusra nőtt az akkumulátor kapacitása, azonban a 20 ciklustól kezdve már csökkenő tendenciát mutat ciklusonként 0.05 Ah kapacitásvesztéssel. A mérés még folyamatban van, pontosabb adat nem állapítható meg.

## ÖSSZEFOGLALÁS (006, 027, 028)

### BEVEZETŐ

Ahogy a korábbi összefoglalóban is írtuk, ennyi információból nem tudunk mindenre kiterjedő választ adni az akkumulátor eddigi élete és jövőbeni viselkedése kapcsán. Ehhez legalább néhány akkumulátor teljes ciklizálására lenne szükség, hogy lássuk ezek az akkumulátorok pontosan hogyan viselkednek az életük végén. Nagyban segítene, ha az akkumulátor eddigi életéről kapnánk adatokat, például mennyi ideig volt a buszban, egy nap hányszor volt töltve, hány órát volt üzemben, mennyi töltési/merítési cikluson esett át a használat során, javarészt milyen hőmérsékleten üzemeltek, stb. Ezek hiányában csak és kizárólag feltételezésekbe bocsátkozhatunk.

### KIEGYENLÍTÉS

A 027 és 028 akkumulátorokról összességében kijelenthető, hogy a cellák közötti töltöttségkiegyenlítés nagyon rossz állapotban volt. A 028-as akkumulátorban rengeteget kellett balanszolni a cellákat, a 027-es akkumulátort pedig nem tudja kibalanszolni a beépített elektronika, itt valamilyen meghibásodásra gyanakszunk. (Látjuk azt is, hogy pontosan mi történik a balanszolás közben, nem a megfelelő cellát balanszírozza a BMS.) Mivel nem tudjuk a használat körülményeit, így nem állapítható meg a 028-as akkumulátor esetében az eltérés oka minden kétséget kizáróan, de az alábbi lehetőségek a legvalószínűbbek:

1. Egyszerűen csak soha nem várták meg a busz töltése során azt a plusz 1-2 órát, hogy kibalanszolja a cellákat a rendszer, és emiatt van ekkor eltérés.
2. Az az egy cella (#6) az akkumulátorban jelentősen nagyobb szivárgóárammal rendelkezik, mint a többi. Ez akár kialakulóban lévő cellazárlat előjele is lehet.
3. A BMS áramkörön a (#6)-so cellánál van valamilyen külső szennyeződés/behatás, ami miatt azon a mérőcsatormán többet fogyaszt az áramkör.

Mivel a 028-as akkumulátor belsőellenállásának mérése során a #6-os cella ellenállása megegyezett a többi celláéval, illetve feszültsége együtt mozgott a többi cella feszültségével, így azt az esetet kizárjuk, hogy alacsonyabb lenne a cella kapacitása a többi cellához képest.

A 027-es akkumulátoron látszódik, hogy a BMS csavaros fedeléről néhány helyről hiányoznak a csavarok tömítőkupakjai. Ebből arra következtetünk, hogy az akkumulátor már meg lett bontva. A BMS elektronika nem tudja több ciklus alatt sem kibalanszolni az akkumulátort, a legalacsonyabb feszültségű/töltöttségű cellát is aktívan meríti a balanszáramkörrel, azaz hibásan működik. Ennek okát megbontás nélkül biztosan nem tudjuk megállapítani.

## ÉLETTARTAM

A 006-os és 028-as akkumulátorok belső ellenállása 30 mΩ körüli (17-23%-os növekedés), míg a 027-es akkumulátor 36 mΩ-os ellenállással rendelkezik (44%-os növekedés). Ez azt mutatja, hogy a 027-es akkumulátor sokkal inkább az élettartama végén jár. Mivel nincs információnk az akkumulátorban lévő cellák mivoltáról (típus, gyártói mérések/adatok), így nem tudjuk egyértelműen megmondani, hogy hol tartózkodnak az élettartamukhoz képest. De az adatok alapján mivel a kapacitása a 027-es és 028-as moduloknak nagyon hasonló, így feltételezhetően hasonló ciklusszám van bennük, arra következtetünk, hogy a 027-es modul magasabb átlaghőmérsékleten üzemelt, mint a 028-as, és emiatt magasabb a belső ellenállása.

	<b>Gyári</b>	<b>006</b>	<b>027</b>	<b>028</b>
Kiegyenlített kapacitás [Ah]	45.0	34.5	31.0	32.6
Eltérés	100%	77%	69%	72%
Kiegyenlített kapacitás [Ah]	45.0	38.8	39.3	39.3
Eltérés	100%	86%	87%	87%
Belső ellenállás [mΩ]	25.0	30.8	36.0	29.2
Eltérés	100%	123%	144%	117%

Egy bizonyos állapot (State-of-Health) alatt a lítium-ion akkumulátorok „összeesnek”, azaz annyira megnő a belső ellenállásuk a kapacitásukhoz képest, hogy alkalmatlanok nagyobb teljesítmény leadására, és terhelés alatt szinte azonnal letilt a BMS. Ez a SoH szint akkumulátortípustól függően 50-80% körül is lehet, de 60%-nál egyik gyártó sem ad meg alacsonyabb értéket. Jelenleg a 006-os akkumulátor átlagosan 0.09%-ot vesz a kapacitásából minden egyes ciklussal, így 77%-os SoH-ról 60%-ra nagyjából 150-190 ciklus alatt jut el. A 027-es akkumulátor átlagosan 0.16%-ot veszít a kapacitásából minden egyes ciklussal, így 69%-ról 50-60 ciklus alatt jut el a 60%-os szintig.

## HASZNÁLHATÓSÁG

A mérések során mind a három akkumulátor képes volt tartósan az 1C-s (45A-es) merítésre, és 0.5C-s (22.5A-es) töltésre, így jelenleg az akkumulátorok pár tucat ciklus erejéig még biztosan használhatóak.

Rendszeresen időt kell fordítani a töltés végén lezajló balanszolás teljes végbemenetelére, ellenkező esetben az akkumulátorok használható kapacitása jelentősen (10-15-20%-kal) kevesebb. A cellák közötti töltöttségkiegyenlítés (balanszolás) problémájának megértéséhez a 027-es és 028-as akkumulátorok esetében további vizsgálódás szükséges.

Ahogy korábban is írtuk, ebben az akkumulátortípusban a passzív kiegyenlítő (balancer) teljesítménye alul van méretezve, emiatt sokáig tart a balanszolás. Más akkumulátor esetén rendesen méretezett kiegyenlítővel jelentősen csökkenhet a balanszolásra fordítandó idő, így nem lenne szükség plusz figyelemre sem ezzel kapcsolatban.

## 9.5 Melléklet: A 2. Akkumulátor állapotfelmérési jelentés

# Valence U27-36XP

Egyedi azonosító: CBJ153000165 (1531-021)

Mérést végezte:  
XTALIN Mérnöki Tervező Kft.

## CELLAFESZÜLTSGEK ELLENŐRZÉSE

### Leírás

Az akkumulátorban található összes cella feszültségének ellenőrzése a gyári BMS segítségével. Célja, hogy megállapítsuk az akkumulátorról, érdemes-e a többi mérés elvégzése. A cellafeszültségeknek 2.5V és 3.8V között kell lennie.

### EREDMÉNY

Minden cella a biztonságos feszültségtartományon belül tartózkodik.

Cella #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Feszültség [V]	3.290	3.287	3.286	3.285	3.283	3.242	3.292	3.290	3.289	3.294	3.290	3.291

## TÖLTÉS

### LEÍRÁS

Számítógépes szoftver által vezérelt tápegységgel töltjük fel az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A töltést az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 0.5C-vel végezzük. A mérés közben mérjük a kiegyenlítés során kisütött energiát.

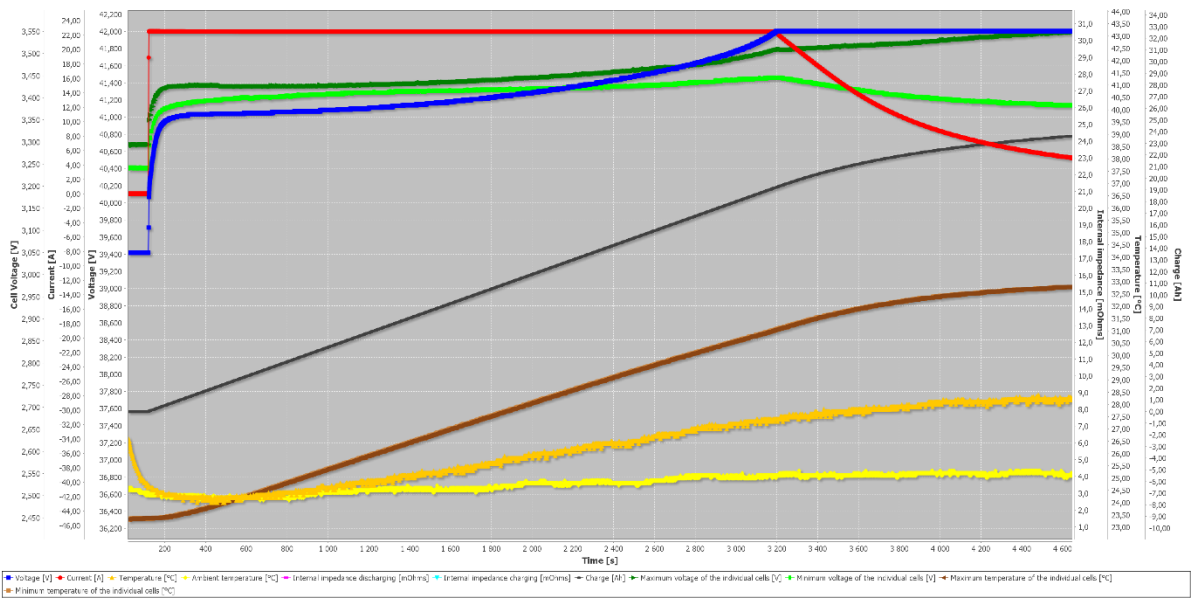
### EREDMÉNY

Log fájl: Valence-U27-36XP-28-2023.07.04.15.38.08.137.xcell\_log

A mérés időtartama körülbelül 1 óra 20 perc.

Az akkumulátort feltöltöttük, azaz legalább az egyik cella elérte a 3.6V-ot vagy a töltőáram 5A alá csökkent, tovább léphetünk a következő mérésre.

Cella #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Feszültség [V]	3.519	3.529	3.517	3.479	3.452	3.382	3.533	3.488	3.486	3.520	3.550	3.544



A cellafeszültségekből megállapítható, hogy a nincs komoly töltöttségkülönbség a cellák között.

# KAPACITÁS ÉS BELSŐ ELLENÁLLÁS MÉRÉSE

## LEÍRÁS

Számítógépes szoftver által vezérelt terhelés és tápegység található a mérési elrendezésben. A terheléssel mérjük az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedura közben mérjük a mérítés során kivett energiát, ebből határozzuk meg a kapacitást, továbbá előre meghatározott szinteknél mérítési és töltési DC belső ellenállást mérünk. Az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 1C-vel mérítjük és 0.5C-vel töltjük. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2.8V alá csökken.

## EREDMÉNY

Log fájl: Valence-U27-36XP-28-2023.07.04.15.38.08.137.xcell\_log

A mérés időtartama körülbelül 1 óra 20 perc + utána körülbelül 1 óra 30 perc töltés.

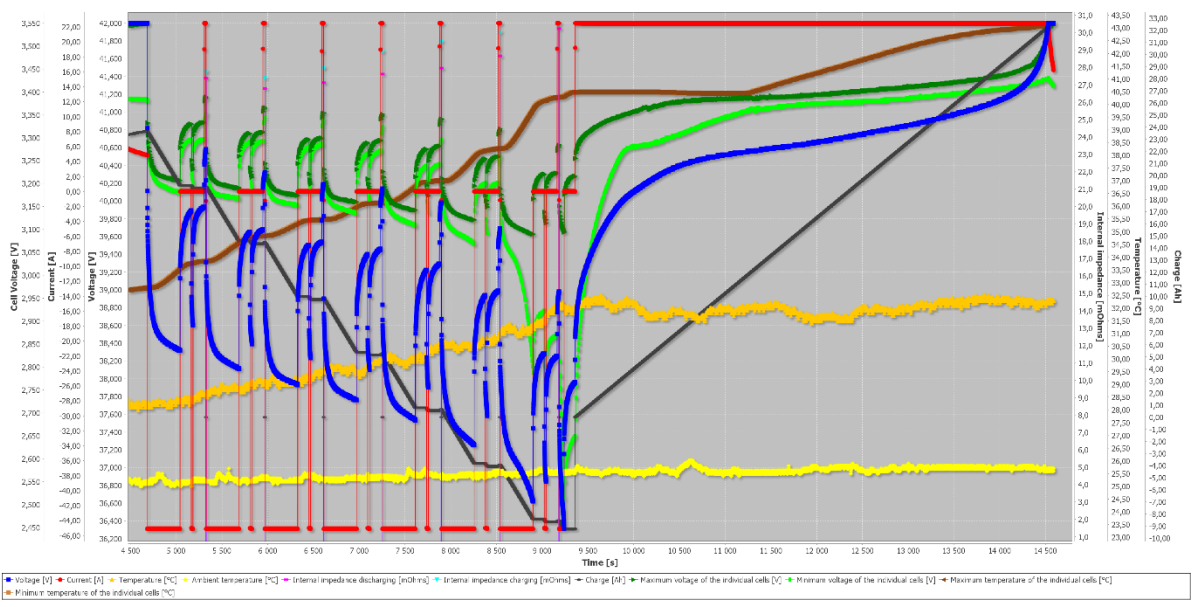
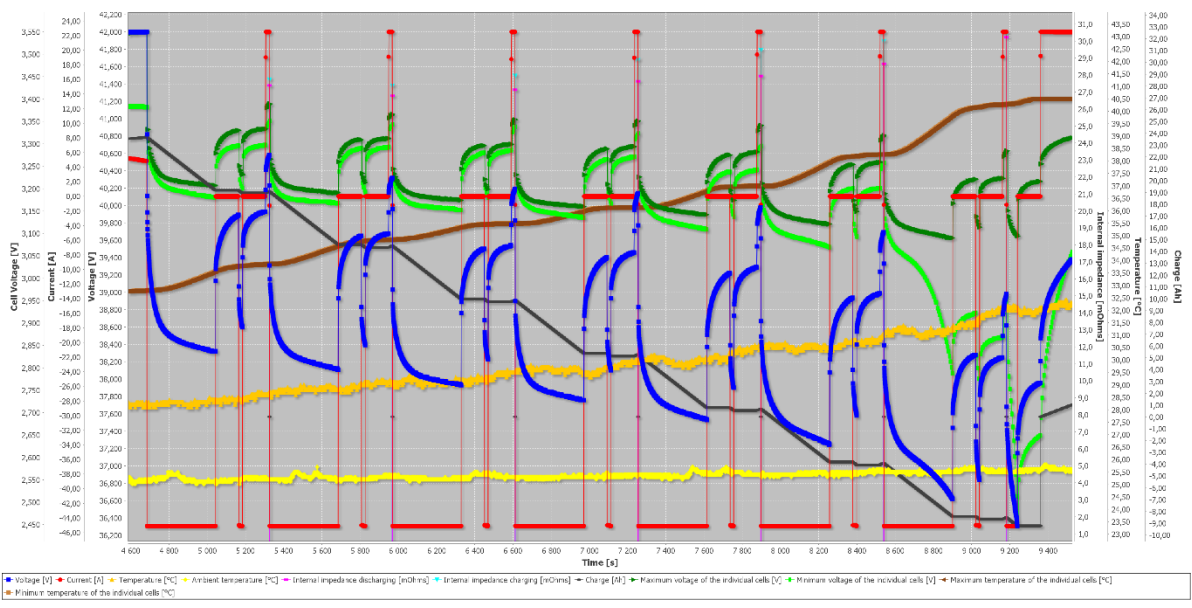
Teljes feltöltés után az akkumulátorból 32.59 Ah-t tudunk kisütni, ez az akkumulátor eredetileg vélt kapacitásának (45Ah) 72.4%-a. A mérítési belső ellenállás töltöttségi szinttől függően 26.8–30.2 mΩ között alakult, míg a töltési belső ellenállás 27.4 – 30.5 mΩ között volt.

		Belső ellenállás													
		Kisütött [Ah]	Teljes [mΩ]	C#1	C#2	C#3	C#4	C#5	C#6	C#7	C#8	C#9	C#10	C#11	C#12
Mérítési belső ellenállás [mΩ]	1	4.5	27.4	2.381	2.082	2.082	2.359	2.359	1.989	2.049	2.326	1.996	2.291	2.275	1.993
	2	9.0	26.8	2.286	2.000	2.002	2.264	2.271	1.993	1.993	2.235	1.916	2.224	2.206	1.916
	3	13.5	27.1	2.325	2.047	2.025	2.318	2.309	2.003	2.020	2.289	1.956	2.274	2.220	1.983
	4	18.0	27.6	2.365	2.072	2.088	2.323	2.332	2.039	2.044	2.299	1.977	2.288	2.272	1.995
	5	22.5	28.0	2.389	2.114	2.121	2.387	2.347	2.072	2.065	2.354	2.025	2.323	2.320	2.014
	6	27.0	28.7	2.446	2.159	2.139	2.419	2.401	2.208	2.112	2.386	2.068	2.381	2.395	2.117
	7	31.5	30.2	2.483	2.177	2.168	2.443	2.439	3.059	2.130	2.430	2.110	2.406	2.421	2.121
	8	36.0													
Töltési belső ellenállás [mΩ]	1	4.5	27.7	2.311	2.120	2.120	2.404	2.355	2.164	2.066	2.409	2.022	2.355	2.337	1.955
	2	9.0	27.4	2.377	2.048	2.070	2.306	2.332	2.097	2.030	2.292	2.053	2.319	2.168	2.159
	3	13.5	27.9	2.399	2.133	2.159	2.381	2.404	2.164	2.093	2.377	2.066	2.377	2.337	2.066
	4	18.0	28.9	2.519	2.164	2.208	2.457	2.475	2.164	2.204	2.448	2.137	2.421	2.381	2.075
	5	22.5	29.5	2.608	2.253	2.213	2.541	2.475	2.226	2.270	2.475	2.142	2.493	2.453	2.186
	6	27.0	30.0	2.577	2.288	2.221	2.554	2.488	2.310	2.199	2.510	2.177	2.488	2.488	2.177
	7	31.5	30.5	2.537	2.248	2.221	2.488	2.488	3.314	2.181	2.430	2.181	2.510	2.483	2.226
	8	36.0													

A 8. belső ellenállásokat nem tudtuk megmérni, mivel hamarabb lemerült az akkumulátor.

A Valence U27-36 XP akkumulátorok gyártói adatlapja alapján a belső ellenállásuk 25 mΩ. Sajnos nincs megadva, hogy ez milyen töltöttség és hőmérséklet esetén érvényes, illetve azt sem fejtik ki, hogy ez csak mérítésre, vagy töltésre is egyaránt vonatkozik.

A mérítési átlag belső ellenállás 28.0 mΩ, ami 12%-kal nagyobb a gyári 25 mΩ-nál. A töltési átlag ellenállás 28.8 mΩ, ami 15.2%-kal nagyobb a gyári értéknél.





# KIEGYENLÍTÉS

## LEÍRÁS

Számítógépes szoftver által vezérelt tápegységgel töltjük fel az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A kiegyenlítés célja, hogy azonos feszültségszintre hozza az összes cellát, melyet az akkumulátorban található BMS végez el adott körülmények között. A mérés közben mérjük a kiegyenlítés során kisütött energiát. A gyári BMS 3.36V-os cellafeszültség felett és legalább 0.04V-os feszültségkülönbség esetén aktiválja a kiegyenlítést, azaz nem egyenlít ki 0.04V-nál kisebb eltéréseket.

## EREDMÉNY

A mérés időtartama körülbelül 76 óra.

Az akkumulátort feltöltöttük, minden cella feszültsége elérte a legalább 3.55 V-ot, a cellák töltöttségkülönbségét kiegyenlítettük, tovább léphetünk a következő mérésre.

Cella #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kiegyenlítés során kisütött energia [Wh]	28.05	28.16	28.24	27.59	26.52	0.0	28.91	28.22	28.34	28.55	29.02	29.20
Kiegyenlítés utáni feszültség [mV]	3543	3548	3549	3547	3545	3520	3567	3555	3557	3559	3562	3566

# KAPACITÁS ÉS BELSŐ ELLENÁLLÁS MÉRÉSE – KIEGYENLÍTÉS UTÁN

## LEÍRÁS

Számítógépes szoftver által vezérelt terhelés és tápegység található a mérési elrendezésben. A terheléssel mérjük az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedura közben mérjük a mérítés során kivett energiát, ebből határozzuk meg a kapacitást, továbbá előre meghatározott szinteknél mérítési és töltési DC belső ellenállást mérünk. Az akkumulátor névleges 45Ah kapacitásának megfelelően 1C-vel mérítjük és 0.5C-vel töltjük. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2.8V alá csökken.

## EREDMÉNY

Log fájl: Valence-U27-36XP-28-2023.07.10.08.51.53.820.xcell\_log

A mérés időtartama körülbelül 1 óra 25 perc + utána körülbelül 2 óra töltés.

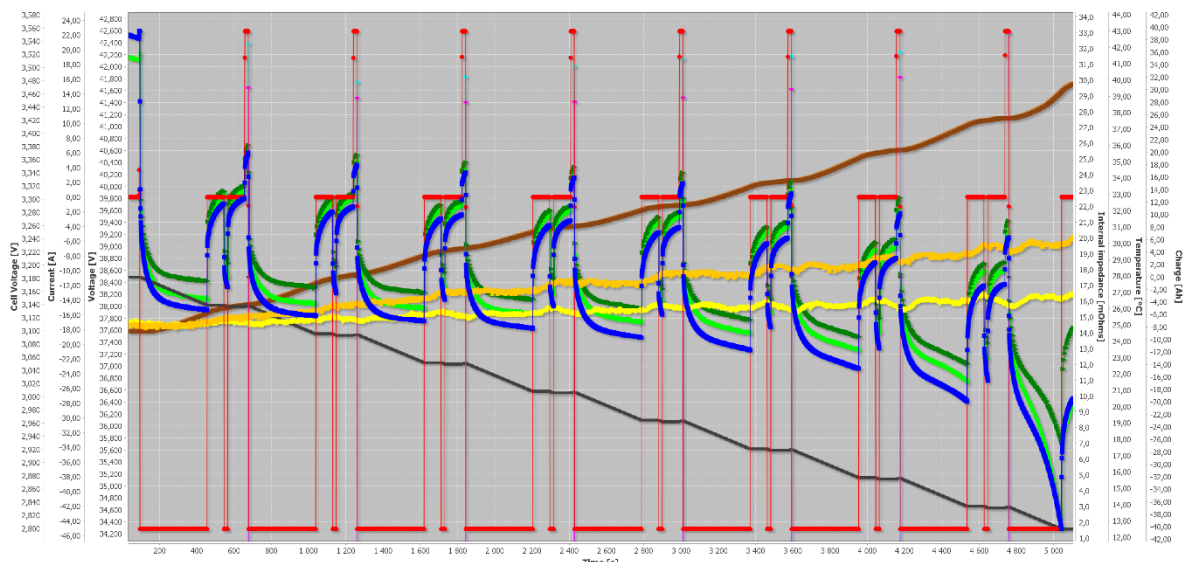
Teljes feltöltés után az akkumulátorból 39.35 Ah-t tudunk kisütni, ez az akkumulátor eredetileg vélt kapacitásának (45Ah) 87.4%-a. A mérítési belső ellenállás töltöttségi szinttől függően 28.6 – 33.0 mΩ között alakult, míg a töltési belső ellenállás 29.8 – 32.9 mΩ között volt.

		Belső ellenállás													
		Kisütött [Ah]	Teljes [mΩ]	C#1	C#2	C#3	C#4	C#5	C#6	C#7	C#8	C#9	C#10	C#11	C#12
Mérítési belső ellenállás [mΩ]	1	4.5	29.5	2.521	2.235	2.248	2.554	2.548	2.222	2.257	2.521	2.189	2.426	2.421	2.113
	2	9.0	28.9	2.466	2.173	2.206	2.466	2.501	2.149	2.186	2.457	2.126	2.406	2.364	2.069
	3	13.5	28.6	2.439	2.169	2.195	2.477	2.486	2.160	2.160	2.457	2.118	2.381	2.359	2.075
	4	18.0	28.6	2.466	2.166	2.180	2.459	2.488	2.126	2.169	2.457	2.135	2.390	2.379	2.080
	5	22.5	28.9	2.483	2.206	2.217	2.495	2.506	2.173	2.195	2.495	2.162	2.439	2.417	2.162
	6	27.0	29.4	2.483	2.206	2.217	2.495	2.506	2.173	2.195	2.495	2.162	2.439	2.417	2.162
	7	31.5	30.2	2.561	2.284	2.284	2.561	2.539	2.273	2.273	2.572	2.217	2.539	2.528	2.262
	8	36.0	33.0	2.754	2.486	2.499	2.741	2.758	2.472	2.463	2.763	2.401	2.707	2.712	2.421
Töltési belső ellenállás [mΩ]	1	4.5	32.3	2.799	2.435	2.546	2.768	2.794	2.430	2.444	2.746	2.430	2.679	2.608	2.359
	2	9.0	29.8	2.443	2.319	2.359	2.590	2.550	2.288	2.368	2.461	2.288	2.563	2.270	2.270
	3	13.5	30.2	2.559	2.275	2.319	2.577	2.599	2.235	2.319	2.572	2.239	2.541	2.497	2.177
	4	18.0	30.8	2.657	2.350	2.315	2.630	2.657	2.337	2.346	2.652	2.310	2.581	2.581	2.230
	5	22.5	31.3	2.679	2.350	2.386	2.652	2.674	2.346	2.417	2.652	2.297	2.586	2.590	2.297
	6	27.0	31.5	2.683	2.386	2.403	2.688	2.674	2.359	2.412	2.674	2.346	2.634	2.608	2.319
	7	31.5	31.7	2.723	2.430	2.430	2.710	2.701	2.439	2.403	2.688	2.381	2.697	2.652	2.408
	8	36.0	32.9	2.781	2.537	2.581	2.821	2.843	2.501	2.519	2.794	2.448	2.745	2.706	2.439

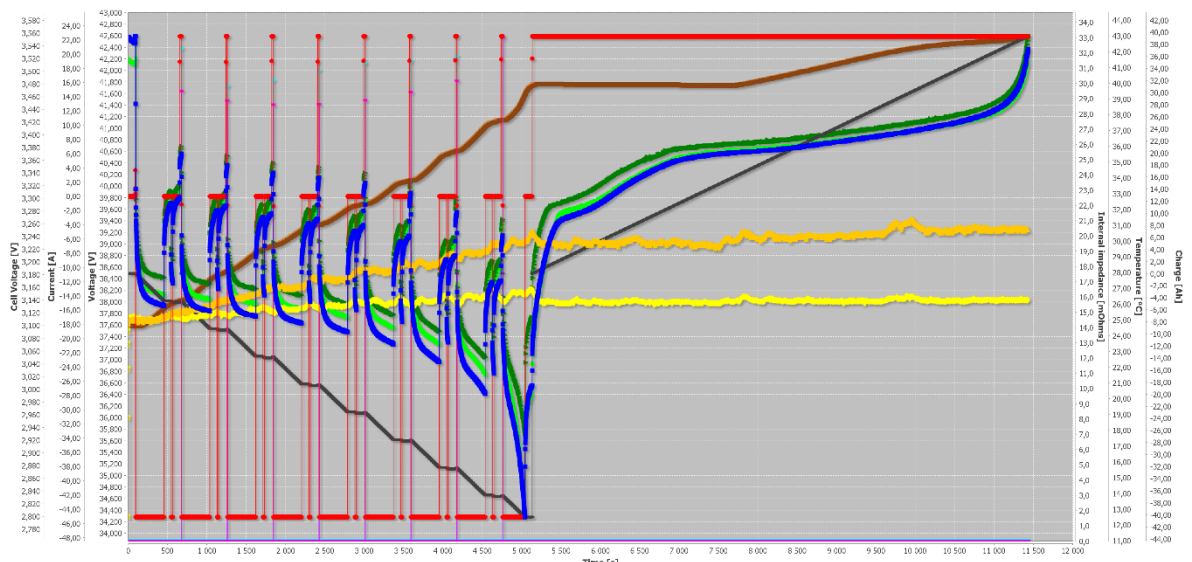
A 8. belső ellenállásokat nem vettem figyelembe, mivel azok már szinte teljesen lemerült állapotban kerültek mérésre.

A Valence U27-36 XP akkumulátorok gyártói adatlapja alapján a belső ellenállásuk 25 mΩ. Sajnos nincs megadva, hogy ez milyen töltöttség és hőmérséklet esetén érvényes, illetve azt sem fejtik ki, hogy ez csak mérítésre, vagy töltésre is egyaránt vonatkozik.

A mérítési átlag belső ellenállás 29.2mΩ, ami 16.8%-kal nagyobb a gyári 25 mΩ-nál. A töltési átlag ellenállás 31.1 mΩ, ami 24.4%-kal nagyobb a gyári értéknél.



• Voltage [V] • Current [A] • Temperature [°C] • Ambient temperature [°C] • Internal impedance discharging [mΩ/s] • Internal impedance charging [mΩ/s] • Charge [Ah] • Maximum voltage of the individual cells [V] • Minimum voltage of the individual cells [V] • Maximum temperature of the individual cells [°C] • Minimum temperature of the individual cells [°C]



• Voltage [V] • Current [A] • Temperature [°C] • Ambient temperature [°C] • Internal impedance discharging [mΩ/s] • Internal impedance charging [mΩ/s] • Charge [Ah] • Maximum voltage of the individual cells [V] • Minimum voltage of the individual cells [V] • Maximum temperature of the individual cells [°C] • Minimum temperature of the individual cells [°C]

## 9.6 Melléklet: Elektromos járművek optimális akkumulátorméretének meghatározása és esettanulmánya

Az optimális akkumulátorméret az adott hőmérséklet és napi forduló hosszának figyelembevételével határozható meg. Ebben a hőmérsékleti és távolsági függésben a korábbi tanulmányok összefüggéseit vettük alapul. [97], [98]

Az elektromos és dízeljárművek kilométerenkénti költségét élettartamra vetített költségek alapján határozzuk meg. A fent említett költségelemek közül eltérés a két fajta hajtás között jelentős eltérés a járműbeszerzési és hajtási energiaköltségben jelentkezik. Ezeket a költségelemeket a teljes élettartam figyelembevételével kilométerre vetítve határoztuk meg.

$$c_{km} = \frac{VPC+EC}{LT \cdot AOD \cdot DTD} \quad (9.6-1)$$

ahol DTD a napi fordulóterv-távolság hossza km-ben.

A fenti módszertan használatával számíthatjuk ki mind a dízel üzemű, mind az elektromos üzemű autóbuszok esetén a járművek pontos fogyasztását. A járműveket naponta egyszer tankoljuk, illetve töltjük fel. A fordulóterv-távolság és a külső hőmérséklet a térség adatainak megfelelően napi szinten változik. A fogyasztásra a korábban leírtak szerint, hatással a (1) környezeti hőmérséklet, (2) a megtett fordulóterv-távolság van a legnagyobb hatással. Ezek mellett kisebb hatással lehet az utasforgalom, a domborzat és az időjárás.

Jelen esettanulmányban a két legfontosabb paramétert tekintve

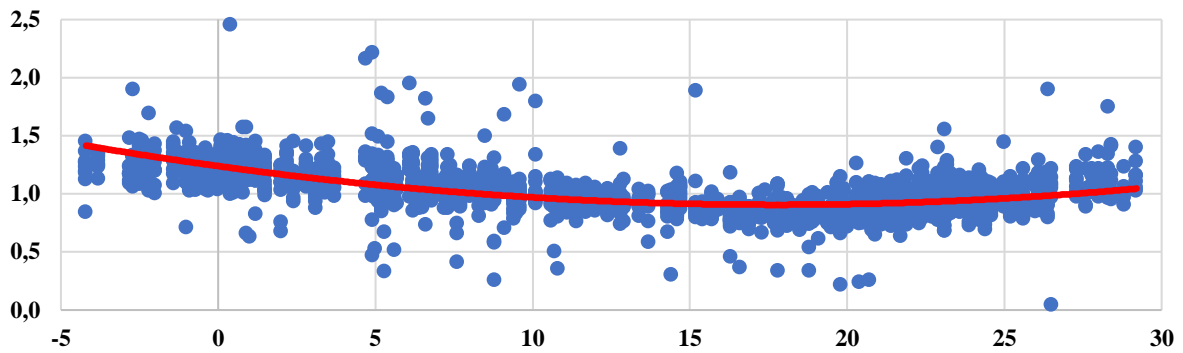
- az optimális akkumulátorméret és a
- 10 évre vonatkozó megtérülési mutatót

számítjuk ki és határozzuk meg, hogy melyik tartományban használható leginkább az elektromos autóbusz.

Jelenleg a Volánbusz Zrt.-nél az alábbi fordulóterv-szerkezet alakult ki 2024. januári állapot szerint 300 km alatt fordák száma 3098 darab, míg a 300 km feletti fordák száma 1730 darab. Látható, hogy a napi fordulók több, mint 60%-a 300 km/nap teljesítményű, amely mind a szakirodalmi kutatások, mind a vállalat saját mérései alapján - a jelenlegi lítium-ion akkumulátorokkal egy feltöltéssel teljesíthető. Szolnok környéki fordákat tekintve 1897 napi autóbuszfordulót vizsgáltuk meg 2023 júniusa és 2024 februárja között. A következőkben az adatokat átlag (szórás) alapon közöljük.

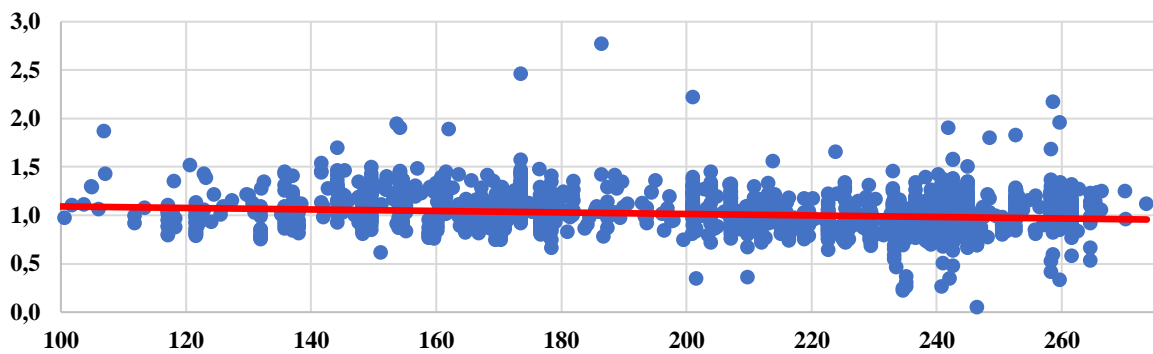
A fordulótervek átlagosan 202,7 (41,7) km hosszúak; 8:48 (1:48) órán keresztül tartottak, 392 (80) megállót tartalmaznak. A fordák 28 (6) járatot tartalmaznak, melyek energiaigénye 204 (55) kWh volt. Az átlagos fogyasztás 1,01 (0,2) kWh/km volt, 13,6 (9,1) °C külső hőmérséklet alapján. A június és február közötti időszakban nyári, őszi, téli időszakok voltak -4,2 és 29,2°C hőmérséklet tartományban.

Az adatok elemzésével és a korábbi módszertan összevetésével a Szolnoki régióban a hőmérséklet függvényében a kilométerenkénti fogyasztás értékei a **23. ábrán** az alábbi trendet mutatják.



36. ábra *Kilométerenkénti fogyasztás a környezeti hőmérséklet függvényében [°C]*

A megtett távolság és a kilométerenkénti fogyasztás között kialakult trendet a **24.ábra** mutatja. Előzetes elgondolás alapján lehet mondani, hogy a kilométer nincs hatással a fogyasztásra, mégis a nagyobb fordák hosszabbak megállóközöket tartalmaznak, amely által hosszabb fordák esetében csökken kilométerenkénti fogyasztás enyhén csökken.



37. ábra *Kilométerenkénti fogyasztás az autóbushordulótávolságának függvényében [km]*

A fentiek alapján az látható, hogy közép-európai (magyarországi) esetben az optimális hasznos akkumulátorméret.

**7 táblázat: Optimális hasznos járműakkumulátorméret [kWh]-ban a külső hőmérséklet és az autóbuszfordulóterv távolságának függvényében**

km/°C	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
70	150	140	130	130	120	110	110	100	100	90	90	90	90	90	90	90	90	90	100	110	110	120	130	130	140
80	170	160	150	140	130	130	120	110	110	110	100	100	100	100	100	100	110	110	110	120	130	130	140	150	160
90	190	180	170	160	150	140	130	130	120	120	120	110	110	110	110	120	120	120	130	130	140	150	160	170	180
100	210	200	190	170	160	150	150	140	130	130	130	120	120	120	120	130	130	130	140	150	150	160	170	190	200
110	230	220	200	190	180	170	160	150	150	140	140	140	130	130	140	140	140	140	150	160	170	180	190	200	210
120	250	230	220	200	190	180	170	160	160	150	150	150	140	140	150	150	150	150	160	170	180	190	200	220	230
130	270	250	230	220	210	200	190	180	170	160	160	160	150	150	160	160	160	160	180	180	190	210	220	230	250
140	280	270	250	230	220	210	200	190	180	170	170	170	170	170	170	170	170	170	190	200	210	220	230	250	270
150	300	280	260	250	230	220	210	200	190	180	180	180	180	180	180	180	180	180	200	210	220	230	250	260	280
160	320	300	280	260	250	230	220	210	200	200	190	190	180	180	190	190	200	200	210	220	230	250	260	280	300
170	340	310	290	280	260	250	230	220	210	210	200	200	190	190	200	200	210	210	220	230	240	260	280	290	310
180	350	330	310	290	270	260	240	230	220	220	210	210	200	200	210	210	220	220	230	240	260	270	290	310	330
190	370	340	320	300	290	270	260	240	230	230	220	220	210	210	220	220	220	220	240	250	270	280	300	320	340
200	380	360	340	320	300	280	270	250	240	230	230	220	220	220	220	230	230	230	250	270	280	300	320	340	360
210	400	370	350	330	310	290	280	260	250	240	240	230	230	230	230	240	240	240	260	280	290	310	330	350	370
220	420	390	360	340	320	300	290	270	260	250	240	240	240	240	240	250	250	250	270	290	300	320	340	360	390

Téli időjárás esetén (0 °C):

**8. táblázat: Téli időjárás esetén (0 °C) használható optimális akkumulátorméret**

4.

Hatótáv	100 km	150 km	200 km	250 km	300 km	350 km
Akkumulátorkapacitás	160 kWh	230 kWh	300 kWh	350 kWh	400 kWh	450 kWh

Tavaszi/őszi időjárás esetén (5-6 °C):

**9. táblázat: Tavaszi/őszi időjárás esetén (6 °C) használható optimális akkumulátorméret**

6.

Hatótáv	100 km	150 km	200 km	250 km	300 km	350 km
Akkumulátorkapacitás	140 kWh	200 kWh	250 kWh	300 kWh	340 kWh	380 kWh

Nyári időjárás esetén (18 °C):

**10. táblázat: Nyári időjárás esetén (18 °C) használandó optimális akkumulátorméret**

I.

Hatótáv	100 km	150 km	200 km	250 km	300 km	350 km
Akkumulátorkapacitás	120 kWh	180 kWh	220 kWh	260 kWh	300 kWh	330 kWh

Mindezek ismeretében kisebb akkumulátor használat esetén az autóbuszfordulók összevonhatók. Ez azt jelentheti akár, hogy a kedvezőbb fogyasztású időszakok esetén (tavasz/ősz) érdemes összevonni a fordulókat, és az adott fordulót az optimális akkumulátorméret fogyasztására beállítani.

Ezek alapján téli, tavaszi/őszi, nyári flottaméreték is kialakíthatók. A flotta mérete függ az időszakban értelmezett kilométerenkénti átlagfogyasztástól, mely elsősorban a kültéri hőmérséklettől függ. Ez az elmúlt évek (2020-2023) középhőmérsékleti átlagértékei alapján egy adott akkumulátorkapacitású jármű különböző kilométert képes megtenni. Ebből az autóbusz fordulótervek áttekinthetőek szélsőséges (nyár/tél) esetén rövidebbre, enyhe időszak esetén hosszabb fordulótervekre.

A csökkentett flotta esetén az átmeneti (tavaszi/őszi) időszakban érdemes a kieső/nem futó járműveket nagyobb felülvizsgálatnak, átalakításnak alávetni. Ilyen módon ezekben az időszakokban a szervizelés könnyebben elvégezhető.

Továbbiakban érdemes megfontolni, hogy középhőmérséklet függő autóbusz-fordulóterveket lehet készíteni hosszú távra, melyben az akkumulátor mérete optimálishoz közelebb módon használható ki. Az optimális akkumulátorméret mellett az optimális akkumulátor kihasználtsággal (75-80%) és a degradációval szükséges számolni. Korábbi tanulmányok alapján, napi egyszeri töltéssel számolva 3000 ciklus utáni degradáció 83-84%-nak adódik a 75-80%-os kihasználtságú használatnál.

Az üzemeltetési időt 10, és 20 évre (akkumulátorcserével) választva hasonlítsuk össze az üzemeltetést. (2-3. táblázat) A gázolaj ára az összehasonlításban 650 Ft/liter, míg az elektromos áram ára 120 Ft/kWh-nak véve az alábbi időszakokban lehetnek. A teljes élettartam futással és költségekkel számolva utaskilométerre számítsuk ki a költségeket, tudván, hogy nagy akkumulátorkapacitás esetén az utaskapacitás csökken. A következőkben, ahol nincsenek értékek az azért lehetséges, mert azokon a kapacitású járműveken az utasteret gyakorlatilag (5 fő) teljesen kitölti az akkumulátor helye. Kilométerre vetítve a jármű beszerzési és üzemeltetési költségét számítottuk ki, majd ezt követően a dízel kilométerköltségéből kivontuk az elektromos jármű kilométerköltségét. Ahol pozitív eredményt kaptunk zölddel, ahol pedig -0,5 Ft/utaskm feletti értéket kaptunk világoszölddel jelöltük. (-0,5 Ft/utaskm körülbelül 25-26 millió forinttal drágább üzemeltetést jelent. A többi szerviz- és személyzeti költséggel nem számoltunk, mert a szervizköltség mindegyik típus esetén hasonlóan tekinthető, míg a személyzeti költség azonos.

**11. táblázat: Optimális hasznos járműakkumulátorméret [kWh]-ban a külső hőmérséklet és az autóbuszfordulóterv távolságának függvényében, 10 év időtartamra**

km <sup>2</sup> C	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
70	0,98	0,15	1,35	1,35	1,13	0,91	0,91	0,89	0,89	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,89	0,91	0,91	1,13	1,35	1,35	0,15
80	1,90	1,03	0,21	0,42	0,92	0,92	0,73	0,54	0,54	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,54	0,54	0,54	0,73	0,92	0,92	0,42	0,21	1,03
90	3,83	2,39	1,47	0,88	0,68	0,63	0,59	0,59	0,42	0,42	0,42	0,25	0,25	0,25	0,25	0,42	0,42	0,42	0,59	0,59	0,63	0,68	0,88	1,47	2,39
100	8,13	4,35	3,09	1,12	0,40	0,27	0,27	0,30	0,33	0,33	0,33	0,18	0,18	0,18	0,18	0,33	0,33	0,33	0,30	0,27	0,27	0,40	1,12	3,09	4,35
110	10,3	7,37	5,81	2,88	1,61	0,63	0,17	0,45	0,45	0,93	0,93	0,93	0,11	0,11	0,93	0,93	0,93	0,93	0,45	0,17	0,63	1,61	2,88	5,81	7,37
120	12,1	9,41	8,88	5,37	2,29	1,32	0,80	0,02	0,02	0,80	0,80	0,80	1,05	1,05	0,80	0,80	0,80	0,80	0,02	0,80	1,32	2,29	5,37	8,88	9,41
130	46,9	17,8	8,85	8,09	4,42	2,99	1,98	1,07	0,39	0,18	0,18	0,18	0,72	0,72	0,18	0,18	0,18	0,18	1,07	1,07	1,98	4,42	8,09	8,85	17,8
140	N/A	44,0	16,6	8,00	5,59	4,02	2,67	1,72	0,88	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	1,72	2,67	4,02	5,59	8,00	16,6	44,0
150	N/A	N/A	23,8	15,8	7,43	5,15	3,67	2,39	1,49	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	2,39	3,67	5,15	7,43	15,8	23,8	N/A
160	N/A	N/A	N/A	22,5	14,7	8,94	4,77	3,38	2,14	2,14	1,29	1,29	0,51	0,51	1,29	1,29	2,14	2,14	3,38	4,77	8,94	14,7	22,5	N/A	N/A
170	N/A	N/A	N/A	N/A	21,3	13,9	8,50	4,43	3,09	3,09	1,93	1,93	1,11	1,11	1,93	1,93	3,09	3,09	4,43	8,50	14,7	21,3	N/A	N/A	N/A
180	N/A	N/A	N/A	N/A	35,7	20,3	8,84	8,11	4,13	4,13	2,84	2,84	1,73	1,73	2,84	2,84	4,13	4,13	8,11	8,84	20,3	35,7	N/A	N/A	N/A
190	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	34,2	19,4	8,19	5,77	5,77	3,88	3,88	2,63	2,63	3,88	3,88	3,88	3,88	8,19	12,5	34,2	N/A	N/A	N/A	N/A
200	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	32,8	12,0	7,79	5,45	5,45	3,62	3,62	3,62	3,62	5,45	5,45	5,45	12,0	32,8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
210	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	17,8	11,5	7,42	7,42	5,17	5,17	5,17	5,17	7,42	7,42	7,42	17,8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
220	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	30,4	17,1	11,0	11,0	7,09	7,09	7,09	7,09	11,0	11,0	11,0	30,4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	29,4	16,5	16,5	10,6	10,6	10,6	10,6	16,5	16,5	16,5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
240	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	26,4	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	26,4	26,4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
250	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	27,8	27,8	15,4	15,4	27,8	27,8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
260	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	26,7	26,7	26,7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

**12. táblázat: Optimális hasznos járműakkumulátorméret [kWh]-ban a külső hőmérséklet és az autóbusszfordulóterv távolságának függvényében, 20 év időtartamra**

km <sup>2</sup> C	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
70	-0,03	0,48	-0,51	-0,51	-0,33	-0,16	-0,16	0,02	0,02	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,02	-0,16	-0,16	-0,33	-0,51	-0,51	0,48	
80	-0,95	-0,33	0,25	0,70	-0,19	-0,19	-0,04	0,12	0,12	0,12	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,12	0,12	0,12	-0,04	-0,19	-0,19	0,70	0,25	-0,33
90	-2,16	-1,27	-0,62	-0,06	0,47	0,88	0,06	0,06	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	0,33	0,33	0,20	0,20	0,20	0,06	0,06	0,88	0,47	-0,06	-0,62	-1,27	
100	-3,95	-2,67	-1,77	-0,35	0,16	0,64	0,64	1,02	0,26	0,26	0,26	0,38	0,38	0,38	0,26	0,26	0,26	0,26	1,02	0,64	0,64	0,16	-0,35	-1,77	-2,67	
110	-6,98	-4,86	-2,29	-1,46	-0,70	-0,14	0,34	0,79	0,79	1,14	1,14	1,14	0,42	0,42	1,14	1,14	1,14	1,14	0,79	0,34	-0,14	-0,70	-1,46	-2,29	-3,48	
120	-13,4	-6,36	-4,38	-1,97	-1,19	-0,48	0,04	0,49	0,49	0,91	0,91	0,91	1,23	1,23	0,91	0,91	0,91	0,91	0,49	0,04	-0,48	-1,19	-1,97	-4,38	-6,36	
130	-33,8	-12,5	-5,83	-3,97	-2,75	-1,70	-0,97	-0,30	0,19	0,61	0,61	0,61	1,01	1,01	0,61	0,61	0,61	0,61	-0,30	-0,30	-0,97	-2,75	-3,97	-5,83	-12,5	
140	N/A	-31,8	-11,7	-5,38	-3,61	-2,46	-1,47	-0,78	-0,14	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	-0,78	-1,47	-2,46	-3,61	-5,38	-11,7	-31,8	
150	N/A	N/A	-17,0	-11,0	-4,99	-3,31	-2,21	-1,27	-0,61	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-1,27	-2,21	-3,31	-4,99	-11,0	-17,0	
160	N/A	N/A	N/A	-16,2	-10,4	-4,65	-3,04	-2,00	-1,10	-1,10	-0,46	-0,46	0,11	0,11	-0,46	-0,46	-1,10	-1,10	-2,00	-3,04	-4,65	-10,4	-16,2	N/A	N/A	
170	N/A	N/A	N/A	N/A	-15,4	-9,83	-4,35	-2,81	-1,80	-1,80	-0,94	-0,94	-0,34	-0,34	-0,94	-0,94	-1,80	-1,80	-2,81	-4,35	-6,32	-15,4	N/A	N/A	N/A	
180	N/A	N/A	N/A	N/A	-26,2	-14,7	-5,97	-4,08	-2,60	-2,60	-1,63	-1,63	-0,80	-0,80	-1,63	-1,63	-2,60	-2,60	-4,08	-5,97	-14,7	-26,2	N/A	N/A	N/A	
190	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-25,2	-14,0	-5,66	-3,84	-3,84	-2,41	-2,41	-1,48	-1,48	-2,41	-2,41	-2,41	-2,41	-5,66	-8,92	-25,2	N/A	N/A	N/A	N/A	
200	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-24,3	-8,53	-5,39	-3,62	-3,62	-2,24	-2,24	-2,24	-2,24	-3,62	-3,62	-3,62	-8,53	-24,3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
210	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-13,0	-8,19	-5,14	-5,14	-3,43	-3,43	-3,43	-3,43	-5,14	-5,14	-5,14	-13,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
220	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-22,7	-12,5	-7,87	-7,87	-4,91	-4,91	-4,91	-4,91	-7,87	-7,87	-7,87	-22,7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
230	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-22,0	-12,1	-12,1	-7,58	-7,58	-7,58	-7,58	-7,58	-12,1	-12,1	-12,1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
240	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-21,3	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-11,7	-21,3	-21,3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
250	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-20,7	-20,7	-11,4	-11,4	-20,7	-20,7	-20,7	-20,7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
260	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-20,2	-20,2	-20,2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

A bemutatott esettanulmány tekintetében megállapítható, hogy jelenlegi nem a leghatékonyabb vezetési stílust és üzemeltetést tekintve a 80-130 km hosszú fordák esetén kapunk 20 év üzemi időre kedvezőbb költségeket optimális akkumulátor méret használatával. Erre vonatkozólag az 11. és 12. táblázatban közöltük az hasznos energiára vonatkozó akkumulátorméreteket.



Mindezt hatékonyabb rendszerek és alacsonyabb értékű elektromos jármű, akkumulátor és elektromos energia esetén a járművek akár nagyobb területen is bevethetők.

Ennek értelmében a 70-140 km-es flottákat érdemes optimális esetben elektromos üzeművé tenni. Ez Szolnok esetében 75 futást jelent az elektromos autóbuszok esetében, ami a fordák 4%-t jelenti. Ez a 4% közlekedik valójában optimálisan, a többi esetben lehetséges, hogy dízel jármű költséghatékonyabb lehet.

Jobb értékek, a technológia fejlődésével nagyobb városi flotta, hosszú távon a távolsági utazási flotta is elektrifikálható lesz. Ezen az elektrifikáción túl ezzel a cikkel arra szeretnénk a figyelmet felhívni, hogy ne csak elektrifikáljunk, hanem optimális esetű elektromos autóbusz használat mellett végezzük csak el az elektrifikációt a lokálisan nem súlyosan légszennyezett területeken.

A fordulótervekhez tehát az akkumulátorméret választható, és a fordulótervek elkészítését követően az üzemeltetőknek javasolt a pontos méret kiválasztása.

## 10 Ábrák jegyzéke

sz.	Megnevezés	hivatkozás	
-----	------------	------------	--

1.	Töltési és kisülési profilok	Tseng, 2015	[33]
2.	Az akkumulátor degradációra alkalmazott S-N görbe	Homan, 2019	[43]
3.	Akkumulátorok újra hasznosításának körkörös modellje	Casals, 2019	[52]
4.	Fenntartható akkumulátor értéklánc	WEF, 2017	[54]
5.	Egy nyilvános hozzáférésű ciklus kiértékelés vizualizált bemutatása	batteryarchive.org	[56]
6.	Az akkumulátorok élekciklusa a kapacitás függvényében	Zhau, 2023	[58]
7.	Az ún. eFLIPS (Electric Fleet and Infrastructure Planning/Simulation) modell	Jefferies, 2020	[68]
8.	A valós fogyasztási igény és a csúcsidejű fogyasztás kiegyenlítése	Turner, 2015	[74]
9.	A három körforgásos logisztikai folyamat logikai ábrája	saját szerkesztés	[P/6]
10.	Az adatközpontokhoz kapcsolódó logisztikai entitások	saját szerkesztés	[P/6]
11.	Az elektromos autóbuszok core adatfolyamata	saját szerkesztés	[P/6]
12.	Adatvezérelt vállalatirányítási rendszer logikai ábrája	saját szerkesztés	[P/6]
13.	Autóbuszflottát üzemeltető vállalat innovatív működési modellje	saját szerkesztés	[P/6]
14.	Tesztelhető rendszer változatok leírása	saját szerkesztés	[P/7]
15.	Elektromos és dízel autóbuszok TCO összehasonlítása	saját szerkesztés forrás: Volánbusz Zrt.	
16.	Az NMC, LFP és LTO technológiák fejlődésének összehasonlítása az energiasűrűség tekintetében cella és akkumulátor csomag szinten.	BMZ-Poland, 2021.	[84]
17.	Az NMC és LTO akkumulátor összehasonlítás egy 12 méteres elektromos autóbusz esetében 10 éves időtartam alatt a hatótávolság tekintetében	BMZ-Poland, 2021.	[84]
18.	Lítium-ion akkumulátor csomagok árának összehasonlítása	BloombergNEF, 2023	[85]
19.	Lítium-ion akkumulátor csomag és cella árának összehasonlítása 2013-2023 közötti időszakban]	BloombergNEF, 2023	[85]
20.	Elektromos autóbuszok töltési stratégiái	Jefferies, 2020,	[68]
21.	Töltési logika alapján vezérelt folyamat sémája	Jefferies, 2020,	[68]
22.	A kisütés mélységének (DOD) hatása az akkumulátor degradációjára	Homan, 2018	[43]
23.	A degradáció mechanizmusa,	Han, 2019	[44]

24.	Optimális akkumulátorfelhasználás a kapacitás megőrzésével	Xu, 2016	[42]
25.	Valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 1. mérés	Forrás: Volánbusz Zrt., saját szerkesztés	
26.	Valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 2. mérés	Forrás: Volánbusz Zrt., saját szerkesztés	
27.	Akkumulátorok második életciklusának kialakítása a körforgásos gazdaságban	saját szerkesztés	
28.	A vállalati akkumulátor menedzsment folyamata	saját szerkesztés	
29.	Új beszerzésű dízel és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében		
30.	Új beszerzésű dízel és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a villamosenergia tarifa függvényében napi 250 km futással		
31.	Új beszerzésű dízel és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében napi 300 km futással		
32.	Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és dízel busszal azonos TCO elérésének ideje		
33.	Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és a hálózatról felvett energia aránya		
34.	Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és dízel busszal azonos TCO elérésének ideje		
35.	Elektromos busz és energia rendszer beruházási költsége és a hálózatról felvett energia aránya		
36.	Kilométerenkénti fogyasztás a környezeti hőmérséklet függvényében [°C]		
37.	Kilométerenkénti fogyasztás az autóbuszfordulóterv távolságának függvényében [km]		

## 11 Táblázatok jegyzéke

sz.	Megnevezés	hivatkozás	
1.	<u>Az innovatív modell szerinti rendszerben keletkező és felhasznált adatstruktúra</u>	saját szerkesztés	[P/6]
2.	<u>Optimális akkumulátorfelhasználás</u>	saját szerkesztés	
3.	<u>Adatkörök- a villamosenergia díj változás elemzése</u>		
4.	<u>Adatkörök - a futásteljesítmény változás elemzés</u>		
5.	<u>Adatkörök - energiarendszer elemzés</u>		
6.	<u>A rendszer főbb paraméterei</u>		
7.	<u>Optimális hasznos járműakkumulátorméret [kWh]-ban a külső hőmérséklet és az autóbushordulótávolságának függvényében</u>		
8.	<u>Téli időjárás esetén (0 °C) használandó optimális akkumulátorméret</u>		

9.	<u>Tavaszi/őszi időjárás esetén (6 °C) használandó optimális akkumulátorméret</u>		
10.	<u>Nyári időjárás esetén (18 °C) használandó optimális akkumulátorméret</u>		
11.	<u>Optimális hasznos járműakkumulátorméret [kWh]-ban a külső hőmérséklet és az autóbuszfordulóterv távolságának függvényében, 10 év időtartamra</u>		
12.	<u>Optimális hasznos járműakkumulátorméret [kWh]-ban a külső hőmérséklet és az autóbuszfordulóterv távolságának függvényében, 20 év időtartamra</u>		

## 12 Rövidítések jegyzéke

	<b>Battery</b>		<b>Akkumulátor</b>
BEVB	Battery Electric Vehicle Battery		Akkumulátoros elektromos jármű akkumulátora
BES	Battery energy storage		Akkumulátoros energia tárolás
BESS	Battery energy storage system		Akkumulátoros energia tároló rendszer
BMS	Battery Management (or Monitoring) System		Akkumulátor menedzsment és monitoring rendszer
DC	Depo Charging		Telephelyi töltés
DOD	Depth of Discharge		Akkumulátor kisütési mélysége
DST	Dynamic Stress Test		dinamikus stresszteszt

EVB	Electric Vehicle Battery		Elektromos jármű akkumulátora
ELIB	End of Life Industrial Battery		Akkumulátor élettartam vége
ESS	Energy Storage System		Energiatároló rendszer
IMC	In-motion-charging		Mozgás közbeni töltés
LIB	Lithium Ion Battery		Lítium-ion akkumulátor
LFP	Lithium iron phosphate		Lítium-vas foszfát akkumulátor
LTO	Lithium Titanium Oxid		Lítium Titánium Oxid
NIB	Natrium Ion Battery		Nátrium (vagy Sodium)-ion akkumulátor
NMC	Nickel Manganese Cobalt		Nikkel Magnézium Kobalt
OC	Opportunity Charging		Eseti töltés
OC-C	Opportunity Charging		Töltőállomási töltés
OC-I	Opportunity Charging		Megállóhelyek közötti töltés
OC-T	Opportunity Charging-(Terminal)		Megállóhelyi töltés
PSO	Particle Swarm Optimization		Részecske so optimalizálása
RUL	Remaining Useful Life		Fennmaradó hasznos élettartam
SEI	Solid Electrolyte Interphase		Szilárd elektrolit interfázis
SOC	State Of Charge		Töltési állapot
SOH	State Of Health		Az akkumulátor állapota
SOS	State of Safety		Az akkumulátor biztonsági állapota
SLB	Second-life battery		Második élettartamú akkumulátor
SLBESS	Second-life battery energy storage system		Második élettartamú akkumulátort tárolóként felhasználó rendszer
Vdis	fully discharged voltage		Teljes kisülési feszültség
	<b>Sustainability</b>		<b>Fenntarthatóság</b>
GHG	Greenhouse gases	ÜHG	Üvegházhatású gázok
SDGs	Sustainable development goals		Fenntarthatósági célok
	<b>Vehicles, electric vehicles</b>		<b>Járművek, elektromos járművek</b>
BEV	Battery Electric Vehicle		Akkumulátoros elektromos jármű
BET-VSP	Battery Electric Transit - Vehicle Scheduling Problem		Akkumulátoros elektromos járművek fordaszerkezeti problémái
EV	Electric vehicle		Elektromos járművek
ECV	Electric Commercial Vehicle		Elektromos haszongépjármű
ELV	End of Life Vehicle		Gépjármű élettartam vége
FCHEV	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle		Üzemanyagcellás hibrid elektromos gépjármű
FCV	Fuel Cell Vehicle		Üzemanyagcellás gépjármű
H2FC	Hydrogen and Fuel Cell		Hidrogén és üzemanyagcella
HEV	Hybrid Electric Vehicle		Hibrid elektromos gépjármű
ICE	Internal Combustion Engine		Belsőégésű motor
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle		Plug-in Hybrid elektromos gépjármű
	<b>Transit, transportation, logistics</b>		<b>Közlekedés, szállítás. logisztika</b>
SLA	Service Level Agreement		Szolgáltatás szint megállapodás
	<b>Methodology</b>		<b>Módszertan</b>
CE	Circular Economy		Körforgásos gazdaság
ILP	Integer Linear Programming		Egész számú lineáris programozás
SLR	Systematic Literature Review		Szisztematikus irodalomkutatás

TSE	Time-Space-Energy		Idő-tér-energia
TS	Time-Space		Idő-tér
	<b>Life cycle</b>		<b>Életciklus</b>
eFLIPS	Electric Fleet and Infrastructure Planning/Simulation		Elektromos flotta és infrastruktúra tervezése/szimulációja
EOL	End Of Life		Élettartam vége
TCO	Total Cost of Ownership		Teljes tulajdonlási költség
	<b>Organisations</b>		<b>Szervezetek</b>
IEA	International Energy Agency		Nemzetközi Energiaügynökség
UTA	Utah Transit Authority		Utah-i Közlekedési Hatóság
WEF	World Economic Forum		Világgazdasági Fórum