

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**Adatvezérelt közösségi autóbusz-közlekedés komplex logisztikai
rendszerének fejlesztése az elektrifikáció és a dekarbonizáció
figyelembevételével**

PhD-értekezés

Készítette:

Kruchina Vince

okleveles közgazdász, 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

professor emeritus

TÉMAVEZETŐ

Prof. Dr. habil. Illés Béla

professor emeritus

TÁRSTÉMAVEZETŐ

Prof. Dr. habil. Tamás Péter

intézetigazgató, egyetemi tanár

Miskolc
2025

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, 2025. február 28.

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 iránymutatásukkal, segítőkész munkájukkal és támogatásukkal segítettek értekezésem elkészítését.

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 során a szakterületéhez kapcsolódó építő jellegű javaslataiért.

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

Köszönöm a Miskolci Egyetem Logisztikai Intézet valamennyi kollégájának, hogy 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 autóbusz-közlekedés komplex logisztikai rendszerének fejlesztése az elektrifikáció és a dekarbonizáció figyelembevételével” című PhD-értekezéséhez

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

A kutatási téma kijelölésénél fontos tényező volt, hogy a jelölt 2022-től kezdődően releváns tapasztalatot szerzett a közlekedési logisztika területén az általa irányított menetrend szerinti közúti személyszállító vállalkozásban, és ez alapvetően meghatározta a lehetséges kutatási területek körvonalazását.

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 színvonalas PhD-dolgozatot állított össze.

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

Prof. Dr. habil. Illés Béla
professor emeritus

Prof. Dr. habil. Tamás Péter
intézetigazgató egyetemi tanár

Tartalom

1. Bevezetés.....	7
1.1. A tématerület vizsgálatának gazdasági és tudományos aktualitása	8
1.2. Egy korszerű, komplex rendszer fejlesztésénél figyelmet érdemlő területek	9
2. A kutatás célkitűzései és módszerei	10
2.1. A kutatás célkitűzései	10
2.2. A kutatás módszerei	10
3. A témához kapcsolódó szakirodalmi áttekintése	13
3.1. A szakirodalmi áttekintés módszertana	13
3.2. A szisztematikus irodalomkutatás tematikus területeire vonatkozó statisztikai kiértékelés.....	14
3.2.1. Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításban	15
3.2.2. Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések előfordulása.....	16
3.2.3. Statisztikai kiértékelés: Akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése	17
3.2.4. Statisztikai kiértékelés: Akkumulátor degradációja.....	17
3.2.5. Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban	18
3.3. Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításba ...	19
3.3.1. Az elektromos autóbuszok elterjedése: előnyök és kockázatok.....	19
3.3.2. Vegyes autóbuszflották	21
3.3.3. Üzemeltetési modellek és koncepciók	23
3.4. Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos üzemeltetési és fenntarthatósági kérdések.....	24
3.4.1. Az akkumulátortechnológiák, -életciklusok és -árak összehasonlítása.....	25
3.4.2. Az akkumulátorok töltése, kisülése	28
3.4.3. Az akkumulátorok töltésének illesztése a fordaszerkezetbe.....	33
3.4.4. Az akkumulátorok kifáradásával (degradációjával) és életciklusával összefüggő szakirodalom.....	35
3.4.5. A lítium-ion akkumulátorok degradációjának mérésével kapcsolatos nemzetközi tapasztalatok.....	40
3.4.6. Az akkumulátorok második élete, a visszautas logisztika szerepe	41
3.4.7. A visszautas logisztika szerepe elektromos járművek akkumulátorainak második életciklusában	45
3.5. A teljes tulajdonlási költség szerepe.....	46
3.6. Az elektrifikáció és dekarbonizáció energetikai összefüggései.....	50
4. Az innovatív üzemeltetési modell megalkotása.....	54
4.1. Az innovatív üzemeltetési modell megalkotásának módszertana.....	55
4.1.1. Az innovatív üzemeltetési modell logisztikai értelmezése	55

4.1.2. Az innovatív üzemeltetési modellben kialakított logisztikai rendszer határai, alkalmazási területe	56
4.1.3. Az innovatív üzemeltetési modell logisztikai folyamatai és entitásai.....	57
4.1.4. Az innovatív üzemeltetési modell információs folyamatai és entitásai	60
4.2. Az innovatív üzemeltetési modell holisztikus ábrázolása.....	67
4.3. Az innovatív üzemeltetési modell gyakorlati alkalmazása a Volánbusz Zrt.-nél, esettanulmány.....	68
5. Az autóbuszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntési modell és módszer kidolgozása.....	80
5.1. A tesztelhető rendszerváltozatok leírása	80
5.2. A döntéshozatali módszer ismertetése.....	81
5.3. Esettanulmány: A döntéshozatali módszer alkalmazása a Volánbusz Zrt.-nél.....	86
5.3.1. Működési összköltség (TCO –Total Cost of Ownership, euró/kilométer)	87
5.3.2. Karbonlábnyom – ÜHG-kibocsátás alapján (CF, gramm/kWh)	87
5.3.3. Utaselégedettség (CS, pontszámok)	88
5.3.4. Összegzés	89
5.4. Az esettanulmány kapcsán levonható következtetések.....	90
6. Az elektromos autóbuszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában innovatív újrahajtosítási modellek feltárása.....	91
6.1. A degradációra vonatkozó saját mérések és megállapítások	92
6.2. A visszautas logisztika szerepe elektromos járművek akkumulátorainak második életciklusában	96
6.3. Az elektromos járművek optimális akkumulátorméretének meghatározása és esettanulmánya	99
7. Az értekezés tézisei	107
8. Összefoglalás	109
8.1. A tézisek tudományos és gyakorlati megalapozottsága	109
8.2. További kutatási irányok.....	110
9. Irodalomjegyzék.....	111
9.1. Értekezés témakörében használt saját publikációk.....	111
9.2. Értekezés témakörében használt idegen publikációk	112
10. Mellékletek	120
10.1. melléklet: Az elektromos töltőből kinyert adatok.....	120
10.2. melléklet: Az elektromos autóbuszokból kinyert adatok.....	122
10.3. melléklet: Az 1. akkumulátorállapot-felmérési jelentés.....	123
10.4. melléklet: A 2. akkumulátorállapot-felmérési jelentés	132
11. Ábrák jegyzéke	138
12. Táblázatok jegyzéke	140
13. Rövidítések jegyzéke	141

1. Bevezetés

A disszertáció időszerűségét és a téma indokoltságát elsősorban a világméretű energiaválság és az Európai Unióban (EU) meghatározott klímapolitikai célok elérésének szükségessége adja. A jogszabályi kötelezettségek már 2025-től feladatokat rónak az autóbuszos operátorokra. Az EU annak érdekében módosította az elektromos járművek és egyéb új technológiák bevezetéséről szóló 2017/2400 rendeletét, hogy konkrét dátumokat határozzon meg a belső égésű motorok kivezetéséről, mely szerint 2035-ig lépcsőzetes rendszerben meg kell szüntetni a dízel- és benzinmeghajtású motorokat, továbbá az új motorgyártásnak kibocsátásmentesnek kell lennie. A Fit for 55 csomag lényegi eleme, hogy 2050-re klímasemleges legyen az EU, amelynek keretében 2030-ra az új városi autóbuszoknak is kibocsátásmentessé kell válniuk. A közösségi közlekedés zöldítése nem véletlen, hiszen az üvegházhatású gázok (ÜHG) teljes kibocsátásának 23%-át¹ adja az EU-ban, amely az energia-előállítás után a második legnagyobb kibocsátó szegmens. A jogharmonizáció keretében, a tiszta közúti járművek beszerzésének az alacsony kibocsátású mobilitás támogatásáról szóló 397/2022-es Kormányrendelet szerint az újonnan beszerzett járművek 53%-ának tiszta járműnek kell lennie, amely fogalom szerint lehet sűrített földgázzal (compressed natural gas – CNG) működő, tisztán elektromos vagy hidrogénmeghajtású. Összegezve megállapítható, hogy a hazai és a nemzetközi jogszabályi környezet pontos határidőket szabott annak érdekében, hogy a karbonsemlegesség a közösségi közlekedésben mihamarabb megvalósuljon hazánkban és az EU területén.

Meglátásom szerint a dekarbonizáció jelentősen összefügg az energiaellátással, és ezt a kapcsolatot a 3.6 fejezetben részletesen ismertetem. A közlekedésben tehát elengedhetetlenné vált az alternatív technológiák alkalmazása, hiszen az energiafüggetlenség biztosítása, valamint a már említett EU-s és hazai célok elérése nem lehetséges ezen technológiák alkalmazása nélkül [1]. A zöld átmenet tehát alternatív meghajtású gépjárművek nélkül, legyen az elektromos vagy hidrogénmeghajtású, nehezen kivitelezhető. Véleményem szerint tehát a technológia fejlődésének köszönhetően a klímapolitikai célok elérése, az elektromos autóbuszok munkába állítása, napjainkban már nem csupán a tervezőasztalokra megálmodott mérnöki „hóbort”, hanem 2023-ban már beteljesedett valóság volt.

Az autóbuszos közösségi közlekedés operátorai szerte a világon (Senzen városától Philadelphián vagy Izmiren át Delhiig) egyre nagyobb számban használnak elektromos meghajtású buszokat. Választásukat nem csupán a zöld átmenet támogatása vagy a közlekedési alapzaj csökkentése indokolja, mivel tisztán gazdasági számítások is alátámasztják a technológiaváltás szükségességét. Ez különösen igaz olyan országok esetében, ahol az energiaszükséglet rendkívül importigényes. Az elmúlt évek energiakrízisei rámutattak arra a talán közhelynek tűnő, de annál lényegesebb megállapításra, hogy olyan ország lehet gazdaságilag sikeres és stabil, amely képes a saját energiaszükségletét előállítani, gazdasági szerkezetét pedig úgy átalakítani, hogy energiainportjának mértéke a lehető legkisebb legyen.

¹ <https://www.statista.com/statistics/1325132/ghg-emissions-shares-sector-european-union-eu/>

A tudományos kutatásomat nem csupán a klímapolitikai célokra vonatkozó jogszabályoknak megfelelés magyarázza, hanem a 21. század hajnalán kibontakozó akkumulátortechnológiai forradalom, amely meglátásom szerint alapjaiban alakítja át az autó- és buszgyártást, így többek között segíthet a zöld átállásban is. A fosszilis energiahordozókkal szűkösen ellátott országok, közöttük hazánk is, az elektrifikációval szignifikánsan csökkenthetik energiaimport-igényüket, egyúttal növelhetik gazdasági stabilitásukat és függetlenségüket, továbbá meg is tudnak felelni a már említett klímapolitikai célkitűzéseknek.

A disszertáció időszerűségét és témáját tehát EU-s és hazai jogszabályi kötelezettségek, valamint az ezzel párhuzamosan megjelent akkumulátortechnológiai fejlődés, amely az alternatív meghajtású járművek esetében forradalmi változást hozott. Az említett jogszabályi, technológiai változások figyelembevételével kutatásom során arra fókuszálok, hogy a tudomány milyen segítséget tud adni annak érdekében, hogy hosszú távon, gazdasági szempontok szerint is fenntartható legyen a zöld átállás.

1.1. A tématerület vizsgálatának gazdasági és tudományos aktualitása

Jelen disszertációban az Európa egyik legnagyobb autóbusszos operátorának tekinthető Volánbusz Zrt.-ben és a nemzetközi szakirodalomban megtalálható műszaki, gazdasági adatokra támaszkodva egy olyan komplex megoldást mutatok be, amellyel jelentősen csökkenthető a károsanyag-kibocsátás oly módon, hogy gazdaságilag is fenntartható legyen a közlekedési vállalat, továbbá a megalkotott modell segítségével megközelíthető a lokálisan zéró kibocsátás is. A 2024-ben több mint 5700 darab belső égésű motorral működő és 100 darab elektromos autóbussz üzemeltetési adatait alapul véve, a nemzetközi szakirodalomra támaszkodva végeztem méréseket. A modell megalkotásához elengedhetetlen volt az akkumulátorok műszaki paramétereinek, a kifáradás (degradáció) görbéinek, de éppúgy a másodlagos felhasználás (körforgásos gazdaság ernyője alatti) lehetőségeinek vizsgálata is. Mindemellett figyelembe vettem az autóbusszok napi futásteljesítményeit is. A lokálisan zéró emisszió elérése nagy kihívás, és teljesítése érdekében egy rendkívül komplex, egymástól eddig elszigetelt részekből álló rendszert kell integrálnom. Ebben a komplex rendszerben kell megoldást találni a napi futásteljesítmények optimalizálására, a vegyes flotta megalkotására, az akkumulátorok másodlagos felhasználásának vállalaton belüli formáira, valamint arra is, hogy mekkora napelemkapacitást kell telepíteni az elektromos autóbusszflotta működtetéséhez szükséges áram előállításához. Megválaszolandó kérdés továbbá, hogy milyen irányítási rendszert kell kifejleszteni ahhoz, hogy az autóbusszokban fel nem használt energiát vissza lehessen termelni a hálózatba (vehicle to grid), vagy milyen összetételű flottát kell meghatározni a zavartalan működés biztosításához.

A disszertációban a Volánbusz Zrt. példáján keresztül bemutatom, hogy az autóbusszos közösségi közlekedésben nem önmagában kell vizsgálni az alternatív meghajtású buszok üzemeltetését. Ahhoz, hogy megfeleljünk az EU-s jogszabályok előírásainak, továbbá, hogy

gazdasági szempont szerint hosszú távon működőképes legyen a vállalat, egy új innovatív komplex rendszert kell kialakítani. Ebből a komplexitásból fakadóan pedig elengedhetetlen egy szofisztikált logisztikai, matematikai-informatikai modell és ennek irányítástechnikai megalkotása, amelynek segítségével az operátor folyamatosan optimális működést biztosít a vállalat számára. Az optimalizáción tehát azt értem, hogy törekedni kell a lokálisan teljesen karbonsemleges üzemeltetés elérésére, amely mind műszakilag, társadalmilag, mind gazdaságilag fenntartható a vállalat esetében. Az ismertetett célok eléréséhez az önmagukban is bonyolult rendszerek összekapcsolása szükséges, ami meglátásom szerint az Ipar 4.0 módszertanával megvalósítható.

1.2. Egy korszerű, komplex rendszer fejlesztésénél figyelmet érdemlő területek

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

1. Az EU vonatkozó jogi szabályai és irányelvei [1], illetve a hazai jogszabályok [2], [P/2].
2. A közlekedési szolgáltatások gazdaságilag hatékony és versenyképes működésére vonatkozó tulajdonosi elvárások [3].
3. A korszerű, áttörést hozó (diszruptív) technológiák bevezetésének szükségessége, alkalmazása [4], [5], [6], [P/2].
4. Energiahatékonysági, energiatartó és energiabiztonsági elvárások [7], [8], [9].
5. Környezettudatos és fenntartható működési mód [10], [11].
6. A demográfiai és életmódbeli 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 a következők alkalmazása biztosítja ezen elvárás teljesülését:

1. Ipar 4,0 módszertan.
2. Körkörös gazdasági modell.
3. Adatvezérelt folyamatok.

Az értekezés 2. fejezetében ismertetem a kutatási tevékenységem célkitűzéseit és módszertanát, a 3. fejezetében bemutatom a tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatásom módszertanát, és áttekintem a releváns kutatási eredményeket, megoldásokat. A 4., 5. és 6. fejezetben részletesen kifejtem a célkitűzéseknek megfelelő kutatási területekre vonatkozó, a tézisek megalapozását tartalmazó tevékenységem eredményeit, majd megfogalmazom az utóbbi három fejezethez kapcsolódó téziseimet a 7. fejezetben.

2. A kutatás célkitűzései és módszerei

A disszertáció témájának és kutatási céljainak megválasztásának indokait a bevezetésben részletesen kifejtettem. A következőkben ismertetem ezeket a célkitűzéseket és a kutatás módszertanát.

2.1. A kutatás célkitűzései

A kutatási célkitűzéseket a következők szerint foglalom össze:

1. Az autóbusszflottát üzemeltető vállalatok optimális és innovatív működési modelljének megalkotása. A modell esetében fontos célkitűzés volt, hogy a működés gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi szempontból hosszú távon fenntartható legyen, a közlekedési rendszer logisztikai folyamatai együttesen biztosítsák az elérhető legjobb teljes tulajdonlási költség szintet (Total Cost of Ownership – TCO), a lokálisan majdnem karbonsemleges üzemeltetést és az elektromos autóbusszok akkumulátorainak karbonlábnyomát jelentősen csökkentő visszautas logisztikai megoldást. Elvárásnak tekintetem, hogy a komplex rendszer energiaellátása olyan körkörös gazdasági és logisztikai folyamatokon alapuljon, amelyeket az Ipar 4.0 keretrendszerből nyert információk alapján adatvezérelt irányítási rendszer felügyel.

Az e célkitűzésnek megfelelő modellt az értekezés 4. fejezetében mutatom be.

2. Az innovatív modell integráns részét képező vegyes autóbusszflotta optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntési modell és módszer kidolgozása, a TCO, valamint mindazon tényezők figyelembevételével, amelyek az egyes járműtípusok flottába illesztésére ezen kívül még befolyással vannak, különösen a karbonlábnyom, valamint az ügyfél- és utaselégedettségi tényező.

Az e célkitűzésnek megfelelő döntési modellt és módszert az értekezés 5. fejezetében mutatom be.

3. A kutatási célom végezetül az elektromos autóbusszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában egy innovatív újrahasznosítási modell kidolgozása a visszautas logisztika eredményeinek figyelembevételével. A modell segítségével az autóbusszos operátorok javítani tudják az elektromos autóbusszok beruházási megtérülési rátáját, melynek segítségével az elektromos buszok megtérülése jobb lesz a hagyományos belső égésű motorral működő autóbusszokéhoz képest.

Az e célkitűzésnek megfelelő innovatív újrahasznosítási modellt az értekezés 6. fejezetében mutatom be.

2.2. A kutatás módszerei

Ebben a fejezetben ismertetem a disszertációban alkalmazott kutatómódszertant, amely először irodalomkutatásból, önálló adatgyűjtésből, akkumulátormérésből és -tesztelésből állt.

– **Szisztematikus irodalomkutatás**

Kutatási tevékenységem során szisztematikus irodalomkutatással feltártam a témakörre vonatkozó hazai és nemzetközi releváns forrásokat, publikációkat, elemeztem az ezekben megtalálható megállapításokat és publikált eredményeket. A szisztematikus irodalomkutatást az értekezés 3. fejezetében ismertetem. A disszertációban megfogalmazott tézisek valódiságát, aktualitását először a hazai és nemzetközi szakirodalom ismertetésével végeztem el. Segítségül hívtam a szakirodalom feltárásához a ScienceDirect, Elsevier, továbbá Web of Science interneten megtalálható tudományos publikációs gyűjtőhelyeket.

– **A szakirodalomban publikált megállapítások kiértékelése**

A módszertan lényeges eleme volt a publikált megállapítások kritikus értékelése, a kellően nem igazolt állítások kiszűrése, a modellalkotáshoz felhasználható tapasztalatok megismerése, az általam megfogalmazott téziseket megerősítő eredmények beépítése.

– **Modellalkotás**

A holisztikus modell megalkotásához meghatároztam a főbb logisztikai folyamatokat, az azokat alkotó entitásokat, az adatvezérelt működéshez szükséges adatok körét és fajtáit, valamint a rendszer elemei közötti kapcsolatokat.

– **A számítási algoritmusok meghatározása: TCO**

A modellszámításokhoz szükséges algoritmusokat és a felhasznált adatokat meghatároztam, és közel száz műszaki-gazdasági adatot gyűjtöttem, különös tekintettel a rendszert alkotó elemek TCO-jára.

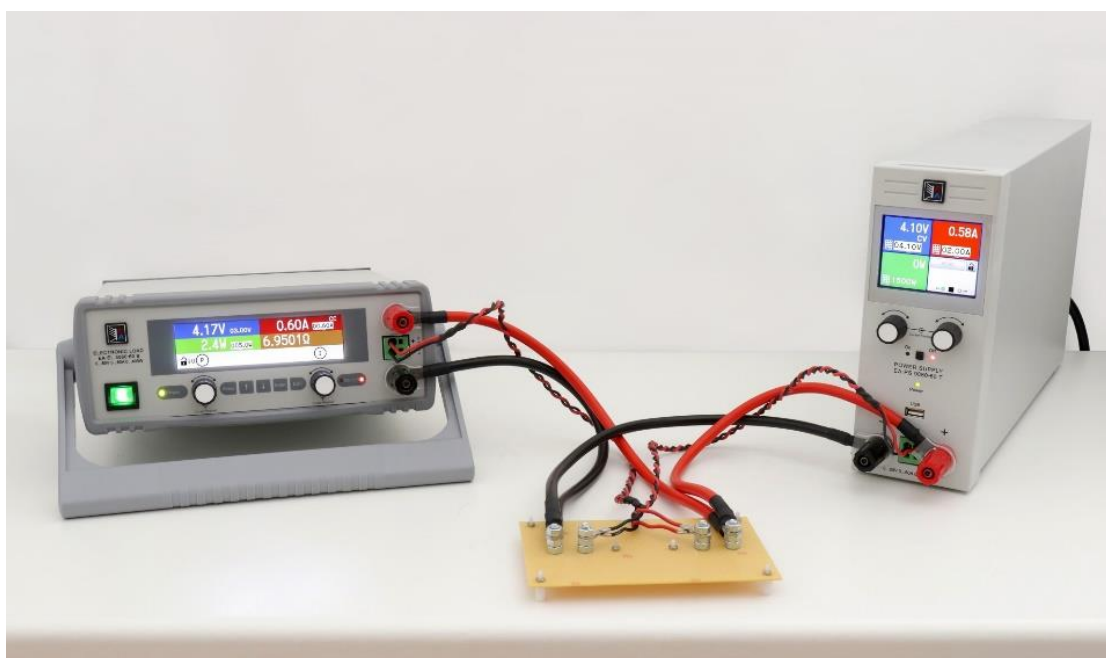
– **A hiányzó adatok és információk biztosítása a modell és az algoritmusok számára**

Meghatároztam a hiányzó adatok beszerzésének módját és forrását, valamint saját méréseket végeztem az akkumulátordegradáció vonatkozásában a következők szerint:

- Az elektromos autóbuszok – N=100 – műszaki adatait 2022. szeptember 1-jétől 2024. február 29-ig gyűjtöttem, melynek során vizsgáltam az akkumulátorok fogyasztási adatait, töltési sebességét, az e-buszokban meglévő dízelkályha fogyasztását. Mértem egy adott hőmérsékletre, domborzati viszonyokra és fordára kimutatott fogyasztást. Folyamatosan vizsgáltam az elektromos és a belső égésű motorral működő autóbuszok karbantartási, fogyasztási költségeit, gyűjtöttem a gázolaj, valamint az áram árának időbeli változását.
- Az elektromos töltőből és az elektromos autóbuszokból kinyert adatokat a 10.1. és a 10.2. melléklet mutatja be.
- Elvégeztem az akkumulátorok degradációjára vonatkozó tesztmérést a XTALIN Mérnöki Tervező Kft.-vel. (Az 1. és a 2. akkumulátorállapot-felmérési jelentést lásd a 10.3. és a 10.4. mellékletben.) A tesztelést 3 darab – BKV Zrt.-től kapott, Valence U27-36 XP típusú, amelyek 38.4 V, 45 Ah, 19,5 Kg. – akkumulátort 3 különböző hőmérsékleten teszteltünk. Számítógépes szoftver által vezérelt terhelés és tápegység található a mérési elrendezésben. Az akkumulátorokat 2015 és 2020 között használta

a BKV Zrt. A terheléssel mérjük az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A mérés hibahatára 0,01%. A procedúra közben mérjük a mérítés során kivett energiát, ebből határozzuk meg a kapacitást, továbbá előre kiválasztott szinteknél merítési és töltési DC belső ellenállást mérünk. Az akkumulátor névleges 45 Ah kapacitásának megfelelően 1 C-vel mérjük és 0,5 C-vel töltjük. A C töltés az akkumulátor töltési áramerősségét mutatja, tehát 1 C-vel való töltés az akkumulátorban található teljes kapacitással való töltést jelenti. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2,8 V alá csökken.

1. ábra: Az akkumulátorteszt mérőrendszere



– Validálás

A Volánbusz Zrt.-nél végzett mérések és adatfelvételek megalapozzák a disszertációban megfogalmazott tézisek helyességét.

A kutatási célkitűzésekhez kapcsolódó, a három tézisre vonatkozó kutatási tevékenységet az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat: A kutatási tevékenység mátrixa

Hipotézis	Szisztematikus irodalom-kutatás	Gazdasági adatok összegyűjtése, ismertetése	Műszaki adatok összegyűjtése, ismertetése	Akkumulátorok állapotának műszaki mérés	Matematikai módszer ismertetése	Esettanulmány és mérés ismertetése
H1	X	X	X			X
H2	X	X	X		X	X
H3	X		X	X	X	X

3. A témához kapcsolódó szakirodalmi áttekintése

Ez a fejezet mutatja be a kutatási téma megértéséhez elengedhetetlen tudománytörténeti ismereteket és terminus technicusokat, valamint ismerteti azokat a kutatási irányokat, amelyeket a hazai és a nemzetközi szakirodalom tematikus feldolgozásán alapuló kutatás során tártam fel, elemeztem, megalapozva a témakör objektív értékelését és a következtetések levonását.

3.1. A szakirodalmi áttekintés módszertana

A szakirodalom áttekintésének célja a tématerülettel kapcsolatos kulcsfontosságú hazai és nemzetközi megállapítások, kutatási eredmények bemutatása, és azoknak a bizonyítékoknak az összegyűjtése, amelyek az általam feltárt tudományos eredményeket alátámasztják vagy – adott esetben – megcáfolják.

Az EU Exact External Wiki honlapja [13] szerint e megközelítés meghatározó lépései a következők:

- Pontos és célratörő kérdések megfogalmazása és 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) származhatnak.
- Szisztematikus keretrendszer alkalmazása 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 befolyásoló globális hatások, a digitalizáció, a konnektivitás a tudományos szféra számára is megváltoztatták a kutatásokhoz szükséges információgyűjtés 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.

Mengist és szerzőtársai 2020-ban egy ilyen módszert mutatnak be a szisztematikus irodalmi áttekintés (SLR = systematic literature review) elvégzésére. Az SLR-t egy olyan folyamatként értelmezik, amely lehetővé teszi az adott témában előre meghatározott alkalmassági kritériumoknak megfelelő releváns bizonyítékok összegyűjtését, és így a megfogalmazott kutatási kérdések megválaszolását [14]. Az SLR alkalmasságát a kutatott témakör mélyebb feltárására *Kamarási és Mogyorósy* már 2015-ben megerősítették [15].

3.2. A szisztematikus irodalomkutatás tematikus területeire vonatkozó statisztikai kiértékelés

A 3.1. fejezet alapján megállapítható, hogy a tematikus irodalomkutatás rendkívül komplex, hiszen négy kutatási tématerületen és három részterületen összesen 43 kulcsszó alapján tártam fel releváns publikációkat (2. táblázat).

Az egyes kutatási területeken a hivatkozott publikációk időrendi sorrendben következnek, ami lehetővé teszi a téma evolúciójának és trendjeinek nyomon követését, az egyes megállapítások időtállóságán keresztül a publikáció relevanciájának megítélését.

2. táblázat: A tématerületek és a kulcsszavak áttekintése

Kutatási tématerület/kutatási részterület	Kulcsszavak száma
I. Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításba	7
II. Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések kezelése	2
1. Akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése	11
2. Akkumulátor degradációja	5
3. Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban	4
III. A teljes életciklusköltség szerepe	6
IV. Az elektrifikáció és dekarbonizáció energetikai összefüggései	8
Kulcsszavak száma összesen	43

Az ismertetett módszertan alapján a következő kutatási területekre és azokhoz tartozó kulcsszavakra terjedt ki az SLR:

- Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításba
Kulcsszavak: *adoptálás, közlekedés jövője, elektrifikáció, implementálás, vegyes autóbuszflotta, közlekedés átalakítása, fordaszerkezet².*
- Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések
Kulcsszavak: *dekarbonizáció, zéró emisszió*
 - Akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése
Kulcsszavak: *akkumulátormenedzsment, -feltöltés, -kapacitás, lemerülési karakterisztika, részleges feltöltés, stacionárius töltés, töltési igény, töltési infrastruktúra, töltőállomás, -szükséglet, power grid, V2G.*
 - Akkumulátor degradációja
Kulcsszavak: *degradáció, kifáradás, állapot, töltöttségi állapot (SoC), akkumulátor élettartama (SoH).*

² A fordá egy autóbusz egy nap feladatait tartalmazza.

- 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 életciklusköltség szerepe

Kulcsszavak: *értékcsökkenés, élettartam, életciklus, teljes tulajdonlási költség (TCO), CAPEX, OPEX.*

- Az elektrifikáció és dekarbonizáció energetikai összefüggései

Kulcsszavak: *energiatárolás, energiatároló, napelempark, zsinóráram, energiabiztonság, megújuló energiaforrások, körkörös energiarendszer, zéró emisszió.*

A kulcsszavakra történő idősoros keresés céljából több lehetőséget is megvizsgáltam. A Web of Science-ben csak szerzőkre, illetve intézményekre lehet keresni, a kulcsszavas keresés csak fizetett csomagban elérhető funkció, hasonlóan a Scopus-ban is csak szerzőkre, illetve intézményi affiliációra lehet keresni, a kulcsszavas keresés nem elérhető, a Google Scholar keresője alkalmas az említett keresések lefolytatására, a találatok időbeli megoszlását a következő fejezetben ábrákban mutatom be.

A JSTOR alkalmazását is célszerűnek tartottam, és a keresést a következőképpen végeztem el: a kereséshez a Constellate Dataset Builder nevű szolgáltatását használtam. A kulcsszavakat AND, illetve OR logikai operátorokkal kapcsoltam össze a dokumentációnak megfelelően, illetve * operátorral jelöltem azokat a szavakat, amelyek más formában is érvényes találatnak minősültek.

A keresésekhez a JSTOR-ban megtalálható tudományterületek listáját a következőkre szűrtem:

- Applied sciences,
- Business,
- Economics,
- Environmental studies,
- Information science,
- Physical sciences.

A kereséseket a 2000–2024-ig tartó időszakra végeztem el. A találatok számát a „Documents over time” nevű vizualizációból exportáltam CSV fájlalba mindegyik keresés esetében, majd Excelben (Ábrák_v01.xlsx) készítettem belőlük ábrákat.

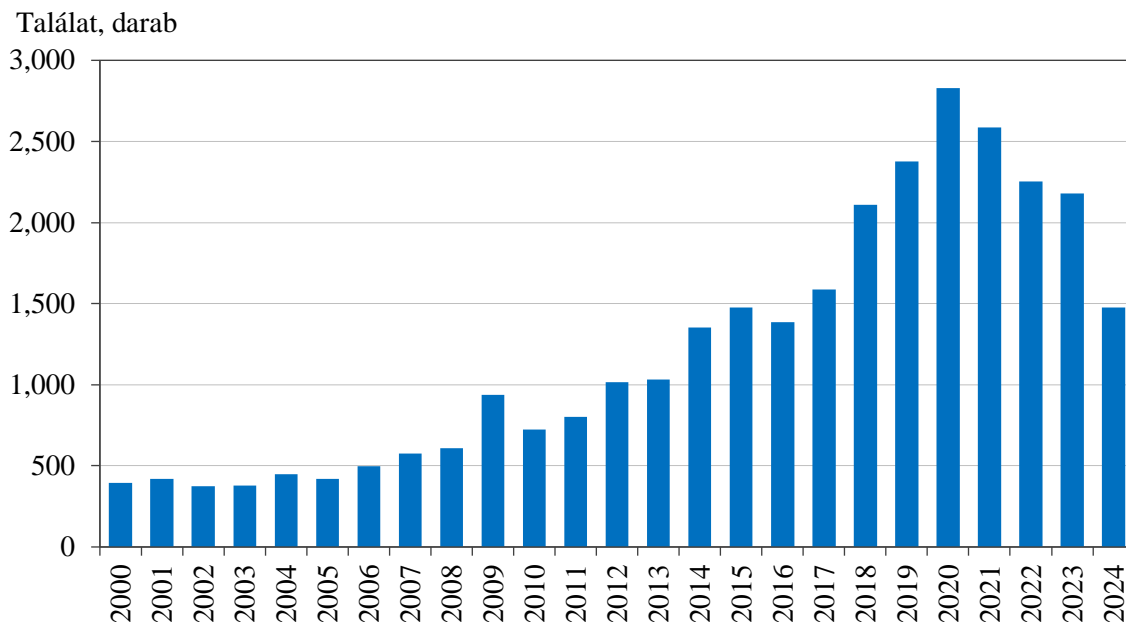
3.2.1. Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításban

Kulcsszavak (HU): *elektromos autóbusz + adoptálás, közlekedés jövője, elektrifikáció, implementálás, vegyes autóbuszflotta, közlekedés átalakítása, fordaszerkezet.*

Kulcsszavak (EN): *(electric bus) AND (adopt*) OR (future transport*) OR (electrification) OR (implement*) OR (mixed fleet) OR (transform*) OR (bus transverse structure).*

Összes találat száma: **30 258 darab.**

2. ábra: Statisztikai idősor: Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításba 2000 és 2024 között



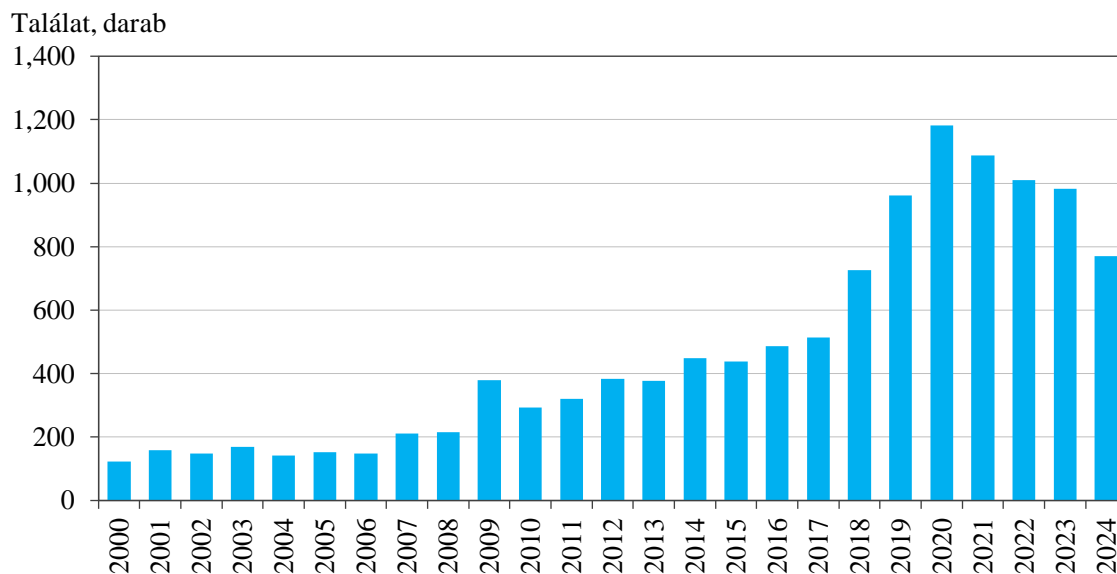
3.2.2. Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések előfordulása

Kulcsszavak (HU): autóbusz + dekarbonizáció, zéró emisszió.

Kulcsszavak (EN): (bus) AND (decarbonization) OR (decarbonisation) OR (zero emission).

Összes találat száma: **11 829 darab.**

3. ábra: Statisztikai idősor: Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések előfordulása 2000 és 2024 között



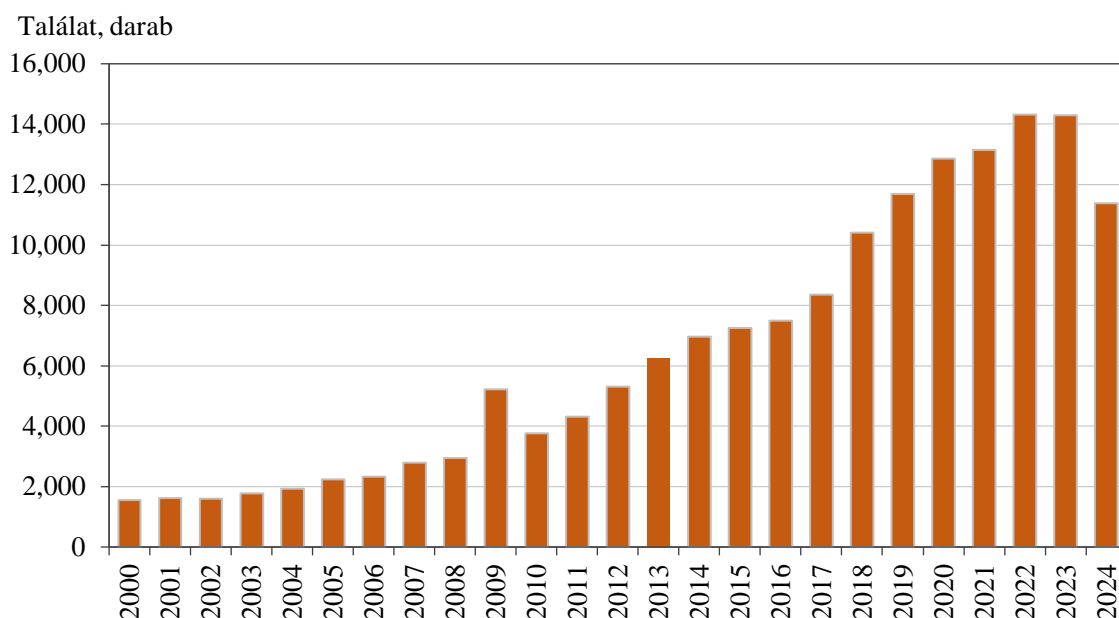
3.2.3. Statisztikai kiértékelés: Akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése

Kulcsszavak (HU): akkumulátor + akkumulátormenedzsment, -feltöltés, -kapacitás, lemerülési karakterisztika, részleges feltöltés, stacionárius töltés, töltési igény, töltési infrastruktúra, töltőállomás, -szükséglet, power grid, V2X.

Kulcsszavak (EN): (battery) AND (management) OR (charg*) OR (capacity) OR (discharg*) OR (characteristic*) OR (partial charg*) OR (stationary charg*) OR (charging demand) OR (charging infrastructure) OR (charging station) OR (charging demand) OR (grid) OR (v2x).

Összes találat száma: **161 906 darab.**

4. ábra: Statisztikai idősor: Az akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése 2000 és 2024 között



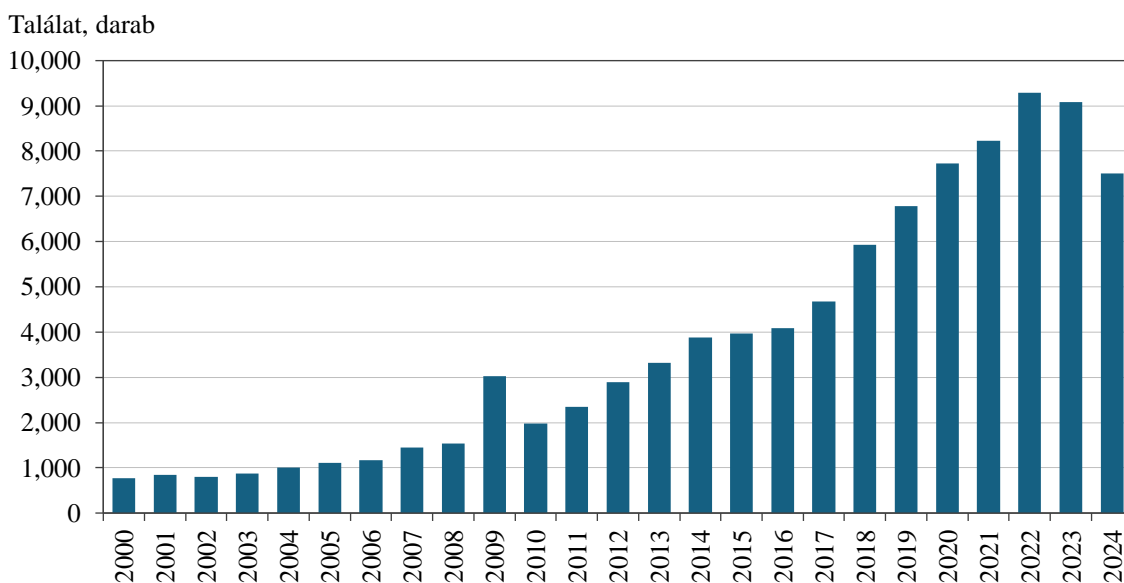
3.2.4. Statisztikai kiértékelés: Akkumulátor degradációja

Kulcsszavak (HU): akkumulátor + degradáció, kifáradás, állapot, töltöttségi állapot (SoC), akkumulátor élettartama (SoH).

Kulcsszavak (EN): (battery) AND (degrad*) OR (fatigue) OR (condition) OR (state of charge) OR (state of health).

Összes találat száma: **94 296 darab.**

5. ábra: Statisztikai időszoros: Az akkumulátor degradációja 2000 és 2024 között



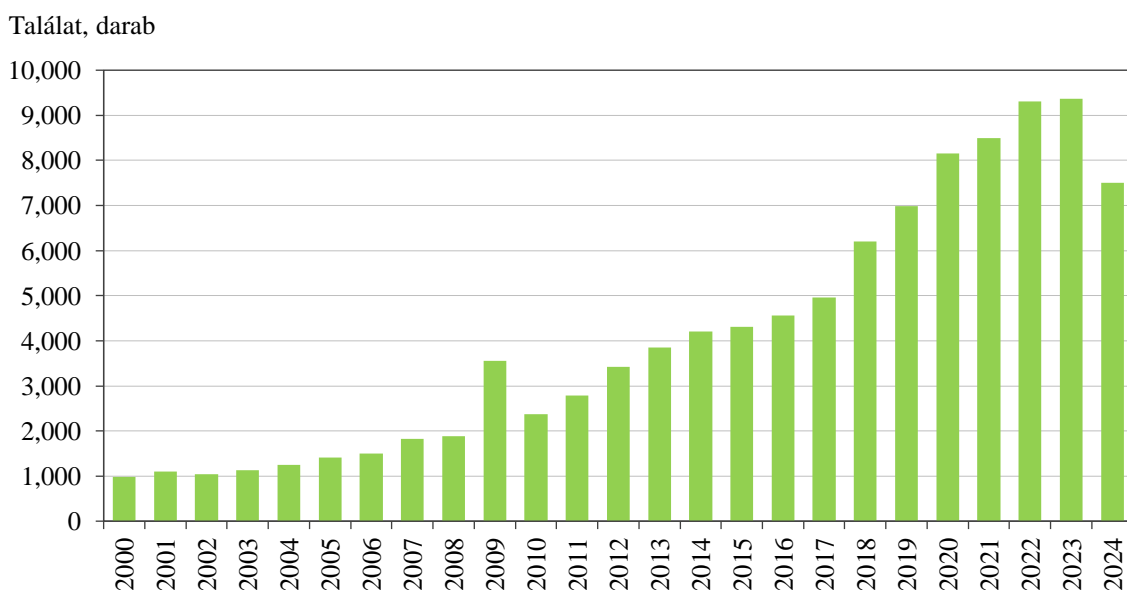
3.2.5. Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban

Kulcsszavak (HU): akkumulátor AND autóbusz + akkumulátor-értéklánc, fordított logisztika, második élet, másodlagos.

Kulcsszavak (EN): (battery) AND (bus) OR (value chain) OR (reverse logistics) OR (second life) OR (secondary).

Összes találat száma: **102 212 darab.**

6. ábra: Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban 2000 és 2024 között



A 3. fejezet további alfejezetei tartalmazzák az előzőekben meghatározott kutatási területekre kiterjedő tematikus irodalomkutatás során feltárt publikációkból megismerhető eredményeket. Az idősoros statisztikák azt mutatják, hogy a téma aktualitása dinamikusan fejlődött a 2000-es évektől kezdődően. A bemutatott ábrák jól szemléltetik a tématerületek iránt egyre növekvő tudományos érdeklődést, hiszen az akkumulátorok fejlődésével, az elektromos autók, autóbuszok térhódításával a tudomány kiemelt figyelmet fordított és fordít ezen technológiai újdonságok műszaki, gazdasági és környezetvédelmi kivívásaira.

3.3. Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításba

Az elektromos járművek, illetve ezek között az elektromos autóbuszok (a hazai szakirodalomban gyakran használt kifejezéssel „elektromos buszok”) térhódítása a jelentős járműflottát üzemeltető vállalatok számára magával hozta az új technológiát képviselő járművek meglévő flottába történő beillesztésének, integrációjának kérdését.

3.3.1. Az elektromos autóbuszok elterjedése: előnyök és kockázatok

Borén és szerzőtársai (2016) hangsúlyozta, hogy elméleti szempontból az elektromos buszok a városi közlekedésben fenntarthatóbbak és olcsóbbak lehetnek, mint a fosszilis tüzelésű buszok. A szerző – ekkor még – nem talált valós üzemeltetési körülmények mellett végrehajtott olyan tesztek, amelyek a szélsőséges, téli időjárási viszonyok között értéklik az elektromos autóbuszok megbízhatóságát a svédországi helyi közlekedésben. Az európai piacon forgalmazott elektromos buszokról aktualizált zajmérési adatok még szintén nem álltak rendelkezésre. Az utóvizsgálatnak ezért az volt a célja, hogy valós környezetben tesztelje és igazolja azt, hogy mennyire energiahatékonyak és csendesek az elektromos buszok.

A valós körülmények közötti autóbusz-tesztelés metodikája arra épült, hogy egy szignifikáns tesztidőszak alatt valós információkat gyűjtsenek össze az energiafelhasználásról és az érintettek véleményéről.

Az energiafelhasználást befolyásoló tényezőket a szerzők a következők szerint határozták meg:

- topográfia,
- a járási autóbusz-megállók és más, forgalomszervezéssel összefüggő megállások száma,
- városi forgalmi adatok,
- az autóbuszok átlagsebessége,
- utasterhelés,
- a gépkocsivezető tapasztaltsága,
- klímaviszonyok,
- külső hőmérséklet.

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

Pelletier és szerzőtársai (2019) aktuális kérdésnek tekintették az autóbusszflották elektrifikálását, és olyan átmeneteket tartottak célszerűnek, amelyek megszabják azt, hogy egy adott időszakon belül hány elektromos busznak kell lennie a flottában. Bemutattak egy olyan flottatervezési megoldást, amely lehetővé teszi a szervezetek számára olyan járműösszetételei terv meghatározását, amely költséghatékony módon teljesíti a flottavillamosítási célokat, figyelembe véve a beszerzési költségeket, az üzemeltetési költségeket, az infrastrukturális beruházások ráfordításait és a keresleti viszonyokat. Számos töltési infrastruktúraopcióval foglalkoztak, mint például a lassú és a gyors töltőállomások, a felső áramszedős töltők és az indukív (vezeték nélküli) töltők. A modell alapján számítógépes szimulációkat folytattak le több forgatókönyv szerint. A 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 autóbusszok adaptálásának megoldásait, és egy összefoglaló, iránymutató jelentést készítettek a városi közlekedésszervező szervezetek és autóbussz üzemeltető vállalkozások számára. Ez kiemeli, hogy „az elektromos buszok (e-buszok) zero kipufogógáz-kibocsátása és alacsonyabb üzemeltetési költsége segítheti a városokat a helyi zajterhelési és levegőminőségi problémák megoldásában, és csökkenti az ÜHG-kibocsátást. Hangsúlyozzák, hogy az elektromos közlekedés kialakításának számos kihívását csak gondos tervezéssel és koordinációval lehet teljesíteni. A jelentés 16 olyan város tapasztalatain és tanulságain alapul, amelyek autóbussz flottájuk villamosításán dolgoznak. Fontos háttér-információkat ismertet az elektromos autóbusszokról, és elősegíti az általuk nyújtott közlekedési szolgáltatások megtervezését és a megvalósítási keretrendszerének kialakítását” [18].

A McKinsey Center for Future Mobility (2021) kutatásából azt állapítja meg, hogy az elektromos járművek átalakítják az autóiipart és elősegítik a bolygó szén-dioxid-mentesítését. Ekkor a kínai Shenzhen városának személyszállítását már 16 000 teljesen elektromos autóbusszból álló flotta látta el. Az elektromos járművek számának növekedése alapján 2030-ra az akkumulátorok gyártási kapacitásának 20-szoros növekedését prognosztizálták Európában, becslésük szerint az iparnak hetente több mint 15 000 töltőt kell telepítenie 2030-ig az EU-ban. 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) az Egyesült Államokban egy útmutató kiadványt tettek közzé az akkumulátoros elektromos autóbusszok buszos 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 bár az elektromos autóbusszflotta olyan előnyökkel járhat, mint például az

alacsonyabb üzemanyag- és karbantartási költség, a nagyobb 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 közlekedésszervezőknek, a közszolgáltatóknak és más érdekelt feleknek sok mindent meg kell fontolniuk a bevezetése előtt [20].

Shah és szerzőtársai (2021) a nagyvárosokra egyre nagyobb mértékben jellemző levegőszennyezési problémák miatt 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 a fenntartható megoldások bevezetésének érdekében [21].

A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja az elektrifikáció és dekarbonizáció fontosságát a közlekedési vállalatok számára, valamint felhívja a figyelmet az innovatív megoldások szükségességére, de azokat nem dolgozzák ki részleteiben. Foglalkoznak olyan kérdéskörökkel, mint a vegyes flotta kialakítása vagy a gazdaságilag hatékony üzemeltetés, amelyeket disszertációmban a 4. és az 5. fejezetben részletesebben kifejtek, és tovább építem azon modelleket, amelyek alapjait az ismertett szakirodalomban már lefektettek.

3.3.2. Vegyes autóbuszflották

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

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

Li és szerzőtársai (2018) azt javasolták, hogy a dízelüzemű autóbuszok által okozott légszennyezési problémák enyhítésére több tiszta energiájú autóbusz kerüljön a vegyes gépjárműflottába. Közülük legtisztábbnak, legalacsonyabb károsanyag-kibocsátásúnak az elektromos buszt ismerték el. A tanulmány az elektromos buszok alkalmazása esetében lényeges korlátnak tekintette azok rövid hatótávolságát és hosszú töltési idejét. A szerzők ebben a cikkben a hátralévő élettartam többlethaszon-költség (RLABC) megközelítésére alapozva egy új élettartamú járulékos haszon-költség (NLABC) elnevezésű megközelítést javasolnak a vegyesbuszflotta-működtetés (MBFM) problémáinak megoldására. Négy típusú autóbust, közöttük elektromos buszt, sűrített földgázüzemű buszt, hibrid-dízel buszt és dízelbuszt vesznek figyelembe, tekintettel azok eltérő üzemeltetési költségeire, a károsanyag-kibocsátás externális költségeire és a beszerzési költségekre. Eredményeik azt mutatják, hogy az autóbuszfordák koordinációjával és a vegyes flotta optimalizálásával összehangolt útvonaltervezés jelentős előnyökkel jár az üzemeltető közlekedési vállalkozás működésében [22].

Li és szerzőtársai (2019) az elektromos autóbuszok hatótávolságának és töltésének korlátait vizsgálva keresnek 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, valamint megvizsgálták az autóbuszflotta vezénylésével és az üzemanyagtöltő állomások elhelyezésével az üzemeltetők és az utasok számára elérhető minimális teljes rendszerköltséget. A problémát egészértékű lineáris programozás (ILP) keretében fogalmazták meg a globális optimális megoldás megtalálásához. A számítási hatékonyság érdekében a TS buszáramlási hálózaton alapuló egyszerűsített formulát dolgoztak ki a nagyobb léptékű problémákra fókuszáló megoldások érdekében. A módszert a hongkongi buszjáratokra alkalmazták annak érdekében, hogy elemezni tudják a szükséges buszpark méretét, az üzemeltetési költségeket, az utazási költségeket és a több energiaforrást használó buszok kibocsátási értékeit [23].

Lee és szerzőtársai (2021) az optimális autóbuszflotta méretének meghatározására egy olyan forгатókönyvet dolgoztak ki, amelyben meglévő buszjáratokat akkumulátoros elektromos autóbuszokkal látják el, 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-fogyasztás ellenére. Felfedezték, hogy a nagy flottaméret és a nagy töltési infrastruktúrakapacitás csökkentheti a minimálisan szükséges akkumulátorkapacitást, amely kompromisszum kulcsfontosságú az optimalizálás során. Bemutatták továbbá a javasolt keretrendszert a Jejuban (Dél-Korea) gyűjtött elektromosbusz-üzemeltetési adatok felhasználásával, és azt állapították meg, hogy a buszjáratok optimális villamosítása gazdasági és környezeti szempontból előnyös lehet [24].

Cui és szerzőtársai (2023) megállapították, hogy az elektromos buszok magas beszerzési költsége, nehezen prognosztizálható karbantartási költsége és az alkalmazási helyükön sok esetben még nem kellően kiépített, továbbá kapacitásában nem megfelelő töltési infrastruktúra miatt a dízelautóbuszok teljes körű lecserélése rövid távon kockázatos kihívást jelent. A buszüzemeltető cégek jelentős része olyan helyzetben találja magát, 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 buszmenetrendek betartásával, a maximális környezetkímélő, ugyanakkor költséghatékony módon. A tanulmány bemutatja a vegyes autóbuszflottákon belüli járművezénylés és töltési ütemezés közös optimalizálási problémájának koncepcióját. Ebben az esetben is egy egészértékű lineáris programozás 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 a 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 rejt magában, ezért az autóbusz-állomány fokozatos elektrifikálása mellett a vegyes gépjárműflották kialakítása jelenthet olyan megoldást, amely gazdaságilag is fenntartható, és csökkenti az energiaellátási, valamint az infrastrukturális rizikófaktorok hatását.

3.3.3. Üzemeltetési modellek és koncepciók

Wei és szerzőtársai (2018) a tömegközlekedési rendszert a multimodális közlekedési ökoszisztéma szerves részeként értelmezve vizsgálták az elektromos járművek bevezetésének hatását abban a tekintetben, hogy az akkumulátoros elektromos buszok (BEB) és az üzemeltetéshez szükséges infrastruktúra technológiai fejlődése, a dízelüzemű és a sűrített földgázzal működő (CNG) autóbuszok életképes helyettesítése milyen feltételek mellett valósítható meg. A szerzők kiemelik annak fontosságát, hogy „*kihívást jelent, miképp lehet optimálisan telepíteni a BEB rendszert annak egyedi térbeli-időbeli jellemzői miatt*”. A megfelelő tér- és időbeli kiépítés minimalizálhatja a járműbeszerzéssel és a töltőállomások kiosztásával kapcsolatos költségeket, miközben képes fenntartani a meglévő buszjáratokat és a megrendelt menetrendet. A javasolt módszert a Utah Transit Authority (UTA) által üzemeltetett tranzithálózaton valósították meg [26].

Fiori és szerzőtársai (2021) bemutatják azt az akkumulátoros elektromos autóbuszokra (BEB) kifejlesztett mikroökonómiai 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 a segédrendszerek számára szükséges átlagos teljesítményt. A modell a pillanatnyi energiafogyasztást a menetrendi útvonal, a jármű-karakterisztika és egyéb működési feltételek (környezeti hőmérséklet, az autóbusz utasterhelése, észlelt forgalomsűrűség) alapján számítja ki. A modell a pillanatnyi energiafogyasztást szimulálja a járatútvonal és a jármű jellemzőinek, valamint a működési feltételeknek (mint például a környezeti hőmérséklet, a buszterhelés és a forgalmi viszonyok) függvényében. A modellt 110 utazás adatai alapján kétszintű modellellenőrzéssel validálták. Mikroszinten az eredmények azt igazolták, hogy a kalibrált modell jól kezeli a vonalak üzemi feltételeinek változékonyságát. Makroszintű validálás során a modell, ahol extrapoláltak több 100 elektromos autóbuszra, 6%-os hibát mutatott [27].

Dirks és szerzőtársai (2022) a városi levegő minőségének 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 annak érdekében, 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 vonatkozó átalakítási tervének meghatározásához. Modelljük összekapcsolja a központi stratégiai és operatív döntéseket, minimalizálja a teljes tulajdonlási költséget (TCO), és elemzi a nitrogén-oxid-kibocsátás lehetséges csökkentését. Eredményeiket egy valós buszhálózat esettanulmányával is bizonyítják, mely szerint az elektromos buszok átfogó integrációja megvalósítható és gazdaságilag előnyös. Az akkumulátorkapacitás és töltési teljesítmény optimalis flottaátalakításra gyakorolt hatásának elemzésével a szerzők 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, ökoszisztémaszemléletben 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.

3.4. Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos üzemeltetési és fenntarthatósági kérdések

Szakmai és tudományos körökben már a 2000-es évek előtt világossá vált, hogy az elektromos járművek elterjedése és térhódítása szorosan összefügg a hajtásláncukban működő akkumulátorok üzemeltetési, valamint fenntarthatósági kérdéseinek sikeres megoldásával.

Harris és szerzőtársai (2018) 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 meghatározásában. Az alacsony károsanyag-kibocsátású alternatív autóbusz-technológiák iránt egyre nagyobb érdeklődést mutatnak az autóbuszflotta-üzemeltetők, 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 életciklusköltségek és az ÜHG-kibocsátás bizonytalanságának figyelembevételére. A keretrendszerben az akkumulátortechnológiák, a töltési infrastruktúra és a kiegészítő igények kombinációinak tizenegy forgatókönyvét értékelték. Mindegyik akkumulátoros elektromos buszokra vonatkozó forgatókönyv esetében 80%-os megbízhatósággal kijelenthető, hogy az életciklus ÜHG-kibocsátása 10–58%-kal mérséklődik a dízelbuszokéhoz képest, de az életciklusköltségei 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 elektromosbusz-technológiákra 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 átvételéről és az erőforrás-elosztásról, valamint bizonyos szintű bizalmat biztosít a technológia azon képessége iránt, hogy az mérsékelni tudja a teljes életciklusra gyakorolt negatív hatásokat [29].

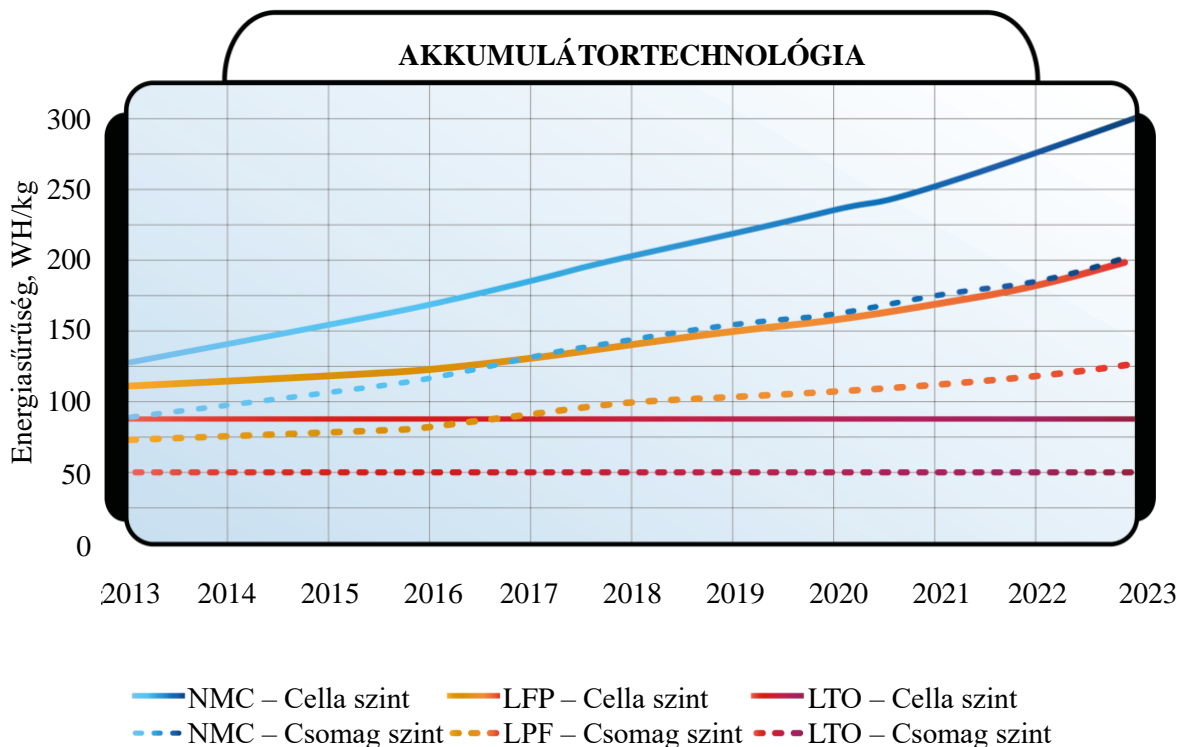
A *Global EV Outlook* (2023) felmérése szerint az autóiipari lítium-ion (Li-ion) akkumulátorok iránti kereslet mintegy 65%-kal, 550 GWh-ra nőtt 2022-ben, a 2021-es körülbelül 330 GWh-ról, elsősorban az elektromos személygépkocsi-eladások növekedésének következtében, és „2022-ben az új regisztrációk száma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

Liu és szerzőtársai (2022) az elektromos járműakkumulátor-technológiák és az akkumulátormenedzsment fejlődésével összefüggésben áttekintik a hibrid és a tiszta elektromos járművekhez használt akkumulátortechnológiákat, továbbá a legmodernebb akkumulátormenedzsment-megoldásokat, valamint azok 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 jégeretes jövót [31].

3.4.1. Az akkumulátortechnológiák, -életciklusok és -árak összehasonlítása

Mint ahogyan az élet minden szegmensében, a lítium-ion akkumulátorokat az elektromos járművekben is alkalmazzák, és a technológia fejlődésével megindult a verseny a kWh/kilométerben mért energiafogyasztás, az akkumulátorok össztömegének csökkentése és a legmagasabb energiasűrűség elérése érdekében. A lítium-ion technológiák három legnépszerűbb típusát jelző mozaikszavak a kémiában használt ásványi anyagok angol nyelvű rövidített megnevezéséből származnak, azaz LTO (Lithium Titanium Oxid), az LFP (Lithium Iron Phosphate) és az NMC (Nickel Manganese Cobalt). A 7. ábra megmutatja, hogy a *BMZ Poland* (2021)-es elemzése [32] szerint az NMC az energiasűrűség, de az egységsúly és a térfogat tekintetében is vezető szerepet tölt be.

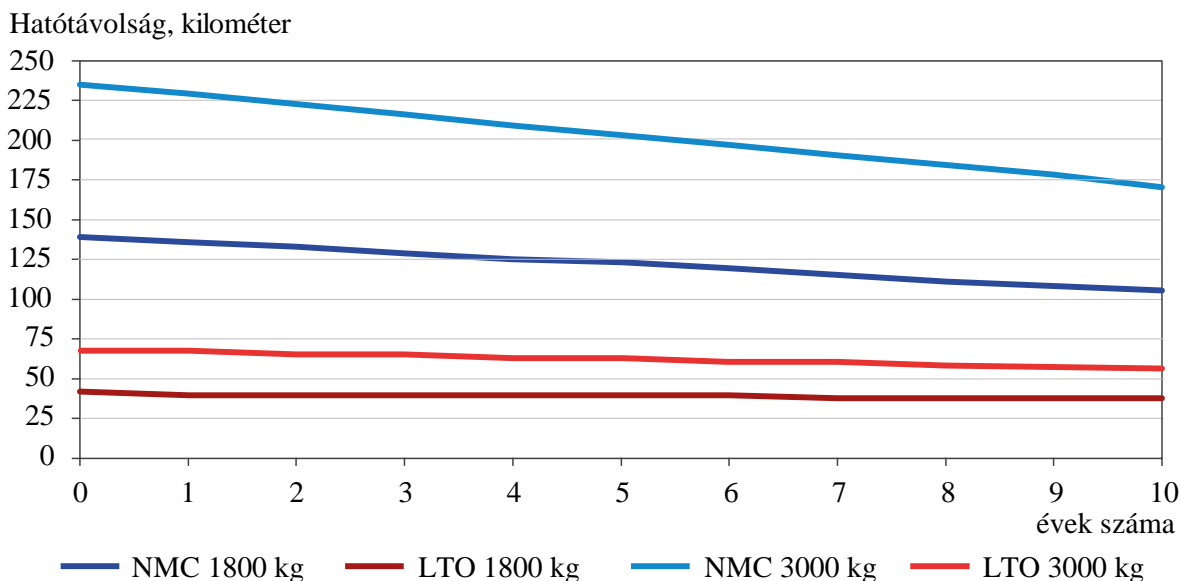
7. ábra: A nikkél-mangán-kobalt (NMC), lítium-ferrofoszfvát (LFP) és lítium-titán-oxid (LTO) technológiák fejlődésének összehasonlítása az energiasűrűség tekintetében cella és akkumulátorcsomag szinten



Forrás: BMZ-Poland (2021) [32].

A 8. ábra egy 12 méteres elektromos autóbuszba beépített, négy különböző típusú vontató akkumulátort (NMC 1800, LTO 1800, NMC 3000, LTO 3000 kilogramm) hasonlít össze. 60 000 kilométer éves futási teljesítmény esetében megmutatkozik a hatótávolságok típustól függő 0–25%-os csökkenése.

8. ábra: Az NMC és LTO akkumulátor összehasonlítása egy 12 méteres elektromos autóbusz esetében 10 éves időtartam alatt, a hatótávolság függvényében



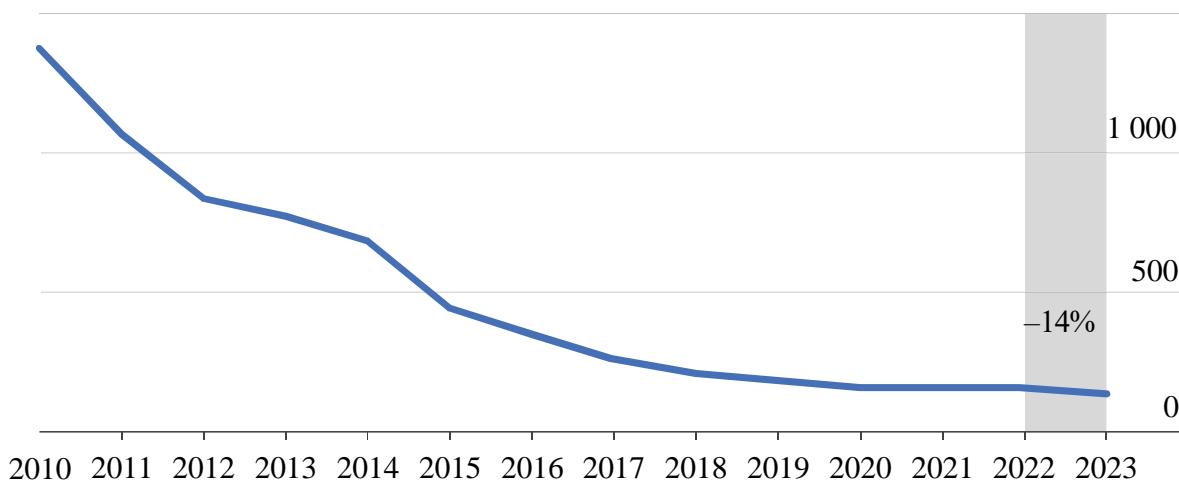
Forrás: BMZ-Poland (2021) [32].

A hatótávolság csökkenése erősen befolyásolja az adott elektromos autóbusz napi fordítávolságának teljesíthetőségét, és ezáltal szükségessé teszi vagy a vegyes autóbuszflotta járműösszetételének változtatását, vagy a vontató akkumulátorcsomag cseréjét, végső esetben a forda áttervezését. „A megfelelő méretű akkumulátorral ellátott elektromos autóbusz kiválasztásának jelentősége meghatározó a megfelelő szolgáltatás biztosítása szempontjából, hiszen az akkumulátor cseréjét az akkumulátorok árának alakulása döntően befolyásolja” [32].

A BloombergNEF (2023) elemzése [33] alapján Pataki (2024) [34] szerkesztésében készült 9. ábra a lítium-ion akkumulátorcsomagok árának alakulását 2010-től 2023-ig mutatja. Az ismertetett tizenhárom év alatt, a lítium-ion akkumulátorcsomagok ára közel 90%-kal csökkent. Kijelenthető továbbá, hogy folyamatosan csökkenő tendencia mellett az árak USD/kWh-ban számított súlyozott átlaga 2023-ra 14%-kal csökkent.

9. ábra: A lítium-ion akkumulátorcsomagok árának összehasonlítása

2023. évi értéken súlyozott USD: \$1 500/kWh



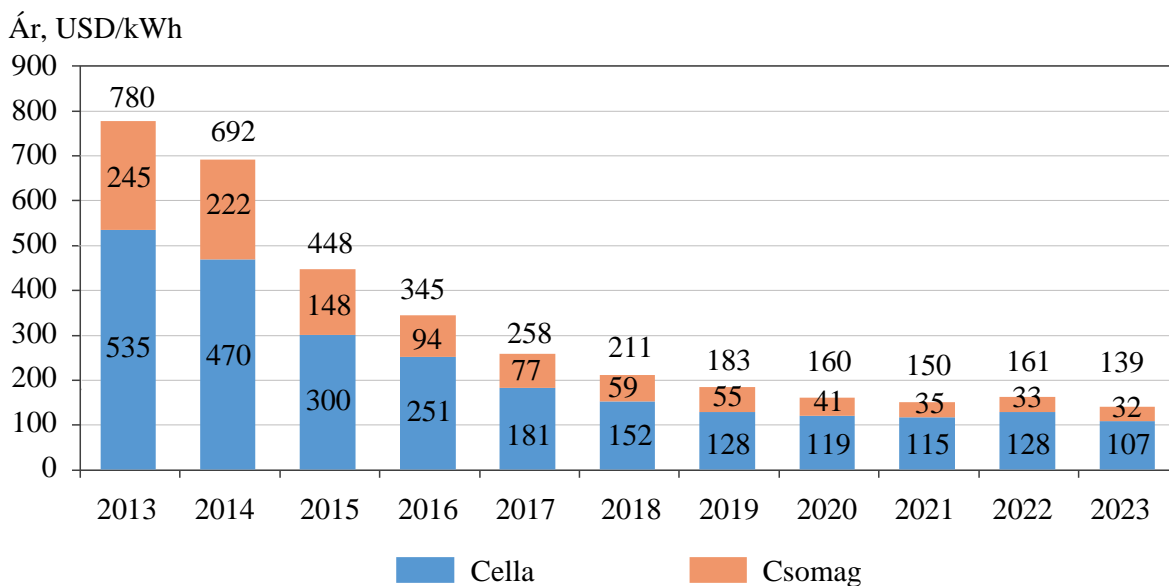
Forrás: BloombergNEF (2023) [33], [34].

A 9. ábrán szereplő értékek elektromos személygépkocsik, haszongépjárművek, autóbuszok, két- és négykerekű járművek, valamint stacionárius energiaforrásokban használt lítium-ion akkumulátorok árainak súlyozott átlagaként értendők.

Értékes információval szolgál a 10. ábra [33] a lítium-ion akkumulátorcsomagok és -cellák árának alakulásáról, amelyek az előzőekhez hasonlóan képzett súlyozott átlagon alapulnak 303 adatforrás felhasználásával.

Az ábra alapján megállapítható, hogy 1 kWh kapacitás ára 10 év alatt 780-ról 139 USD-re, a kezdő ár 17,8%-ára csökkent, ami kedvező tendencia mind a OPEX, mind a CAPEX számítása szempontjából, hiszen az akkumulátor ára az elektromos busz költségének közel 50%-át teszi ki.

10. ábra: A lítium-ion akkumulátorcsomag és -cella árának összehasonlítása 2013–2023 közötti időszakban



Forrás: BloombergNEF (2023) [33].

Az üzemeltető számára a teljes tulajdonlási költség (TCO) szempontjából középtávon optimális flotta kialakítását azonban az is befolyásolja, hogy melyik akkumulátortípus 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 nagyobb degradáció nélkül [34].

A modern nátrium-ion (Na-ion, NIB) akkumulátorok elsősorban energiatárolásra alkalmasak, különösen a megújuló energia túltermelésének gazdaságos tárolására. A nátriumalapú akkumulátorok nagy előnye, hogy nem gyúlékonyak, és akár 50 000 töltési ciklust is kibírnak, ami tízszerese a lítium-ion akkumulátorok töltési ciklusainak [34].

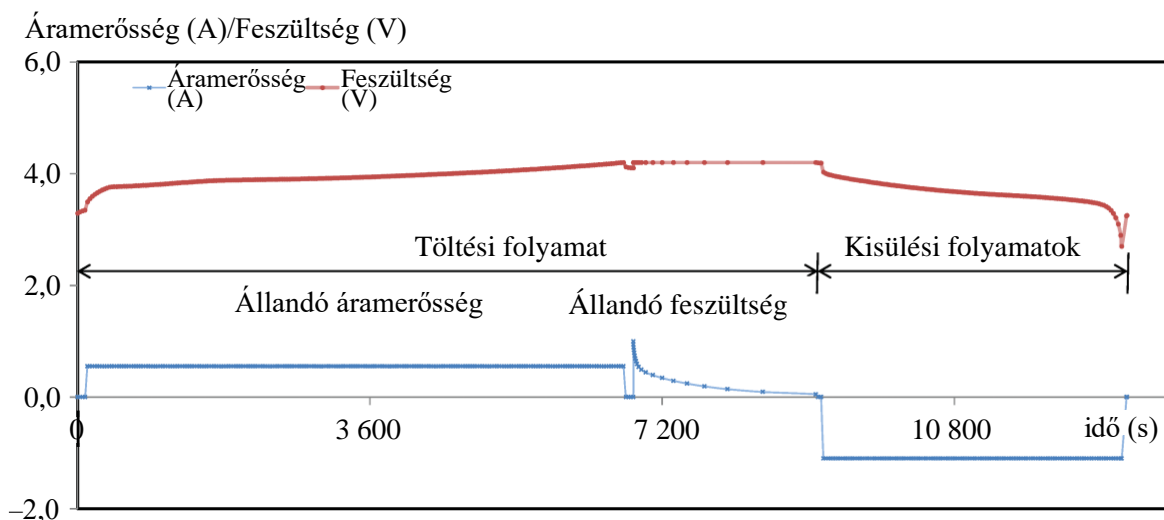
3.4.2. Az akkumulátorok töltése, kisülése

Chen és szerzőtársai (2015) az elektromos járművekben használt lítium-ion vontató akkumulátorok állapotfigyelő technikáival, kiemelten kapacitás/töltési állapot (SoC) és feszültség tanulmányozásával foglalkoznak az úgynevezett Grey rendszerelmélet alkalmazása révén. Az akkumulátor kisülési/töltési ciklusai alatti viselkedését elemzi, és összpontosít az előre jelző paraméterekre. A kapacitás (SoC = State of Health) és az azt befolyásoló különböző tényezők közötti kapcsolat tanulmányozására a Grey-reláció elemzést alkalmazzák. Az eredmények azt mutatják, hogy a Grey-prediction szegmensmodell hatékony előrejelzési mód az elektromos járművek akkumulátorai esetében [35].

Tseng és szerzőtársai (2015) 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 állapotának prognózisára. Az eredményül kapott regressziós modellek nemcsak nyomon követhetik az akkumulátor leromlási (degradációs) trendjét, hanem korai szakaszban pontosan megjósolhatják annak hátralévő hasznos élettartamát is (RUL = Remaining Useful Life).

11. ábra: Töltési és kisülési profilok



Forrás: Tseng és szerzőtársai (2015) [36].

A teljes 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 együtthatóit részecskesokaság-optimalizálási (PSO = particle swarm optimization) eljárással keresték meg. A szimulációk azt mutatták, hogy a V_{dis} -t és az R -t öregedési paraméterként használó regressziós modellek pontosabban tudnak valódi egészségiállapot-profil felépíteni, mint a ciklusszámot (N) használók. A modellek adaptívvá tételére a szerzők a Monte Carlo-módszert alkalmazták. A későbbi eredmények azonban azt mutatták, hogy ez az akkumulátor élettartamának előrejelzésében csak jelentéktelen javulást hozott [33].

Gao és szerzőtársai (2017) az elektromos buszok energiafogyasztását, az akkumulátorok teljesítményét értékelik valós útvonalakon és standardizált buszjáratokon keresztül. Tanulmányuk 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 a szükséges akkumulátorkapacitást, 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 akkumulátorkonfigurációk és rugalmas akkumulátorcsere-gyakorlatok jelentős előnyökkel járhatnak. 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 nagy fokú eltéréseit, elemzésük azt mutatta, hogy jelentős költségmegtakarítás érhető el, ha a menetrend szerinti útvonalakon alapuló rugalmas akkumulátorcsere-gyakorlatok mellett a menetrend szerinti útvonalakon többféle akkumulátorkapacitású konfigurációt használni képes elektromos buszokat alkalmaznának. A jelenlegi gyakorlat, miszerint a nagy akkumulátorkapacitású elektromos buszok bármely útvonalon, illetve a kis akkumulátorkapacitásúak csak bizonyos rövid útvonalakon közlekednek, az üzemeltetés rugalmasságának csökkenéséhez vezet, így nagyon gyakran túlzott akkumulátorkapacitást használnak, ami túlzott költségráfordítással jár a buszflották számára. Az autóbuszok akkumulátorainak rugalmas megválasztása és az elektromos buszok alternatív töltési megoldásai, ahogyan azt az említett kutatás javasolja, lehetővé tennék bármely útvonal kiszolgálását a megfelelő akkumulátorkonfigurációkkal. 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 akkumulátorkapacitást biztosítsanak. A publikáció szerint összességében a jármű és az akkumulátor költségei csökkenthetők ezzel a megközelítéssel, miközben kielégítik a flotta szolgáltatási igényeit [37].

Schiffer és szerzőtársa (2017) kiemelték, hogy az elektromos haszongépjárműveket üzemeltető közlekedési céges flották tervezésénél elsősorban az útvonalválasztási döntések voltak fókuszban, összefüggésben azzal, hogy korlátozott hatótávolságuk és a szükséges töltési infrastruktúra, a töltőállomások elhelyezkedése is befolyásolja a vontatási akkumulátorok különben is viszonylag hosszú feltöltési idejét. Tanulmányukban egy olyan helymeghatározási megközelítést ismertetnek, 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 járművek szükséges darabszáma, 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 [38].

Wang és szerzőtársai (2017) egy olyan modellezési keretrendszerrel mutatnak 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 kiküszöbölhetők 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 [39].

Rogge és szerzőtársai (2018) azokkal a korlátokkal foglalkoztak, amelyek a hagyományos dízelüzemű autóbuszokról az elektromosra való átállás során azok hatótávolsága és vontató akkumulátorainak szükséges töltési ideje miatt jelentkeznek. Tanulmányukban egy módszertant ismertetnek a depótöltésű elektromos autóbuszflották és a hozzájuk tartozó töltési infrastruktúra költségoptimalizált tervezésére. A definiált probléma az akkumulátoros buszok vezénylésére, a flotta összetételére és a töltési infrastruktúra optimalizálására egyetlen közös folyamatban terjed ki. A járművek menetrendjének és fordájának változásait pénzügyi hatások szempontjából kiértékelik, valamint a buszrendszer beruházási és üzemeltetési költségeivel együtt veszik figyelembe. Az így létrejövő teljes tulajdonlási költség lehetővé teszi a műszaki változatok 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 befolyásolják az adott busztípus és annak műszaki jellemzői. Például egy alacsony össztömegű autóbusz teljes energiafogyasztása akár 32%-kal alacsonyabb lehet, mint a nagy hatótávolságú buszé, bár a futásteljesítménye utóbbinak 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*” [40].

Lin és szerzőtársai (2019) különösen az elektromos autóbuszok nagyszabású gyorsítottállomás-tervezésére összpontosítanak. A szerzők a közlekedési rendszer és az elektromos hálózat közös tervezésének optimalizálását interdiszciplinárisan vizsgálták. Az elektromos autóbuszflották méretének növekedésével párhuzamosan folyamatosan növekvő töltési igény kielégítésére tekintettel a töltési szolgáltató hálózat térbeli kialakítása mellett – a hosszú távú tervezés érdekében – az időbeliséget is figyelembe vették. Az általuk javasolt tér-időbeli modell meghatározza az elektromos buszok töltőállomásainak helyét és méretét, és a modell megvalósításához kapcsolódik egy többlépcsős infrastruktúratervezési stratégia is. A modellt és a többlépcsős tervezési stratégiákat numerikus kísérletek sorozatával igazolták. A kínai Shenzhenre kidolgozott esettanulmányban igazolták a modell robusztusságát a változtatások tervezésére [41].

He és szerzőtársai (2020) arra hívják fel a figyelmet, hogy az akkumulátoros elektromos buszokat (BEB) a tömegközlekedési szolgáltatások megrendelő és közlekedésszervező

hatóságai gyorsan felkarolták környezeti, valamint gazdasági előnyeik miatt. Ezen autóbuszok 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 gyorsöltés nagyobb kihívást jelent a BEB rendszer töltési eseményeinek ütemezésében és kezelésében. Az útközbeni gyorsöltéssel a BEB-ek elérhetik ugyanazt a hatótávolságot és az üzemidőt, mint a dízelüzemű társaik. Az útközbeni gyorsöltés megvalósítása a működési területen magasabb villamosenergia-igénnyel és feltehetően a csúcsidőben magasabb villamosenergia-díjakkal jár, amelyre az energetikai rendszernek is fel kell készülnie, és az üzemeltetők számára – gondos töltésütemezés és -kezelés nélkül – az útközbeni gyorsöltés jelentősen növelheti az üzemanyagköltségeket és csökkentheti a BEB-ek gazdasági vonzerejét. A tanulmány egy olyan hálózati modellezési keretrendszer ismertét, amelyben egy töltési ütemterv határozza meg, hogy mikor kell tölteni egy BEB-et, 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, folyamatos idősoros változókkal. Ezután diszkrétizáló módszert és lineáris újrafogalmazási technikát alkalmaztak annak érdekében, hogy a modellt lineáris programként újrafogalmazzák. Végül a modellt kiterjedt numerikus tanulmányokkal mutatták be, amelyek két valós buszhálózaton alapultak. Az eredmények azt mutatták, hogy a javasolt modell hatékonyan képes meghatározni az optimális töltési ütemezést és kezelést egy gyorsöltő BEB rendszerhez, amely magában hordozza a nagyszabású valós buszhálózatokban való felhasználás lehetőségét [42].

Liu és szerzőtársa (2020) a hatótávolsággal és töltési idővel kapcsolatos problémák megoldása érdekében az elektromos autóbuszokkal végzett fordák olyan kialakítását vizsgálják (BET-VSP, azaz battery electric transit – vehicle scheduling problem), ahol megállóhelyi telepített töltők elhelyezése lehetséges. A probléma matematikai megfogalmazására két egyenértékű változatot azonosítanak. 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 módszert fejlesztettek ki. Először egy lexikográfiai módszeren alapuló, kétlépcsős konstrukciós és optimalizálási megoldási eljárást, másodsor pedig egy beállított max-flow megoldási módszert dolgoztak ki. Három numerikus példát használtak feltáró eszközként a megoldási módszerek bemutatására, valamint egy Szingapúrra vonatkozó valós esettanulmányt. Az eredmények alapján a javasolt matematikai programozási modellek és megoldási módszerek hatékonyak és alkalmazhatók nagyszabású valós BET-VSP-k megoldásában [43].

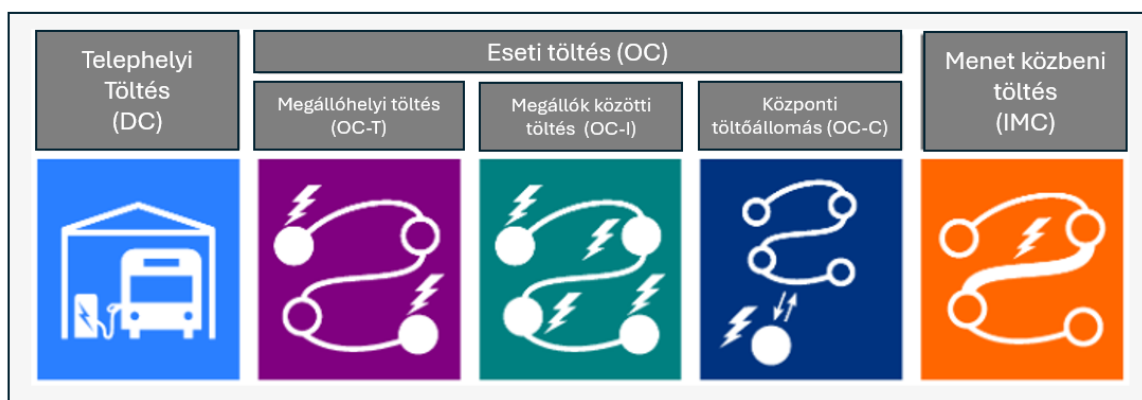
He és szerzőtársai (2023) az elektromos autóbuszok közlekedési rendszerekbe integrálásának előmozdítása érdekében átfogó optimalizálási keretrendszer fejlesztettek ki, amely a BEB rendszerek kombinált töltésiinfrastruktúra-tervezési, járműütemezési és díjkezelési problémáit orvosolja azzal a céllal, hogy minimalizálja a teljes tulajdonlási

költséget (TCO). Ezt vegyes integer nemlineáris problémaként fogalmazták meg. Ezután egy genetikai algoritmus alapú megközelítést javasoltak annak megoldására. Végül három alternatív forgatókönyvet elemeztek, amelyek a Utah állambeli Salt Lake Cityben található közlekedési hálózaton alapultak, és összehasonlították a numerikus kísérleteket az optimális forgatókönyv eredményeivel. Az összehasonlított eredmények megmutatják a javasolt modell és megoldási algoritmus hatékonyságát a BEB rendszerek költséghatékony tervezési stratégiájának meghatározásában [44].

3.4.3. Az akkumulátorok töltésének illesztése a fordaszerkezetbe

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

12. ábra: Az elektromos autóbuszok töltési stratégiái



Forrás: Jefferies (2020) [45].

A 12. ábra ismerteti az operátorok lehetséges töltési változatait, amelyek nagyban függenek a kiépített töltőinfrastruktúrától és a fordaszerkezettől.

A töltési folyamat nagyban befolyásolja a fordák kialakítását, hiszen figyelemmel kell lenni a várakozási és a 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 töltőállomás (OC-C). A jármű mozgása közben történő (IMC – In-motion-charging) töltési technológia azokra a városokra jellemző, amelyek már rendelkeznek trolibuszhálózattal. Utóbbi technológiának tekinthetők azonban a közúti burkolatba ágyazott vezeték nélküli töltési rendszerek is, amelyek még kísérleti (pilot projekt) stádiumban vannak.

13. ábra: A töltési logika alapján vezérelt folyamat sémája

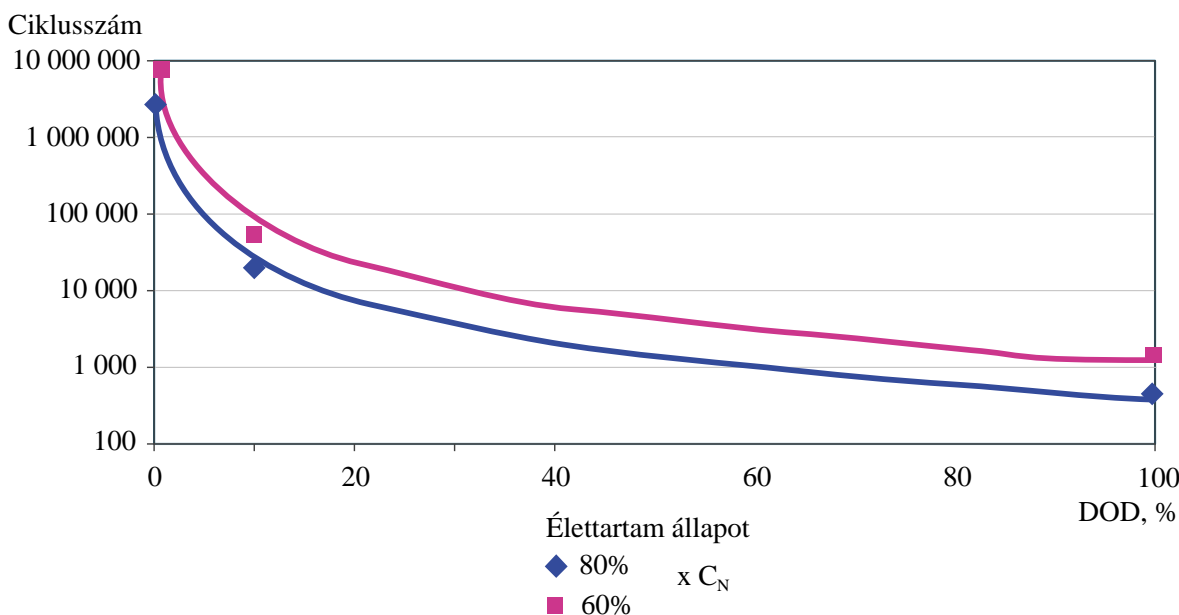


Forrás: Jefferies (2020) [45].

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 (State of Charge – SOC), aminek 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 megállapítható, hogy magasabb SOC magasabb kapocsfeszültséget 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 élettartama szempontjából. Túl alacsony SOC esetén azonban az anód réz áramgyűjtőjének korróziója és a katód aktívanyag-szerkezetének szétesése negatívan befolyásolhatja az akkumulátor élettartamát.

A 14. ábra bemutatja, hogy a kisütés mélysége (Depth of Discharge – DOD) szintén komplex hatással van az akkumulátor élettartamára [46]. A szakmai vélemények szerint kijelenthető, hogy létezik egy optimális DOD az akkumulátor élettartama tekintetében, azonban ez a DOD általában túl kicsi ahhoz, hogy megfeleljen a vezetési tartományra vonatkozó követelményeknek.

14. ábra: A kisütés mélységének (DOD) hatása az akkumulátor degradációjára



Forrás: Homan (2018) [46].

3.4.4. Az akkumulátorok kifáradásával (degradációjával) és élettartamával összefüggő szakirodalom

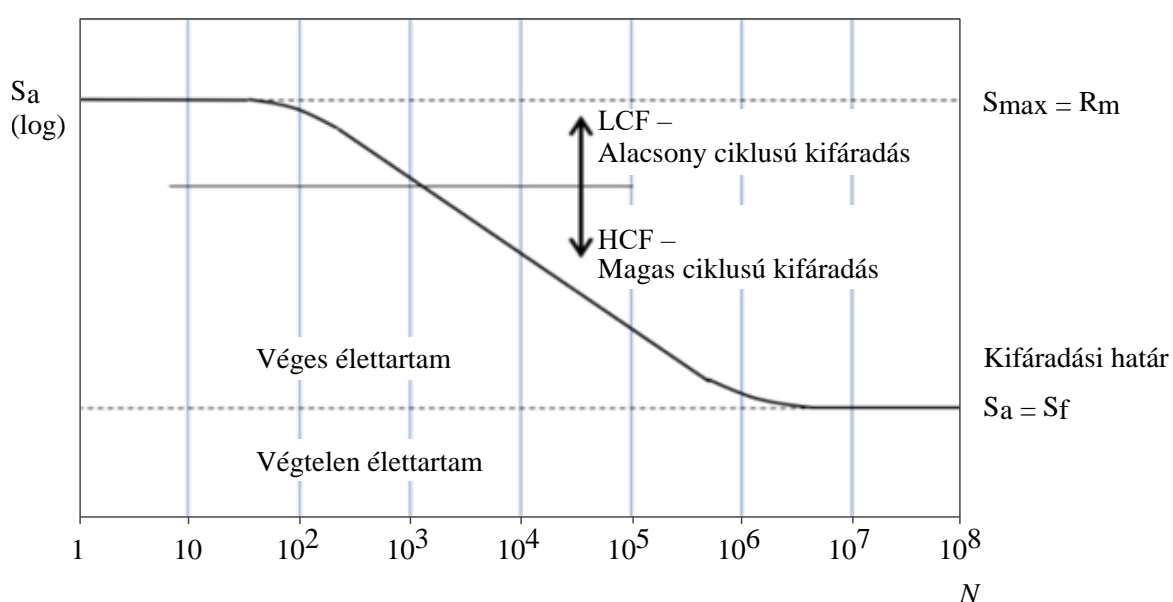
Az akkumulátorok degradációja számos összetett folyamat következménye, ahol a ciklikus öregedés és a naptári öregedés együttesen játszanak szerepet, továbbá a belső ellenállás növekedésével járnak. A ciklikus öregedés során az akkumulátor kapacitása csökken, főleg a töltési és kisütési ciklusok gyakoriságának növekedése miatt. Ennek háttérben 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 fejezi ki, 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 ÜHG-kibocsátást.

Xu és szerzőtársai (2016) 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. Tanulmányukban egy félig empirikus lítium-ion akkumulátorleromlási 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 akkumulátoröregedési vizsgálat eredményeit. A modell adaptálható különböző típusú lítium-ion akkumulátorokhoz. A gyártó adatai alapján bemutatják továbbá a modellegyűthetők hangolási módszereit is. A rendszer egy ciklusszámláló módszert tartalmaz a szabálytalan működésből származó feszültségciklusok azonosítására, lehetővé

téve a leromlási modell alkalmazását bármely akkumulátor-energiatároló (BES) esetében [47].

Homan (2018) a Wöhler-féle kifaradási határértékeket bemutató S-N görbével jellemezte a degradációt. A 15. ábra vízszintes tengelyén a meghibásodásig eltelt ciklusok száma logaritmikus skálán van megadva, a függőleges tengelyen (lineáris vagy logaritmikus) a ciklus feszültségamplitúdója (néha a maximális feszültség) adott. Az S-N görbék kifaradási tesztekéből származnak. A teszteket 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 élettartamként értelmezik [46].

15. ábra: Az akkumulátordegradációra alkalmazott S-N görbe



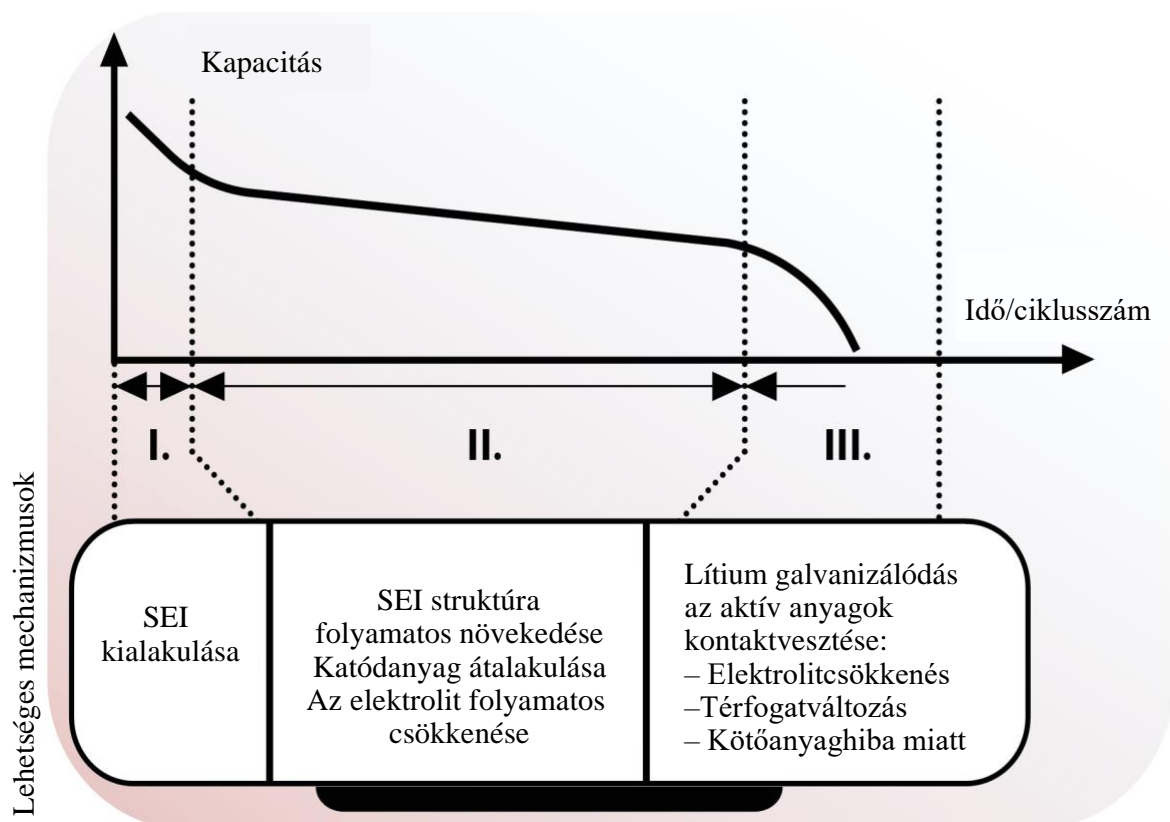
Forrás: Homan (2018) [46].

Han és szerzőtársai (2019) az elektromos járművekben széles körben használt lítium-ion akkumulátorok leromlását (degradációját) az akkumulátorkutatás kulcsfontosságú tudományos problémájának nevezték. Az akkumulátor előregedése korlátozza az energiátárolást, a teljesítményt és az elektromos járművek teljesítményét, valamint jelentősen befolyásolja a költségeket és az élettartamot. Ezért ez a tanulmány átfogóan áttekinti az akkumulátor leromlásának kulcsfontosságú kérdéseit a teljes életciklus során. Először is bemutatja az akkumulátor belső öregedési mechanizmusait, figyelembe véve a különböző anód- és katódanyagokat, hogy könnyebben megérthetők legyenek az akkumulátor kifaradási jellemzői. Ezután a hosszabb élettartam érdekében az akkumulátor élettartamát befolyásoló tényezőket részletesen ismertetik tanulmányukban a tervezés, a gyártás és az alkalmazás szempontjai szerint.

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

Amennyiben nemcsak egy cella, hanem egy egész akkumulátor-rendszer degradációját vizsgáljuk, akkor megállapítható, hogy a rendszer teljesítményét az egyes cellák teljesítménye határozza meg, így a cellák öregedése vezethet a rendszer öregedéséhez, viszont az akkumulátor-rendszer teljesítményét jelentős mértékben befolyásolják a cellák közötti degradáció különbségei [48].

16. ábra: A degradáció mechanizmusa



Forrás: Han (2019) [48].

Az akkumulátorok nemlineáris öregedése három szakaszra bontható:

1. szakasz: szilárd elektrolit határréteg-képződés; hirtelen, gyors degradáció;
2. szakasz: további szilárd elektrolit határréteg-képződés, a katódanyag strukturális elváltozása, elektrolitvesztés; lineáris szakasz;
3. szakasz: lítium galvanizáció, folyamatos anyagvesztés; hirtelen, gyors degradáció.

Általánosságban megállapítható, hogy az elektromos járművekben jelenleg használt legtöbb akkumulátor általában nemlineáris öregedési jellemzőt mutat, amely nagyjából három szakaszra osztható, ahogy azt a 16. ábra mutatja. 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 ellenállás-növekedés következik be. Ennek oka lehet a lítium-ion-készlet gyors elvesztése és/vagy az aktív anyagvesztés az elektrolit elvesztése miatt, a kötőanyag meghibásodása és a térfogatváltozás miatt [48].

Severon és szerzőtársai (2019) az összetett, nemlineáris rendszerek, például a lítium-ion akkumulátorok élettartamának pontos előrejelzésével foglalkoznak.

Az akkumulátorok változatos öregedési mechanizmusai, az eszközök jelentős variabilitása és a dinamikus működési feltételek továbbra is nagy kihívást elé állítják a kutatókat. A degradáció mélyebb elemzése céljából olyan adatkészletet hoztak létre, amely 124 kereskedelmi forgalomban lévő lítium-vas-foszfát/grafit cellát tartalmaz, amelyeket gyorsöltési körülmények közötti ciklusokban, 150-től 2300-ig terjedő ciklusélettartamban vizsgáltak. A korai ciklusok kisüléshőfeszültség-görbéinek felhasználásával, amelyek még nem mutatnak kapacitáscsökkenést, gépi tanulási eszközöket alkalmaztak a cellák ciklusélettartam szerinti előrejelzésére és osztályozására. Legjobb modelljeik 9,1%-os teszthibát 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 [49].

Johnen és szerzőtársai (2021) a lítium-ion akkumulátorok kapacitáscsökkenését hosszú távú ciklikus öregedés során olyan rugalmas szigmoid típusú regressziós elrendezéssel modellezték, melyben különböző regressziós paraméterek értelmezhetők. Tanulmányukban ismertették azokat a valós adatokon alapuló statisztikai eljárásokat, mint például a paraméterbecslést, a konfidencia- és az előrejelzési intervallumokat. 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 [50].

Shchurov és szerzőtársai (2021) áttekintik és összehasonlítják a különféle típusú akkumulátorokat, beleértve az akkor legmodernebb típust – a lítium-ion akkumulátorokat is. 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, valamint magas költségigényük miatt fontos tudományos és műszaki probléma, melynek a megoldására vonatkozó kutatások főbb megközelítéseit és módszereit tárgyalják, és ennek keretében mindenekelőtt a leromlás okait részletesen elemzik, valamint a lítium-ion akkumulátorokban a töltés, a kisütés, a pihenés és a nehéz üzemi körülmények közötti folyamatokat azonosítják 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 akkumulátormenedzsment-rendszerekre (BMS), amelyek figyelembe veszik és kompenzálják az említett tényezők hatásait. A szerzők elemezték az elektromos közlekedés különböző működési ciklusait is, ideértve a nehéz, megerőltető és extrém üzemmódokat (amikor az akkumulátorok kisülése és kisütése meghaladja a névleges értéket), valamint ezek hatását a lítium-ion akkumulátorok leromlására [51].

Zhang és szerzőtársai (2021) egy akkumulátoros elektromos autóbusz szolgáltatási és töltési stratégiáját határozzák meg a teljes üzemeltetési költség minimalizálása érdekében, ahol figyelembe veszik az akkumulátor leromlásával és a nemlineáris 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-élettartam jelentős meghosszabbodásának következménye [52].

O’Kane és szerzőtársai (2022) az első olyan 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 cella esetében már öt különböző útvonalat találtak, amelyek az élettartam végéhez vezethetnek, attól függően, hogyan használják a cellát. Az ilyen információk lehetővé tennék a terméktervező számára, hogy meghosszabbítsa az élettartamot vagy előre jelezze azt a használati minta alapján. A degradációs modellek paraméterezése azonban továbbra is nagy kihívást jelent, és a nemzetközi akkumulátorközösség figyelmét igényli [53].

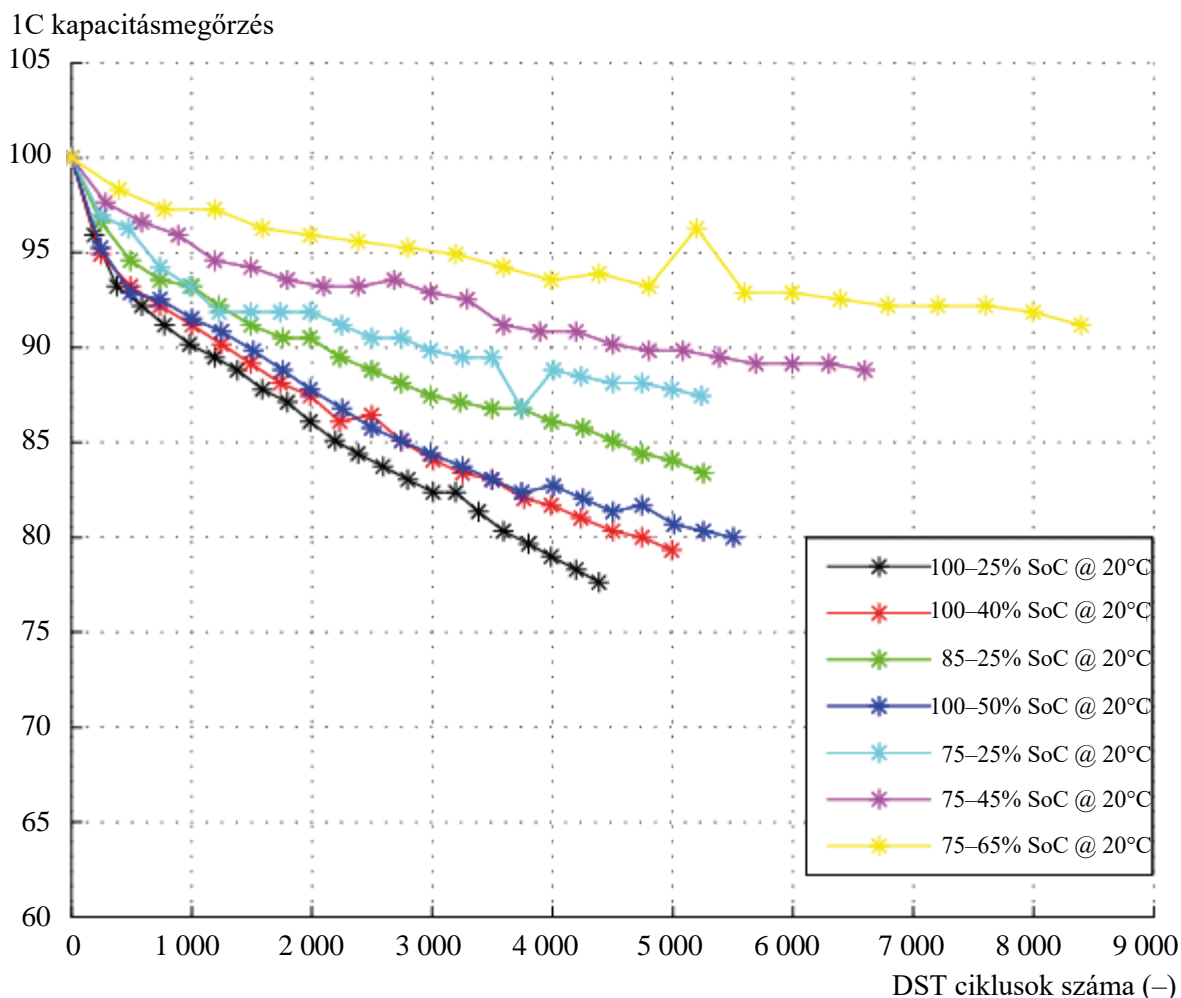
De La Vega és szerzőtársai (2023) a lítium-ion akkumulátorok kapacitáscsökkenésének és egészségi állapotának (SOH) becslésére új módszert javasoltak és fejlesztettek ki. Ezt az állapotindikátort azért tartják előnyösnek, mert nem igényli a teljes töltési-kisütési ciklusból származó adatok beszerzését, mivel egy szűk SOC-intervallumon belül számíthatók ki. Ennek következtében 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 a tanulmányukban ismertetett eredmények is mutatják. A javasolt megközelítés megfelelő jelfeldolgozási technikák alkalmazását igényli, a diszkrét wavelet-szűréstől a lineáris illesztésen és az autoregresszív integrált mozgóátlag algoritmusokon alapuló predikációs módszerekig [54].

3.4.5. A lítium-ion akkumulátorok degradációjának mérésével kapcsolatos nemzetközi tapasztalatok

A 17. ábra a dinamikus stresszteszteket (DST) szemlélteti, amely különféle töltési és kisütési intervallumokon keresztül mutatja a kapacitásvesztést a Li-ion-akkumulátorban.

17. ábra: *Optimális akkumulátorfelhasználás a kapacitás megőrzésével*



Forrás: Xu (2016) [47].

A legnagyobb kapacitásvesztés akkor fordul elő, ha egy teljesen feltöltött Li-ion-akkumulátort 25%-ig (fekete) merítenek. A 85 és 25% közötti (zöld) hosszabb élettartamot biztosít, mint a 100 és az 50%-os (sötétkék) töltés. Akkor legkisebb a kapacitásvesztés, ha a Li-ion-akkumulátort 75%-ig töltik és 65%-ig merítik. Ez az üzemeltetési mód azonban különösen megnehezíti a valós üzemeltetési gyakorlatban kialakított elektromos autóbusz fordák alkalmazását.

A Li-ion töltése és kisütése csak részben hosszabbítja meg az akkumulátor élettartamát, de csökkenti a kihasználtságot. A következő töltési és kisütési értékek segítségével az üzemeltetők számára meghatározható az optimális akkumulátorhasználat:

- 75–65% SoC, a leghosszabb ciklusidővel rendelkeznek, 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 a legkevesebb ciklusszám érhető el.

Ezek alapján az operátor el tudja dönteni saját maga számára azt, hogy inkább egy kíméletesebb akkumulátorhasználatot preferál, mellyel a ciklusszám, s így az élettartam növelhető, vagy a teljes feltöltés-kisütést támogatja, amellyel javítható az elektromos autók napi üzemideje, de jelentősen romlik az akkumulátor élettartama. Ezen döntések jelentősen befolyásolják az akkumulátorok második élettartamát, amellyel a következő fejezetben bővebben foglalkozom.

3.4.6. Az akkumulátorok második élete, a visszaautas logisztika szerepe

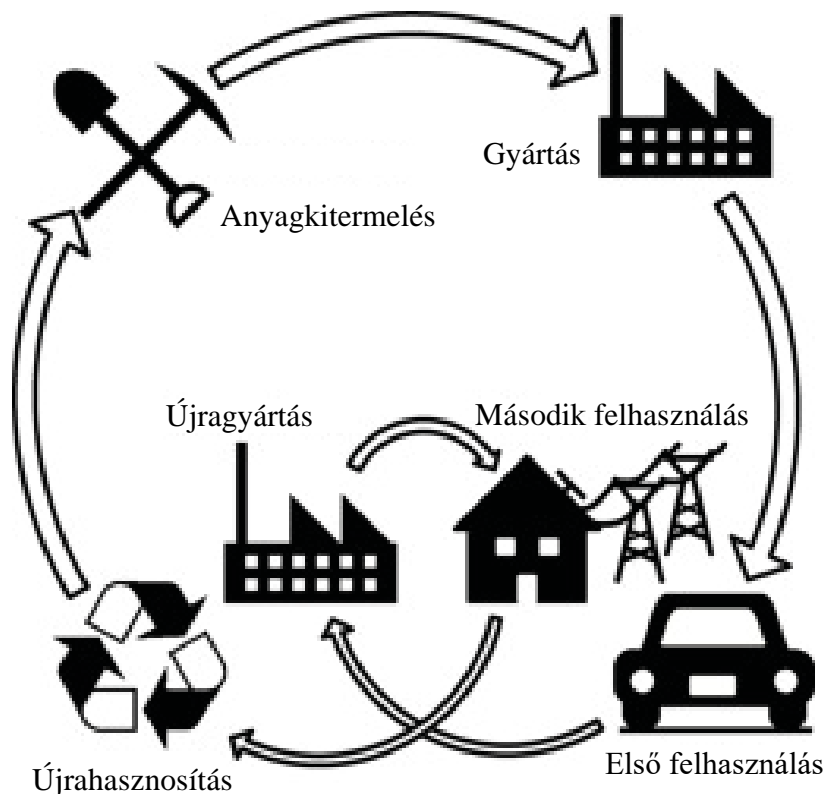
Heymans és szerzőtársai (2014) rámutattak, hogy a Li-ion EV akkumulátorok energiatároló rendszerekben (ESS) helyhez kötött környezetben történő újrafelhasználása ígéretes technológia a villamosenergia-kereslet és -kínálat hatékonyabb támogatására. Tanulmányukban a lakossági energiaprofil és a szabályozott 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 azáltal járulhat hozzá az intelligens hálózat (smart grid) megvalósításához, 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 ÜHG-kibocsátást [55].

Xu és szerzőtársai (2016) úgy minősítették az újratölthető lítiumion-akkumulátorokat – hivatkozva azok nagy energia- és teljesítménysűrűségére, alacsony kisütési sebességére és csökkenő költségére –, hogy ezek miatt ígéretes megoldások lehetnek a hálózatszintű tárolórendszerek kiépítésében. Az energiatárolás tervezésének és üzemeltetésének létfontosságú szempontja az akkumulátorcellák öregedési költségének pontos modellezése, különösen szabálytalan ciklusú műveletek esetén [47].

Casals és szerzőtársai (2019) az elektromos járművek nyolc–tíz év garanciával rendelkező lítium-ion akkumulátorai ezen időszakot követően már nem alkalmasak vontatási funkció ellátására, ugyanakkor még rendelkeznek az eredeti kapacitásuk mintegy 80%-ával. A 18. ábra az akkumulátorok újrahaznosításának körkörös modelljét mutatja be az első élettartamtól a másodikig. Ebből az is megállapítható, 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

életciklusának végén ne kelljen egy második életciklus 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.

18. ábra: Az akkumulátorok újrahaznosításának körkörös modellje



Forrás: Casals (2019) [56].

A szerzők három különböző stacionárius alkalmazásban elemzik a második élettartamú akkumulátorok (second life batteries) hátralévő hasznos élettartamát, amelyek a következők:

- az elektromos járművek gyorsítottésének támogatása,
- saját fogyasztás,
- a hálózatszabályozás (grid).

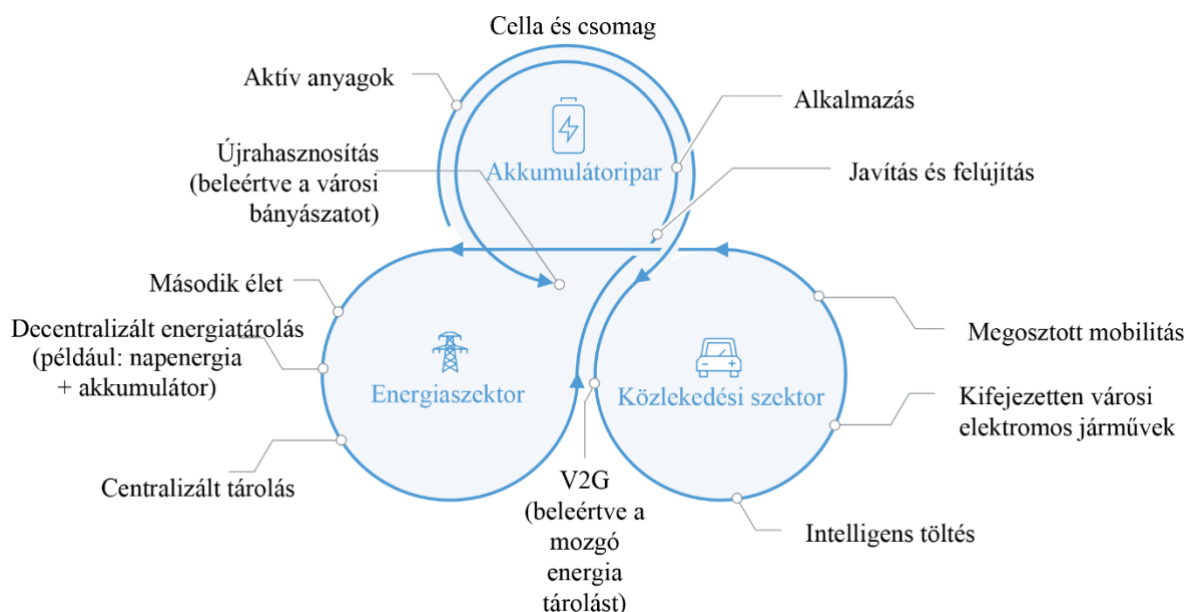
Ehhez egy egyenértékű elektromosakkumulátor-öregedési modellt alkalmaznak, amely szimulálja az akkumulátor kapacitásának csökkenését a használat során. A modell számos öregedési mechanizmust tartalmaz, mint például a naptári öregedés és a kisülési mélység (DOD), a hőmérséklet és a feszültség hatása. Az eredmények azt mutatják, hogy a második élettartamú akkumulátor élettartama egyértelműen a használatától függ. Az elektromos járművek gyorsítottését 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 energiatárolási alkalmazások a közeljövőben aligha járnak környezetvédelmi előnyökkel, azonban a megújuló energiaforrásokat használó

alkalmazásokat, például a saját fogyasztásra történő alkalmazást már sokkal megfelelőbbnek ítéli [56].

Isernia és szerzőtársai (2019) szerint az elektromos és elektronikus berendezések hulladékainak (WEEE)³ fordított ellátási láncban történő kezelése egyre nagyobb figyelmet kap. A tanulmány azt mutatja be, hogy „*az Olaszországban kialakított rendszerben a gyűjtőközpontok (CC) kulcsszerepet játszanak a fordított logisztikai folyamatban*” [57].

World Economic Forum [WEF] (2019) a fenntartható akkumulátor-értéklánc 2030-ig tartó időszakra vonatkozó jövőképeről a Global Battery Alliance szervezettel együtt készített jelentésében a körkörös akkumulátor-értékláncban a közlekedési és az energiaszektor összekapcsolását tekintették célszerűnek. A 19. ábra szemlélteti az energetikai szektor, a közlekedési szektor és az akkumulátoripar között kialakítható kapcsolódási pontokat [58].

19. ábra: Fenntartható akkumulátor-értéklánc



Forrás: WEF (2017) [58].

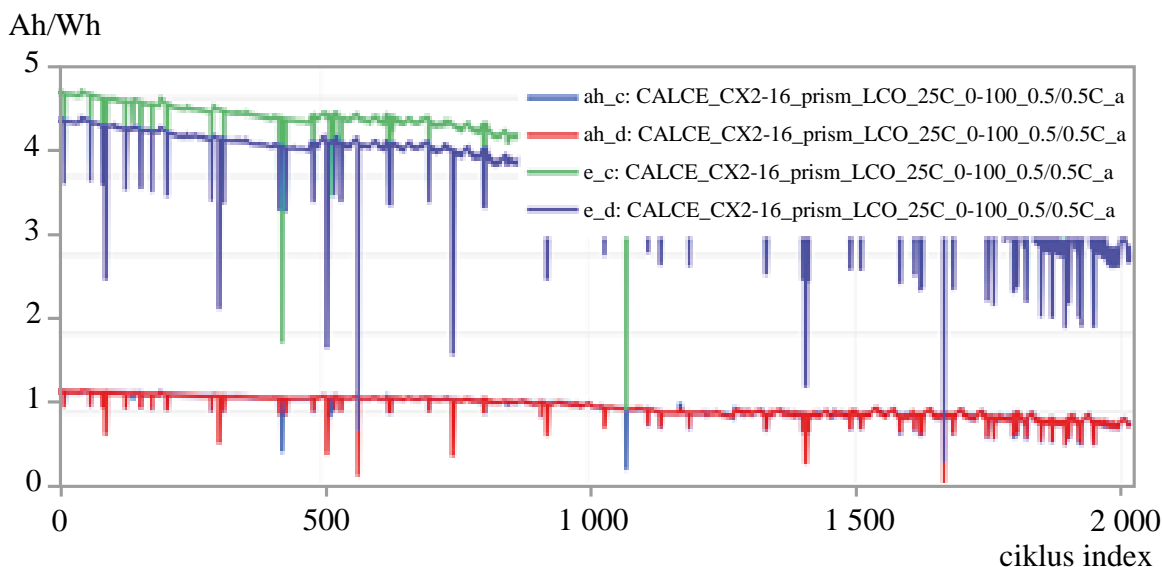
Bergh (2020) szerint a lítium-ion akkumulátorok ugyan kulcsfontosságúak a fenntartható társadalom számára fontos megújuló energiaforrások használata és a közlekedés elektrifikálása szempontjából, „*ám a környezetre gyakorolt egyéb hatásaik miatt, valamint gazdasági és politikai okokból hatékonyan szükséges az újrahasznosításuk*” [59].

Preger és szerzőtársai (2020) megállapították, hogy a Li-ion-akkumulátorokkal ellátott energiátároló rendszereket világszerte egyre gyakrabban alkalmazzák a robusztus és rugalmas hálózatok fenntartása, valamint a megújuló energiaforrások integrálásának elősegítése érdekében. Mindazonáltal a korlátozottan rendelkezésre álló, nyilvánosan hozzáférhető adatok miatt a cellák megfelelő kiválasztása a különböző alkalmazásokhoz nehézségbe ütközik, ugyanis hiányoztak olyan elemzések, amelyek azonos működési feltételek mellett összehasonlítják a leggyakrabban használt lítium-ion vegyi anyagokat. A tanulmány részletesen bemutatja több, a kereskedelemben megvásárolható

³ Waste from Electrical and Electronic Equipment.

akkumulátorcella (LiFePO₄ [LFP], LiNixCoyAl_{1-x-y}O₂ [NCA] és LiNixMnyCo_{1-x-y}O₂ [NMC]) többéves ciklusos vizsgálatát a kisülési sebesség, a kisülés mélysége (DOD) és a környezeti hőmérséklet függvényében. A szerzők összehasonlították a kapacitást és a kisülési energia megtartását, valamint a körforgásos ciklus hatásfokát. „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 vált⁴, amely egy nemrégiben kifejlesztett adattár az akkumulátoradatok megjelenítésére, összehasonlítására a jövőbeni kísérleti és modellezési erőfeszítések megkönnyítése céljából. Az 20. ábra egy cellavizsgálat eredményeit jeleníti meg [60].

20. ábra: Egy nyilvános hozzáférésű ciklus kiértékelés vizualizált bemutatása



Forrás: batteryarchive.org [60].

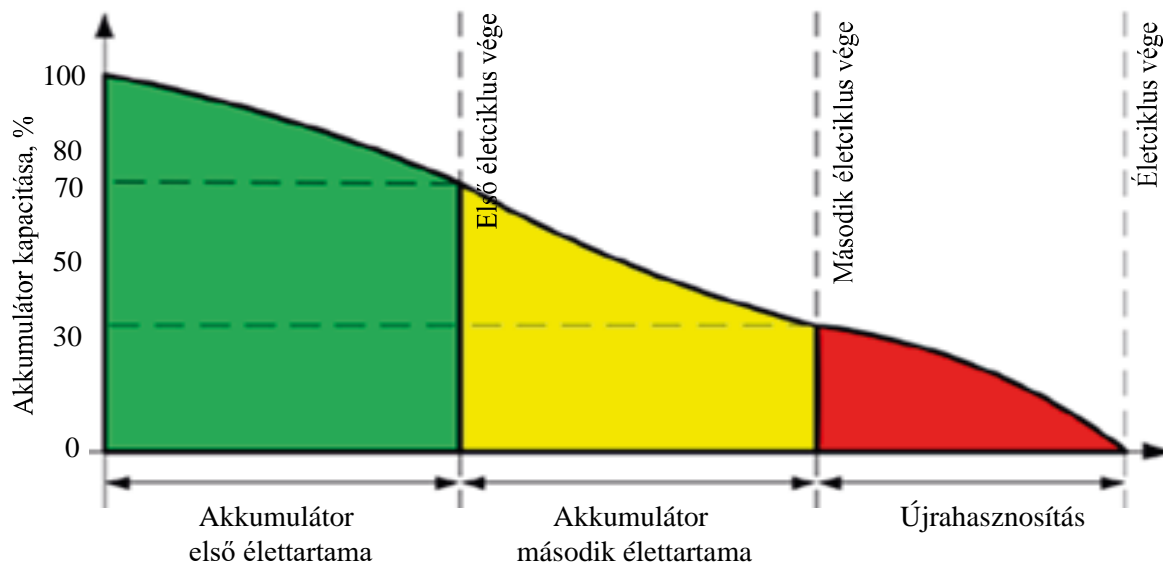
Illa Font és szerzőtársai (2023) az energiatároló rendszer technológiai fejlődése jelenleg ösztönzi azokat a fejlesztéseket, amelyek lehetővé teszik a elektromos járművekben használt vontató akkumulátorok újrafelhasználását vagy újrahasznosítását. Ennek az eljárásnak a hátránya azonban a használt elemek kiselejtezése. A tanulmány röviden áttekinti az elektromos járművek akkumulátorainak második élettartamát lehetővé tevő technikákat, bemutatja a terület jelenlegi helyzetét, az újrahasználati folyamat lépéseit, valamint kitekint a fejlesztési irányokra és perspektívára is [61].

Zhau és szerzőtársai (2023) megállapítják, hogy a lítium-ion akkumulátorok töltöttségi és egészségi állapotának pontos becslése, valamint a hátralévő hasznos élettartam előrejelzése fontos eleme az akkumulátor-élettartam meghosszabbításának és az akkumulátor-rendszer megbízhatóságának szempontjából. Tanulmányukban először

⁴ batteryarchive.org.

bemutatják az SOC, az SOH definícióját és a meglévő becslési módszereket. Ezt követően megfogalmazzák a RUL definícióját, majd osztályozzák, összehasonlítják az alkalmazott módszereket. Végül összefoglalják a lítium-ion akkumulátor állapotbecslésének és a RUL előrejelzés kihívásait, továbbá javaslatot tesznek a jövőbeli fejlesztés irányára. A 21. ábra az akkumulátor kapacitásának függvényében mutatja be az életről három fázist [62].

21. ábra: Az akkumulátorok életről a kapacitás függvényében



Forrás: Zhou és szerzőtársai (2023) [62].

A 21. ábra ismertetését azért tartom fontosnak, mert az ábrán található adatok alapján kiszámítható az akkumulátor degradációja, élettartama, amely segítségével a későbbiekben meghatározható az akkumulátor energiaforrásként, vagy – bizonyos degradáció után – energiátárolóként történő használata. Ezen értékek a továbbiakban különösen fontosak, hiszen a degradációs görbe meredeksége jelentősen befolyásolja az akkumulátorok másodlagos felhasználásának lehetőségét.

3.4.7. A visszautas logisztika szerepe elektromos járművek akkumulátorainak második életrőlében

Az innovatív üzemeltetési modellben (4. fejezet) integráns részt képviselő akkumulátor-visszautas logisztikai folyamat támaszkodik az akkumulátormenedzsmenttel kapcsolatos eredményekre és tanulságokra (megelőző és jelen fejezet), különösen hasznosnak találtam a következőkben ismertetett kutatások megállapításait.

A visszautas logisztika fogalomrendszerét illetően Kohut (2005) [63] tanulmánya alapján határoztam meg, míg a Miskolci Egyetemen a visszautas logisztikai rendszer ellátási lánc energetikai optimalizálásának szerepével kapcsolatosan pedig Akkan (2022) [64] munkáját vettem alapul.

Yükseltürk (2021) [65] az elhasználdott elektromosjármű-akkumulátorokat visszagyűjtő központjának kialakítását a flottaméret-előrejelzés alapján vizsgálta, Azadnia (2021) [66] az úgynevezett TISMA-MICMAC megközelítés módszerével a visszautas logisztika

alkalmazásának akadályait elemezte. *Hao* (2021) [67] elektromos járművek akkumulátorainak visszautas logisztikai hálózatterve a kockázatokra fókuszált. *Gonzales-Galiences* (2022) [68] egy kanadai esettanulmányban a lítium-ion akkumulátorok fordított logisztikai folyamatának modellezését és annak alkalmazását mutatta be. *Zhao* (2022) [69] kutatása összekapcsolta a logisztikai folyamatot az anyagellátástól az akkumulátormenedzsmentig bezárólag. Ugyanebben a témakörben *Barman* (2023) [70] az ellátási lánc szempontjából kritikus nyersanyagokat tekintette át. Kiemelve az aggodalomra okot adó területeket, beleértve az erőforrás-tartalékokat, a kínálatot, a keresletet, a földrajzi eloszlást, az akkumulátorok újrafelhasználását és az újrahasznosító iparágakat. *Harper* (2023) [71] tanulmánya megerősíti a fenntartható körforgásos gazdaság jelentőségét a jövő akkumulátortechnológiai fejlesztéseinél. Több részterület elemzésével átfogóan jellemzi az újrahasznosítás jelenlegi állását és ezen technológiák várható jövőbeni fejlődését. *Tinnes* (2024) [72] a logisztika dekarbonizációjával foglalkozik, ami abból a szempontból is lényeges, hogy a visszautas logisztika szállítási feladatait is egyre nagyobb mértékben akkumulátoros elektromos szállítóeszközök látják el.

A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja azt, hogy az autóbusszflották elektrifikálási és dekarbonizációs folyamatában gazdasági, valamint fenntarthatósági szempontból is kiemelt szerepet játszik az elektromos autóbusszok vontató akkumulátorait érintő folyamatok menedzselése, továbbá a modellalkotás során ezeket egy komplex modell integráns részének kell tekinteni. A szakirodalmi ismertetésekből az is megállapítható, hogy azokból hiányzik a különböző logisztikai folyamatok összekapcsolása és az egy egységes komplex rendszer megalkotása. Az ismertetett szerzők külön vizsgálják az akkumulátorok másodlagos felhasználásának lehetőségeit, a fordaszerkezetet, a vegyes flottát, a töltőinfrastruktúra kialakítását. Disszertációmban egy olyan innovatív modell megalkotására teszek kísérletet, melynek segítségével a szigetszerűen működő entitások összekapcsolhatók és egy komplex logisztikai modellbe illeszthetők be, biztosítva ezáltal a környezetvédelmi fenntarthatóság mellett a gazdasági fenntarthatóságot is.

3.5. A teljes tulajdonlási költség szerepe

A 2020-as évek előtt viszonylag kevés információ és adat állt rendelkezésre az elektromos járművek (EV), és főleg az elektromos autóbusszok (BEB) élelciklusáról és teljes tulajdonlási költségéről (TCO). Ebben az időszakban elsősorban az elektromos személygépkocsikról és haszongépjárművekről lelhetők fel szakirodalmi források.

Offer és szerzőtársai (2010) több járműplatformon (akkumulátoros elektromos járművek [BEV], FCHEV-üzemanyagcellás hibrid elektromos járművek, üzemanyagcellás gépjárművek [FCV], belső égésű motorok [ICE]) végzett átfogó érzékenységi elemzésükben arra a következtetésre jutnak, hogy 2030-ra az FCEV-k élelciklusköltség-paritást érhetnek el a hagyományos benzinüzemű járművekkel. Minden járműplatform jelentős költségérzékenységet mutat a hajtáslánc tökeköltségeivel 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 életciklusköltségei nagyon hasonlóak, és a vezetési szokásoktól függően az egyik előnyt kínálhat a másikkal szemben. A tanulmány legfontosabb következtetése az, hogy az FCEV-k jövőbeli fejlesztésének legjobb módja az FCHEV [73].

Feng és szerzőtársai (2013) az Egyesült Államok korabeli piaci értékeit alapul véve úgy számoltak, hogy az elektromos haszongépjárművek (ECV) kilométerenkénti energiaköltségei csaknem négyszer olcsóbbak a hagyományos dízel-teherautókénál. 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 élettartamában és hosszú távú költségeiben. Ezenkívül – újratöltés nélkül – korlátozottak a naponta megtett kilométerek is. Ezek a gazdasági és technológiai kompromisszumok motiválták az ismertetett kutatást. A flottaoptimalizálási keretrendszer, a forgatókönyvek széles skálája és az amerikai piaci adatok felhasználásával a kutatás rávilágított azokra a kulcsfontosságú gazdasági és technológiai fedezeti értékekre, amelyeknél az ECV-k versenyképessé válnak a hagyományos dízeltársaikkal szemben. Az eredmények egyértelműen azt mutatták, hogy csak magas kihasználtság mellett (évenkénti 16 000 kilométer/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 járművekkel évente több mint 12 000 mérföldet tesznek meg [74].

Lajunen (2014) már foglalkozott a hibrid és elektromos városi autóbuszok energiafogyasztásának kérdéskörével, költség-haszon elemzésével, majd *Lajunen* (2018) különböző töltési módszerek alapján elemezte az elektromos autóbuszok élettartamköltségeit [75].

Nurhadi és szerzőtársai (2014) az elektromos autóbuszokkal végzett közösségi közlekedési rendszer teljes tulajdonlási költségének (TCO) érzékenységi vizsgálatát végezték el Svédország közepes méretű városai tekintetében [76].

Zhou és szerzőtársai (2016) valós üzemeltetési körülmények között vizsgálták az elektromos autóbuszok életciklusának jellemzőit, különös tekintettel az energiafogyasztásra és a szén-dioxid-kibocsátásra. Kiszámolták, hogy az elektromos busz teljes életciklusán keresztül 85–87%-kal csökkenti a fosszilisenergia-felhasználást és 19–35%-kal a CO₂-kibocsátást. A teljesen zéró emisszió elérését akadályozza, hogy egyes autóbustípusok belső fűtése beépített gázolajfűtőtestekkel van megoldva, így erre a célra fosszilis energiafelhasználás történik. A már említett lokálisan zéró emissziót kiválthatja a globálisan zéró emisszió a megújuló erőműveken előállított zöld áram lehetséges beszerzésén keresztül. Az elektromos buszokhoz szükséges üzemanyag teljesen zöld energiából is előállítható, legyen az nap- vagy szélenergia, vagy geotermikus erőmű, így a károsanyag-kibocsátás csökkentése már nem csupán lokális, hanem akár globális célkitűzés is lehet [77].

Kunith és szerzőtársai (2017) optimalizálási modellt dolgoztak ki a városi autóbushálózatban közlekedő elektromos autóbuszok töltési infrastruktúrájának költségghatékony

kialakítására. Hangsúlyozzák, hogy a töltési infrastruktúra hatékony elrendezése és az akkumulátor kapacitásának megfelelő méretezése kulcsfontosságú a teljes tulajdonlási 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 [78].

Lajunen (2018) kiemelten a töltési igény és töltési módszerek hatását vizsgálta az életciklusköltségekre, és egy speciális szimulációs eszközt fejlesztett ki az elektromos autóbuszok különböző körülmények között való üzemeltetésének átfogó értékelésére. A figyelembe vett töltési módok közé tartozik az éjszakai, a végállomási és az alkalmi töltés. A szimulációs eredményeket négy üzemi útvonalra – Finnországban és Kaliforniában már üzemben lévő buszjáratok alapján – mutatták be, melyekből megállapították, hogy az akkumulátor-rendszer nagy energiakapacitása kulcsfontosságú az éjszaka töltött autóbuszok megfelelő napi működéséhez, míg az akkumulátor mérete csekély mértékben hat a gyorsított rendszerrel töltött autóbuszok energiafogyasztására és életciklusköltségeire. Az elektromos autóbuszok életciklusköltségeit nagymértékben befolyásolják továbbá a tőkeköltségek, beleértve az autóbuszok és a töltőberendezések beszerzési költségei is. A 12 éves élettartamot figyelembe véve a végállomáson töltő elektromos autóbuszok élettartama valamivel alacsonyabb lehet, mint a dízelbuszoké, de átlagosan 7%-kal magasabbak az életciklusköltségeik. A bemutatott mérési adatok szerint az éjszakai töltésű buszok élettartama átlagosan 26, az alternatív módszerrel töltött autóbuszoké pedig 35%-kal magasabb a dízelbuszokénál [79].

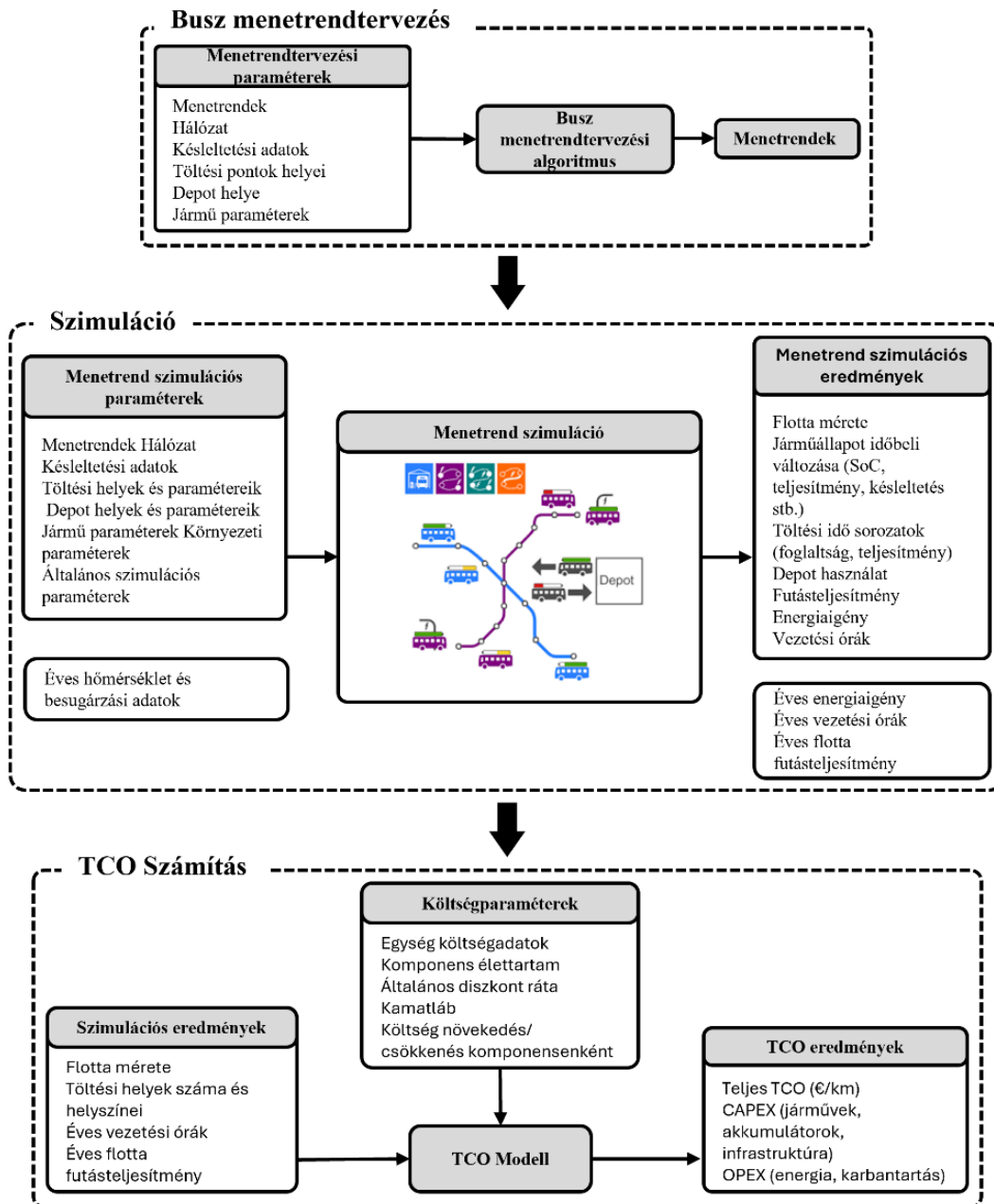
Lozanovski és szerzőtársai (2018) a közösségi közlekedésben használt üzemanyagcellás autóbuszok fenntarthatóságát vizsgálták, és ennek részeként a buszokat a dízelbuszokhoz viszonyítva értékelték mind a fenntarthatóság, mind a valós követelmények teljesítése és a működési teljesítmény tekintetében. A tanulmány arra a következtetésre jutott, hogy a H₂FC buszok megfelelnek a működési és teljesítménykritériumoknak, és akkor tekinthetők környezetbarátnak, ha „zöld” hidrogént használnak [80].

Vora és szerzőtársai (2018) megállapították, hogy az elektromos járművek üzemeltetésének megtervezése során korábban nem fordítottak elég figyelmet az akkumulátor leromlásának (degradációjának) és cseréjének a teljes tulajdonlási költségre (TCO) gyakorolt hatására, noha az akkumulátor a hajtáslánc legdrágább és legkevésbé robusztus része [81].

Jefferies és szerzőtársai (2020) egy olyan, elektromosautóbusz-üzemeltetésre vonatkozó átfogó TCO-értékelési módszert mutattak be, amely diszkrét eseményszimuláción alapul, beleértve a fordák kialakítását és a töltési infrastruktúra optimalizálását is. Az elektromos autóbuszok megtérülési mutatóinak meghatározására létrehoztak egy komplex gazdasági és műszaki ökoszisztémán alapuló modellt. Az általuk bemutatott gazdasági keretrendszer logikus és részletes, hiszen kalkulálnak az akkumulátor kapacitásával, a fordák hosszával, a töltési lehetőségekkel (legyen az telephelyi, fordulóponti vagy menet közbeni), a flotta összetételével, a töltési idővel, a működési és beruházási költségekkel, valamint az egyéb gazdasági mutatókkal. A 22. ábra egy olyan modellt mutat be, amely egyaránt alkalmas egy

elektromos autóbuszflotta és az üzemeltetéshez szükséges infrastruktúra megtervezésére, továbbá menetrendi szimulációra, valamint a teljes tulajdonlási költség kiszámítására [45].

22. ábra: Az úgynevezett eFLIPS
(Electric Fleet and Infrastructure Planning/Simulation) modell



Forrás: Jefferies (2020) [45].

Barraza és szerzőtársai (2021) az akkumulátoros elektromos buszhálózatokra dolgoztak ki különböző hajtáslánckra vonatkozó hatékony tervezési és költség-összehasonlító eljárást. A tanulmányban a modell bemeneti adatai között meghatározzák azokat a lényeges költségparamétereket, amelyek alapján szóló és csuklós autóbuszok esetében összehasonlítják a dízel- és az elektromos hajtáslánccal működő járműveket. Ezek

tartalmazzák a távolságarányos (például fajlagos hajtóanyag- és karbantartási) költségeket, munkaerőköltséget és a specifikus infrastruktúra ráfordításait [82].

Kim és szerzőtársai (2021) a kis- és középvárosok tömegközlekedési rendszeréhez használt akkumulátoros elektromos és hidrogén-üzemanyagcellás buszok összehasonlító TCO-elemzését végezték el. Ezen túlmenően egy adott város tömegközlekedési rendszerének szerkezetét is vizsgálták, felmérve az elektromos vagy hidrogénbuszok használatára legmegfelelőbb buszvonalat [83].

Polom és szerzőtársai (2021) a lengyelországi elektromos autóbuszokkal végzett közösségi közlekedési szolgáltatások fejlesztésének tapasztalatait és fejlesztési irányait értékelték. A szerzők megállapítják, hogy a tömegközlekedés átalakítása elsősorban az elektromos buszok és a töltőinfrastruktúra vásárlásának támogatásával valósult meg, figyelmen kívül hagyva az ország energiamérlegét és a különböző energiaforrások kombinálásának lehetőségét [84].

Ager-Wick Ellingsen és szerzőtársai (2022) megállapítják, hogy az akkumulátoros elektromos buszokban (BEB) számos különböző Li-ion-akkumulátortechnológiát és -méretet alkalmaznak, de a lehetséges változatok környezeti hatásairól kevés adat áll rendelkezésre. A BEB-ek környezeti teljesítményét az autóbusztenderekre jellemző 10 éves, valamint egy 20 éves meghosszabbított élettartamban is értékelték. A BEB élettartamának 10-ről 20 évre való meghosszabbítása javítja mind a környezeti teljesítményt, mind a környezeti hatások potenciáljához való relatív hozzájárulást a különböző BEB-alternatívák esetében [85].

Abdelaty és szerzőtársai (2023) az akkumulátoros elektromosbusz-közlekedési hálózat robusztus kialakításának lehetőségeit vizsgálták a töltési infrastruktúra diszruptív fejlődése függvényében, hálózatelemzési elmélet alkalmazásával. A szokásos BEB infrastruktúra-optimalizálási modellekhez képest, amelyek a rendszer teljes költségének, közüzemi hatásainak és az alkatrészek méretének minimalizálását tűzik ki célul, tanulmányukban arra a kérdésre keresnek választ, hogy olyan rendkívüli esemény esetében, mint egy áramkimaradás vagy berendezésmeghibásodás miként tartható fent a közlekedési rendszer működőképessége, és ezt a töltési folyamat mely paraméterei befolyásolhatják jelentősen [86].

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

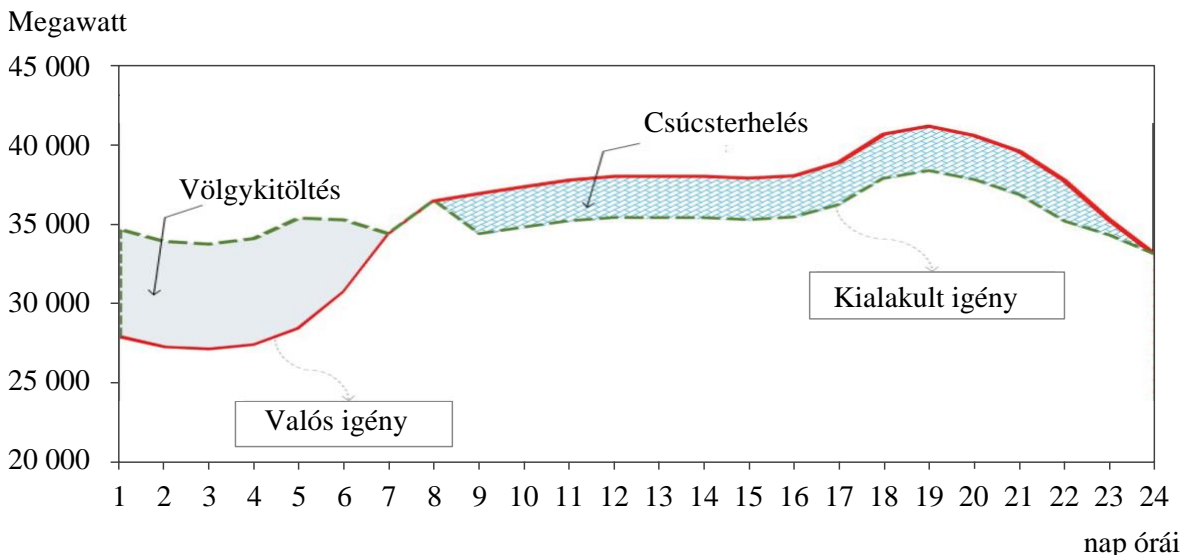
3.6. Az elektrifikáció és dekarbonizáció energetikai összefüggései

A közlekedés és logisztikai ágazat járműveinek elektrifikálása nagymértékben hozzájárul a lokális és globális dekarbonizációs célok megvalósításához, azonban nem hagyhatók figyelmen kívül a hajtóanyagok előállításával kapcsolatos energiakapacitási és

energiabiztonsági kérdések, hiszen a fosszilis energiaforrások logisztikai útjai egyre kiszámíthatatlanabbak, a megújuló energiaforrások infrastruktúrájának kiépülése pedig a szükségeshez képest lassabb ütemű. Meglátásom szerint új megközelítési módokra van tehát szükség, olyan ökoszisztémák kiépítésére, amelyekben a rendszerek együttműködésre, valamint fenntartható, biztonságos és költséghatékony működésre képesek. Ebben a fejezetben ezen szempontok érvényesülését vizsgáltam a publikációk tekintetében.

Turner és szerzőtársa (2015) megállapították, 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 járműhálózattal (V2G) való kapcsolattal. A kapcsolódó technológiák közvetlenül és közvetve hasznat 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. Az intelligens hálózat az intelligensebb közlekedési stratégiákon keresztül közvetve lehetővé teszi a kisebb üzemanyag-fogyasztást a lakosság számára, és azt is, hogy gyorsabban és kényelmesebben éri el úti céljukat. A 23. ábra megmutatja, hogy a völgy- és a csúcsidejében milyen módon korrigál az intelligens hálózat [87].

23. ábra: A valós fogyasztási igény és a csúcsidejű fogyasztás kiegyenlítése (csúcsterhelés-völgykitöltés)



Forrás: Turner (2015) [87].

Borén (2019) az elektromos autóbuszok Svédországban egyre növekvő darabszáma 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, illetve figyelembe kell venni a szezonális ingadozásokat, valamint a gyorsulás közbeni zajt. Öt olyan svédországi városban végzett vizsgálatokat, amelyek elektromos buszokat üzemeltek be saját tömegközlekedési rendszerükben. Ezek alapján megállapította, hogy a dízel- és biogázüzemű autóbuszokhoz képest jelentős megtakarítások érhetők el a társadalmi költségekben és a teljes tulajdonlási költségben, főként a zajcsökkenés, a károsanyag-kibocsátás hiánya és a csökkent energiafelhasználás miatt [88].

Bauer és szerzőtársai (2022) tanulmánya szerint a gyorsan növekvő globális energiaigény szükségessé teszi a megújuló energiaforrások és a nukleáris energia növelését a fosszilis tüzelőanyagok helyett a karbonlábnyom csökkentése és az éghajlatváltozás kezelése érdekében. Bár a megújuló energiaforrások, mint a nap- és szélenergia környezetvédelmi szempontból előnyösebbek, de időszakos tárolást igényelnek, 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 energiaellátást szabályoznak az úgynevezett „Peak-shaving” (csúcsfogyasztás-csökkentés) és völgytöltéssel [89].

McGrath és szerzőtársai (2022) 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 elemezték a működési költségekre és a szén-dioxid-kibocsátásra gyakorolt hatásokat. Az energiafogyasztás számítását a szén-dioxid-intenzitás (gCO_2/kWh) és a nagykereskedelmi villamosenergia-költségek óránkénti szezonális átlagával kombinálták abból a célból, 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 a végéig a hatótáv akár 26%-kal is csökkenhet. Míg az átlagos működési költségek viszonylag konzisztensek a vizsgált négy régióban, az átlagos szén-dioxid-kibocsátás akár ötször magasabb lehet a helytől függően [90].

Az Európai Energiaügynökség (2023) jelentése szerint 25%-kal nőtt a 2000-es évekhez képest a közlekedés teljes ÜHG-kibocsátása az Európai Gazdasági Térségben, szemben a többi nagy károsanyag-kibocsátókéval, esetükben ugyanis csökkent ez az arány. A közlekedés a teljes károsanyag-kibocsátás 19,5%-áért felel, amelyen belül a közúti közlekedés több mint 90%-ot képvisel [91].

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, alállomások hálózata, amelyek az áramot a termeléstől a fogyasztásig mozgatják – a meglévő fogyasztási görbék alapján a tipikus keresletcsúcsokra tervezték. A tanulmány felhívja a figyelmet arra, hogy az elektromos járművek felerősíthetik ezeket a csúcsokat, és problémákat is okozhatnak. Például a rendszert hirtelen csúcsterhelés érheti hétköznap esténként, amikor az elektromos járművek tulajdonosai általában töltik

járműveiket. Ez a csúcs túlterhelheti az áramkört ekkor, és olyan alállomások vagy vezetékek korszerűsítését teheti szükségessé, ami többet kerülhet, mint a növekvő villamosenergia-értékesítésből származó bevétel. Ez mindenki számára emelheti az árakat [92].

Linder és szerzőtársai (2023) rámutattak, hogy míg az elektromos járművek tiszták, akkumulátoraik előállításában azonban rendkívül magas karbonlábnyomot hagy maga után. Az elektromos autók vontatására használt nagyméretű lítium-ion akkumulátorok előállítása képezi az elektromos járművekhez kapcsolódó kibocsátás legnagyobb forrását, ami becslésük szerint a teljes gyártási kibocsátás 40–60%-át teheti ki. Ez azt is jelenti, hogy az akkumulátorok előállítása annyi károsanyag-kibocsátást von maga után, mint az elektromos járművek gyártásához szükséges összes többi anyag előállítása [93].

A tématerületre vonatkozó szisztematikus irodalomkutatás alátámasztja, hogy az elektrifikáció, a dekarbonizáció folyamatát, 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.

4. Az innovatív üzemeltetési modell megalkotása

A közösségi közlekedésben autóbusszal végzett szolgáltatást nyújtó gazdálkodó szervezetek – felismerve az elektrifikáció és dekarbonizáció kérdésével való foglalkozás stratégiai fontosságát fenntartható működésük 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 gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi fenntarthatósága szempontjából ezért a teljes ökoszisztéma komplex, holisztikus kialakítására van szükség! Tehát nemcsak a közlekedés szervezésével kapcsolatos szempontok (például járműflotta, közlekedési infrastruktúra, fordaszerkezet stb.) érvényesülése lényeges, hanem figyelemmel kell lenni az elektromos autóbuszok optimális működési feltételeinek megteremtésére (például a töltőhálózat illesztése a fordaszerkezethez, a töltőhálózat lokációja, a töltési módok kiválasztása), a hajtóanyag-ellátás energetikailag optimalizált megoldására és az elektromos autóbuszok vontató akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdésekre is (degradáció, újrahasznosítás és második életciklus).

A tematikus irodalomkutatási fejezet alapján összefoglalva megállapítható, hogy a legtöbb gazdaságmodell-számítás szerint középtávon az elektromos buszok üzemeltetésének rentabilitása egyelőre kétséges. Kérdésként merül fel azonban, hogy valóban igaznak fogadhatók-e el a bemutatott hazai és nemzetközi számítások. Ugyanis a megalkotott, bemutatott modellek és módszertanok, a maguk logikai rendszerében kitűnők, de meglátásom szerint nem teljes körűek. A tanulmányokban bemutatott gazdasági keretrendszerek önmagukban logikusak és részletesek, hiszen kalkulálnak az akkumulátor kapacitásával, a fordák hosszával, a töltési lehetőségekkel (legyen az telephelyi, fordulóponti vagy menet közbeni), a flotta összetételével, a töltési idővel, a működési és beruházási költségekkel és az egyéb gazdasági mutatókkal. Véleményem szerint a modellek hiányossága abban rejlik, hogy a szerzők modelljüket nem egy összetett ökoszisztémában helyezték el, ahol a szigetszerűen működő rendszereket összekapcsolják, hanem egy szoliter gazdasági modellel megelégednek.

Ezért publikáltam egy jóval komplexebb modellt [P/6], amely a logisztikatudomány 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 komplexen, de reálisabban kimutathatók az elektromos buszok alkalmazási lehetőségei.

4.1. Az innovatív üzemeltetési modell megalkotásának módszertana

Az innovatív működési modell elméleti háttérét a következő struktúrában ismertetem:

- A rendszermodell logisztikai értelmezése.
- A rendszer határai, alkalmazási területe, kizárások és korlátozások kijelölése.
- A rendszer logisztikai folyamatai (áramlások) 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. Az innovatív üzemeltetési modell logisztikai értelmezése

A holisztikus üzemeltetési modell elméleti megalapozásához a gráfelméletből és a hálózatelméletből célszerű kiindulni, majd ezen elméletek alkalmazásának egy speciális módjaként a korábban össze nem kapcsolt folyamatokat és entításokat egy logisztikai hálózatban lehet összekapcsolni. Ezen elméletek használata azért fontos a disszertációban, mert a már említett szigetszerűen működő rendszereket, mint egymástól elhatárolt entításokat (például a töltőhálózat, hálózatiáram-forrás, a megújuló energiaforrások, akkumulátorok újrahasznosítása vagy a fordaszerkezet) gráf- és hálózatelméleti modellel kapcsolom össze, mellyel egy komplex ökoszisztémát alkotok meg.

A definíció szerint matematikában a gráfelmélet a gráfok tanulmányozása, melyek olyan matematikai struktúrák, amelyeket az objektumok közötti kapcsolatok modellezésére használnak. A gráf ebben az összefüggésben csúcsokból áll (más néven csomópontok vagy pontok), amelyeket élek (más néven ívek vagy vonalak) kapcsolnak össze. Megkülönböztetünk irányítatlan gráfokat, ahol az élek szimmetrikusan kapcsolnak össze két csúcsot, és irányított gráfokat, ahol az élek aszimmetrikusan kapcsolnak össze két csúcsot.

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

A gráfelmélet és hálózatelmélet összefüggéseit a logisztika tudományában is széles körben alkalmazzák. *Glistau* (2024) szerint alkalmazásorientált tudomány, amely elemzi, modellezi és számszerűsíti a humán, technológiai és szervezeti rendszerek működését térben és időben a hálózatokat képző objektumok áramlása alapján. Az áramlások lehetnek fizikai (például anyagáramlás, áruk áramlása stb.) és ezekhez kapcsolódó informatikai, pénzügyi és energetikai típusúak [94].

Az innovatív üzemeltetési modellben a körkörös hálózatot négy definiált logisztikai folyamat (logistic flow) alkotja, melyeket logisztikai entitások gráfként felfogható összekapcsolódása hoz létre (4.1.3. fejezet).

A jelen disszertációban bemutatott innovatív üzemeltetési modell a közlekedéslogisztika folyamatába illesztett közlekedési eszközcsoporthoz, az elektromos járműflotta teljes élettartamköltségének vizsgálata alapján szándékozik javítani egy vegyes flottát üzemeltető vállalkozás gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi fenntarthatóságát. Ezért a közlekedésszervezési folyamatokon túlmenően a modellbe integrálja az elektromos járművek energiaellátási és akkumulátor-visszautas logisztikai folyamatrendszerét is. Mindezt úgy, hogy érvényesül a körkörös és az Ipar 4.0 informatikai eszközeiből származó információkra épülő adatvezérelt működés.

4.1.2. Az innovatív üzemeltetési modellben kialakított logisztikai rendszer határai, alkalmazási területe

Az innovatív üzemeltetési modell a helyi, elővárosi és helyközi közszolgáltató autóbussz-közlekedési vállalkozások esetében azon szervezetekre 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, illetve 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 motorokat domináns hajtásként, nem pedig kiegészítőként használják. Ezek a technológiák elsősorban 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 az autóbusszflottákban egyre gyakrabban alkalmazott hidrogén hajtású üzemanyagcellás járművekről (FCV, H2FC) megbízható, üzemelési adatokkal alátámasztott, publikált adatok nem kellő mennyiségben 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, komplexitásuk, energiahatékonyságuk és innovatív jellegük alapján osztályoztam 1-től 5-ös szintig.

A szakirodalomban bemutatott üzemeltetési modellek (1-től 4-ig) közös jellemzője, hogy valamennyi hatással van a teljes tulajdonlási költségre, ugyanakkor – bár egyre komplexebb rendszert képeznek – az energiahatékonyság és a fenntarthatóság érdekében nem mutatnak jelentős innovatív potenciált, és nem alkalmazzák a logisztikai megközelítést, valamint a körkörös gazdasági szemléletet.

1. szintű modell: A járműflottában különböző márkájú, típusú és hajtáslánccal üzemelő autóbuszok TCO-ját hasonlították össze.

2. szintű modell: Az 1. szintű modell tapasztalatira alapozva egy vegyes flotta összetételének kialakítása céljából meghatározták az eltérő hajtásláncú járművek arányát, alapvetően az hajtóanyagköltségek és a fordaszerkezet, valamint a 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.

A disszertációm 4. fejezetében bemutatott innovatív üzemeltetési modell egy új szintet képvisel az eddigiekhez képest.

1. 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 entitásiba történő beillesztésre. A téziseket a 7. fejezetben ismertetem.

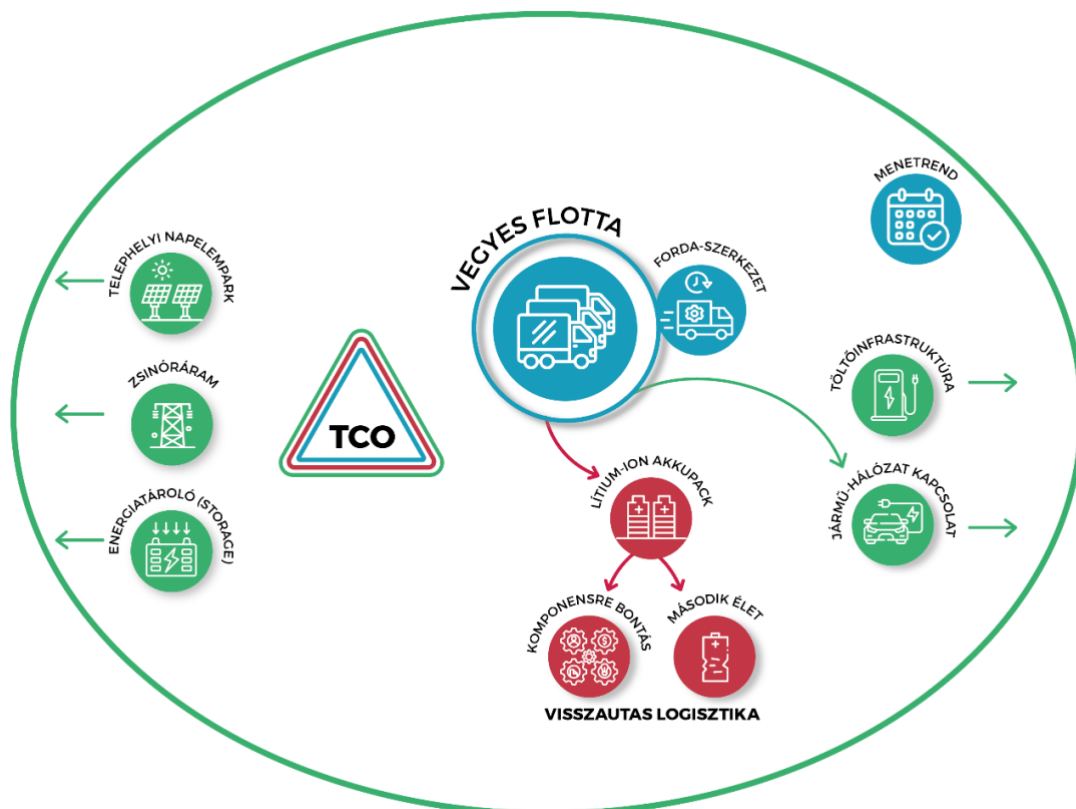
Az 5. szintű modell szerinti logisztikai folyamatokat a következő fejezetekben mutatom be. A 4.1.3 fejezetben ismertetem azt a három körforgásos kapcsolatban álló logisztikai folyamatot, amelyek részletesebb kifejtése a 4. fejezet későbbi alfejezeteiben megtalálható. Az áttekintő ábrákon használt színek 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. Az innovatív üzemeltetési modell logisztikai folyamatai és entitásai

A 24. ábrán bemutatott rendszer három logisztikai folyamatot (logistic flows) kapcsol össze abból a célból, hogy az elektromos autóbuszok (BEB) vegyes flottába történő beillesztése a TCO szempontjából is igazolható legyen. Ezek a folyamatok, amelyeket az entítások szintjén részletesebben is bemutatok, a következők:

- A vegyes autóbuszflottával kiszolgált közlekedési rendszer folyamatai és entitásai (kék színnel jelölve).
- Az elektromos autóbuszok ökoszisztémának tekintett energetikai ellátási rendszere (zöld színnel jelölve).
- Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak visszautas logisztikai rendszere (piros színnel jelölve).

24. ábra: A három körforgásos logisztikai folyamat logikai ábrája



Forrás: saját szerkesztés [P/6].

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

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

Az elektromos járművek (EVs) csoportjából az elektromos autóbuszok, a magyar szakmai nyelvben sokszor elektromos buszoknak nevezett személyszállító járművek integrációja kihívást jelentett az addig dízel- és gázüzemanyaggal 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 szolgáltatási szint (SLA).
- A vegyes flottával kiszolgált menetrend.
- A menetrend betartásához szükséges fordaszerkezet.

Az elektromos autóbuszok esetében a hatótávolság, a fajlagos energiafogyasztás és a teljes élettartam tartoznak azon jellemzők közé, amelyek a környezetvédelmi előnyük mellett a vizsgálat tárgyát képezik. Az ellátásért felelős szervezettől elvárt menetrend végrehajtására alkalmas fordaszerkezet kialakításánál kulcskérdés, hogy az elektromos járművek hatótávolsága és akkumulátorainak töltési módja megfeleljen a forda biztonságos

lebonyolításának. Az elektrifikációt és dekarbonizációt folyamatként tekintve a vegyes flotta technikai összetétele is folyamatosan változik aszerint, hogy a teljes élettartamköltségek összehasonlítása alapján milyen arányban integrálhatók az elektromos autóbuszok.

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

A rendszert alkotó entitások:

- Az elektromos autóbuszok töltési rendszere

A tematikus irodalomkutatás 3.4.3 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 a forda befejezésekor, a telephelyi töltés előtt rendelkezhetnek jelentős elektromos kapacitással, melyet a villamosenergia-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 – Zsinóráram

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 villamos energia tárolása kulcsfontosságú az energetikai körforgásos folyamat szempontjából, a közlekedési szolgáltatónál helyesen kialakított akkumulátormenedzsment pedig lehetővé teszi, hogy az elektromos autóbuszok vontatásra már nem használható akkumulátorai a visszautas logisztikai rendszerbe bekerülve – megfelelő feltételek teljesülése esetén – energiátárolóként (storage) működhessenek.

- Harmadik feles energiaértékesítés

A közlekedési szolgáltató az általa megújuló energiaforrásból előállított vagy kedvező áron beszerzett villamos energiát külső partnerek, vevők számára nyújtott akkumulátortöltési szolgáltatás 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 teszi, hogy telephelyi töltést alkalmazzanak, hosszabb fordák esetében szükség lehet a forda végrehajtása során beillesztett töltésre. Az elektromos autóbusz

akkumulátorában tárolt energia az úgynevezett 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 hajtási láncban már nem alkalmas akkumulátorai is részt vállalhatnak az energetikai áramlat kialakításában [P/6].

- **Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak visszautas logisztikai rendszere**

A visszautas logisztikai rendszer entitásai a következők:

- Elektronikus-, elektromoshulladék-kezelés, komponensre bontás.
- Storage-nak tekintett hasznosítás külső felek számára (is).

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

4.1.4. Az innovatív üzemeltetési modell információs folyamatai és entitásai

A 4.1.3 fejezetben bemutatott körforgásos kapcsolatban lévő logisztikai folyamatok mellett az adatvezérelt működést és az Ipar 4.0 lehetőségeinek kihasználását lehetővé tevő informatikai folyamatot és entitásait ebben a fejezetben ismertetem. Az adatok köre, fajtája és forrása alapvetően a folyamatokban részt vevő entításokhoz kapcsolódik, illetve ezekből származik. Az információk továbbítása az Ipar 4.0 lehetőségeinek kihasználásával, az IoT eszközök alkalmazásával. Ez lehetőséget biztosít az adatközpont számára az irányítási, vezérlési funkciókhoz szükséges számítások elvégzésére, valamint az adatalapú és adatvezérelt irányítási rendszer működtetésére.

- **AZ INFORMÁCIÓS FOLYAMAT ENTITÁSA**

- **Az adatközpont-hoz csatlakozó logisztikai entítások**

A logisztikai folyamat entitásai informatikai szempontból az adatközpont-hoz kapcsolódnak, amely logisztikai entításokban keletkezett adatok feldolgozását és az adatvezérelt modell szerinti felhasználásának támogatását az adatközpont biztosítja (26. ábra). Ez a 25. ábra bővített változata, amelynek színjelölései azonosak a korábbi logikai ábráival.

25. ábra: Az adatközponthoz kapcsolódó logisztikai entitások



Forrás: saját szerkesztés [P/6].

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

A logisztikai entitásokban képződő hatalmas adatmennyiséget (Big Data) és -féleséget az 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat: Az innovatív modell szerinti rendszerben keletkező és felhasznált adatstruktúra a logisztikai folyamatok szerinti adatsomagok szerint

Logisztikai folyamatok	Adatcsomag	Entitások	Volumen	Adatok			
KÖZLEKEDÉS	KE-FO	FORDASZERKEZET					
			darabszám	fordák hossza			
				fordaútvonal			
	KE-VF	VEGYES FLOTTA					
		Járműtípusok hajtáslánc szerint					
		– BEB	darabszám	fajlagos fogyasztás típusonként, kWh/kilométer			
				akkumulátor-kapacitás, kWh			
				hatótávolság, kilométer			
		– DÍZEL	darabszám	fajlagos fogyasztás típusonként liter/100 kilométer			
		– CNG	darabszám	fajlagos fogyasztás típusonként kilogramm/100 kilométer			
KE-MR	KÖZLEKEDÉSI MENETREND		tervezett menetrendi távolság				
			menetrendi eltérések				
ENERGETIKA	EE-TI	TÖLTŐINFRASTRUKTÚRA					
		– telephelyi töltés	kapacitás-korlát		lokáció a fordaútvonalon		
		– végállomási töltés		igen/nem	lokáció a fordaútvonalon		
		– megállóhelyi töltés		igen/nem	lokáció a fordaútvonalon		
		ZSINÓRÁRAM					
		– völgyidőszaki áram		ár: forint/kWh – valós idejű adat	számított vételezés volumen		
		– csúcsidőszaki áram		ár: forint/kWh – valós idejű adat	számított vételezés volumen		
	– normál		ár: forint/kWh – valós idejű adat	számított vételezés volumen			

(A táblázat a következő oldalon folytatódik.)

(Folytatás.)

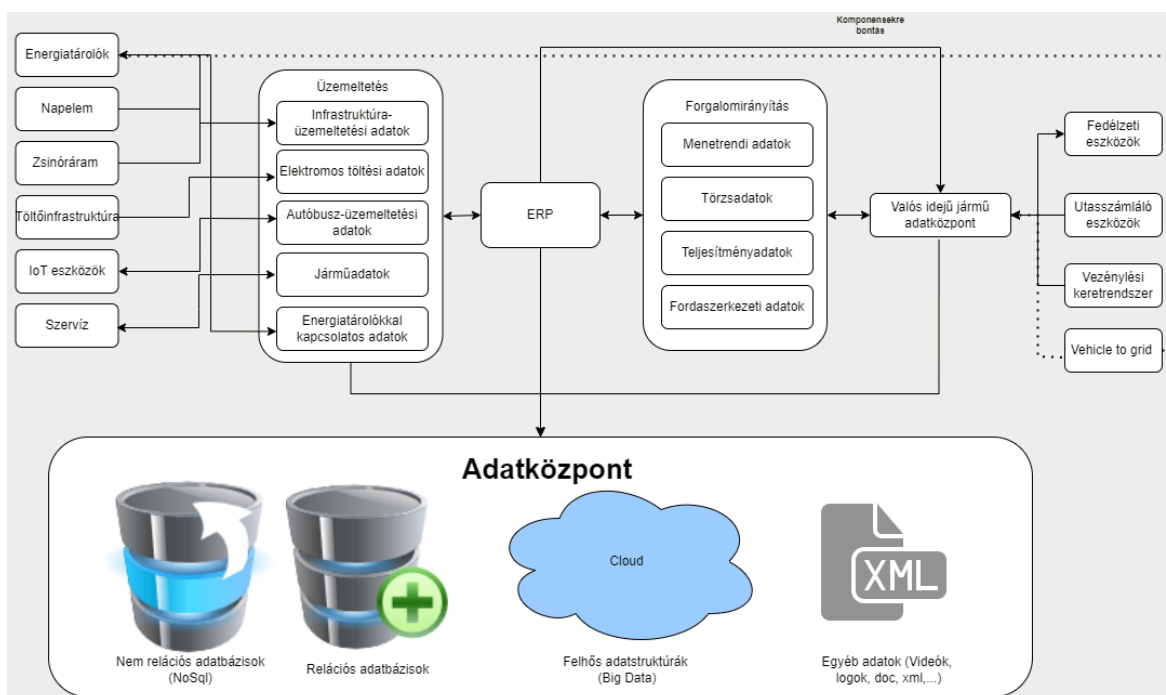
Logisztikai folyamatok	Adat-csomag	Entitások	Volumen	Adatok			
ENERGETIKA	EE-NE	TELEPHELYI NAPELEMPARK		teljes beépített kapacitás (teljesítmény), PkW			
				valós idejű teljesítmény, kW	számított energiamennyiség, kWh		
	EE-ÁV	ÁRAMVÉTELI MENETRENDEZÉS		fogyasztási jelleggörbe kWh/időszak			
				tárolási 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			
AKKUMULÁTOR	AE-BÜ	BEB ÜZEMBEN LÉVŐ	darabszáma				
			kapacitása				
				töltöttségi állapota			
				SOH	SOC		
	AE-VA	VISSZAUTAS AKKUMULÁTOROK					
		– tároló akkumulátor céljára	darab	SOH		értékesítési árbevétel, forint	
			kapacitás				
		– komponensre bontott hulladék	mennyisége	műszaki összetétele		értékesítési árbevétel, forint	

– 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 feldolgozzák azokat. A valós idejű információk alapján végzett információs outputot a forgalomirányítás, energiagazdálkodás, karbantartási szakapparátushoz továbbítják, ami lehetővé teszi az azonnali beavatkozást az adott területen. A 26. ábra bemutatja az elektromos autóbuszokhoz kapcsolódó core adatfolyamatokat.

26. ábra: Az elektromos autóbuszok core adatfolyamata



Forrás: 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:

- **Forgalomirányítás – Adatforrásai**
 - Fedélzeti IoT eszközök
 - Utasszámláló eszközök
 - Vezénylési, fordaszerkezeti, jegyértékesítési, fődíszpécseri keretrendszer
- **Forgalomirányítás – Logisztikai folyamatok**
 - Fordaszerkezet
 - Flottaösszetétel
 - Menetrend
- **Üzemeltetés – Energetikai adatforrásai**
 - Töltőinfrastruktúra
 - Zsinóráram
 - Telephelyi napelempark
 - Áramvételi menetrendezés
 - Energiatároló (Storage)
 - Vehicle to grid
- **Üzemeltetés – Akkumulátorral kapcsolatos adatforrásai**
 - BEB üzemben lévő
 - Visszautas akkumulátorok
- **Üzemeltetési-logisztikai folyamatok**
 - Infrastruktúraüzemeltetési folyamatok

- Elektromos töltési folyamatok (Energiatöltés/-felhasználás)
- Jármű üzemeltetési folyamatok
- Törzsadatkezelés
- Energetikai folyamatok (Napelemek, tárolók, zsinóráram stb.)
- Visszautas logisztikai folyamatok

Ha az elektromos buszok üzemeltetési szemszögéből vizsgáljuk a logisztikai folyamatokat, akkor három fő adatáramlási entitást különböztethetünk meg:

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

Mindhárom entitásnál meghatározott üzleti folyamatok mentén keletkeznek adatok, amelyek egymástól függetlenül és összemérhetetlenül érkeznek meg egy központi adatsilóba. Ahhoz, hogy ezek később felhasználhatók legyenek, először az adatokat konszolidálni kell, egy egységes metastruktúrát kell hozzájuk rendelni, majd egy adatközpontba kell áthelyezni, hogy a későbbi üzletiintelligencia-elemzésekhez rendelkezésre álljanak. Ez az adatközpont és metarendszer garantálja, hogy az üzleti döntéshozatal egyetlen szintjén se következhesen be információtorzulás.

– **Adatvezérelt vállalatirányítás**

A logisztikai folyamatokban keletkező meglévő adatvagyonnak és az új technológiák bevezetésével keletkező Big Data adatok (IoT, autóbusról származó real-time adatok, eseményvezérelt irányítási adatok) kialakításához egy modern, szolgáltatásorientált és kellően rugalmas adatelemzési platform bevezetése szükséges. Ezen létező logisztikai entitásokból jövő adatok kezeléséhez a következő lépések szükségesek:

- 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. (Például a CAN-vezérlőegység által továbbított fogyasztási adat tartalmazza-e a rekuperációs energiát, vagy hol mérjük az elektromos meghajtás fogyasztását.)
- Adattisztaság biztosítása és megbízható üzleti adatok előállítása. (Extrém adatok szűrése, logok elemzése mesterséges intelligenciával.)
- Statisztikai és mesterséges intelligencia alapú elemzések hatékony elvégzése.
- A kapott eredmények visszacsatolása lehetővé teszi az autóbusról optimalizálását, az autóbussz-vezetői stílusok, szokások elemzését, az energia visszanyerésére és az 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 metaadatok elérhetők, adatbiztonsági kategóriákba szervezhetők, kereshetők, szerepkör szerint maszkolva megtekinthetők.

A 27. ábra foglalja össze az adatvezérelt vállalatirányítás hierarchiáját. Az adatvezérelt vállalatirányítás az adatokra épülő döntéshozatalt helyezi a középpontba a szervezet minden szintjén. Az ábra azt a menedzsmentmódszert ismerteti, amelyben a vállalati vezetés a rendelkezésre álló adatok alapján határozza meg a stratégiát, célokat és operatív döntéseket, majd ezek az irányelveket továbbítják felfelé az operatív szervezeti szintekre.

27. ábra: Adatvezérelt vállalatirányítási rendszer logikai ábrája



Forrás: 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. **Szervezeti irányítás:** A 27. ábrán bemutatott felépítés szerint a felsővezetés határozza meg a stratégiai célokat és azokat a kulcsfontosságú mérőszámokat (KPI⁵-kat), amelyek mentén a teljes szervezet teljesítményét mérik. Az alsóbb szintek ennek megfelelően alakítják az adatgyűjtést és az adatfeldolgozást, illetve a hozzájuk tartozó tevékenységeket.

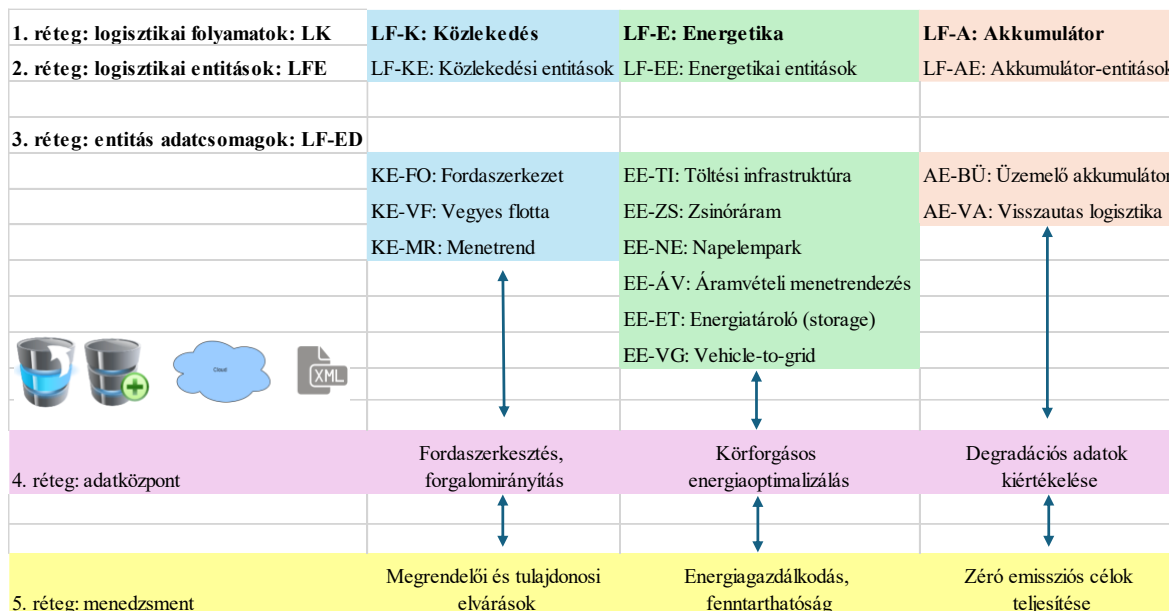
⁵ Key Performance Indicator.

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 innovatív üzemeltetési modell holisztikus ábrázolása

Azt az innovatív ökoszisztémát, amely lehetővé teszi az üzemeltetés adatvezérelt és fenntartható működtetését a 28. ábra szemlélteti. Az ábra megmutatja a 4. fejezetben ismertetett 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 bordó/barna színjelöléssel ellátott) logisztikai folyamata jelenti, amely alatt vannak a hozzájuk tartozó entítások, és a 3. rétegben az entításokban keletkező adatsomagok. A negyedik rétegben, az adatközpontban feldolgozzák a 3. táblázat szerinti adatsomagok adatait a 26. ábra szerinti core adatfolyamatban. Végül az 5. réteget jelentő menedzsmentrétegben valósul meg a 27. ábrán bemutatott adatvezérelt vállalatirányítási rendszer, amely egyaránt figyelembe veszi és teljesíti a felelős megrendelő, valamint a tulajdonos elvárásait, tekintetbe veszi az energiabiztonsági és a klímacélok teljesítését. A 28. ábrán a vállalatirányítás rétegelt verzióját ismertetem, ahol már megmutatkoznak az entítások közötti adatfolyamatokat.

28. ábra: Az autóbuszflottát üzemeltető vállalat innovatív működési modellje



Forrás: saját szerkesztés [P/6].

Az e fejezetben bemutatott adatokon alapuló gazdasági számításokat és a vállalati irányítási rendszerben való felhasználásukat a fejezet végén található Volánbusz Zrt.-re vonatkozó esettanulmányban ismertetem. Az esettanulmányban két gazdasági modellt mutatok be, amely támaszkodik az 1. tézisemben 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 az elektromos autóbuszok esetében minimum 250 kilométer/nap futásteljesítményt figyelembe véve – átlagosan a Volánbusznál az autóbuszoknak 300 kilométer/nap futásteljesítményük van –, ha az áram ára körülbelül egyharmada a dízel árának, akkor a megtérülés 20 éven belül megvalósul, így érdemes 1000 darab dízelbuszt elektromos autóbuszra cserélni.

A második modellben már napelemeket és hozzájuk tartozó tárolókat is telepítetek a telephelyeimre. A megtermelt áramot, amelyet saját felhasználásra már nem tudok 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 kijelenthetem, hogy megvalósítható olyan zöld átmenet a Volánbusz Zrt. életében, amely nem csupán környezeti, hanem gazdasági szempontok alapján is hosszú távon fenntartható. Természetesen a megtérülést mindkét esetben nagymértékben befolyásolja az áram és a dízel árának különbözete, továbbá az egy napon belüli áramár-ingadozás, de a hosszú távú előrejelzések alapján az áram és a dízel ára közötti jelentős különbség fennmarad, így a megtérülés is biztosított. A modellek részletes ismertetése, azok paraméterei és lehetséges kimenetei megtalálhatóak a disszertáció 5. fejezetében.

Ebben a fejezetben az 1. tézisem igazolásához megalkottam egy új, innovatív működési modellt, amely segítségével az autóbuszt üzemeltető vállalatok meg tudnak felelni a környezetvédelmi előírásoknak, jelentősen csökkenteni tudják a károsanyag-kibocsátásukat oly módon, hogy gazdaságilag is fenntartható legyen a működésük. Részletesen ismertettem a közlekedés-, visszautas és az energetikai logisztika adatáramlási folyamatait és az ezekre épülő döntési módszertant. Elméleti modelletem a gyakorlatban is igazoltam, amelyet a következő fejezetben részletesen ismertetek.

Bemutattam továbbá, hogy adott paraméterek és működési modell mellett gazdaságilag is fenntartható a zöld átállás, így egy vállalat életében hosszú távon biztosíthatóak a környezetvédelmi célkitűzések. A fejezethez tartozó 1. tézisemet a 7. fejezetben fejtem ki.

4.3. Az innovatív üzemeltetési modell gyakorlati alkalmazása a Volánbusz Zrt.-nél, esettanulmány

A Volánbusz elektromos buszflottájának bővítése környezetvédelmi szempontból kívánatos, hiszen még a legmodernebb dízelbusz is megtett kilométerenként 2,6 kilogramm szén-dioxidot bocsát ki, ugyanakkor az elektromos buszok magas beszerzési ára gazdasági szempontból kihívások elé állítja a vállalatot. A következőkben 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 kilométert. A 300 kilométer alatti napi futásteljesítményt a jelenlegi elektromos buszok többsége képes úgy teljesíteni, 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 szén-dioxid-kibocsátást vált ki.

Az elektromos és dízelbuszok élettartamköltségének összehasonlításakor azonos futásteljesítményt és azonos üzemeltetési körülményeket feltételezek. A kalkulációban figyelembe vettem az autóbusz-beszerzési árakat, a karbantartási költségeket, az üzemanyag-fogyasztást, az elektromos buszokhoz a töltőinfrastruktúra-kiépítési költségeit és az elektromos buszokat meghajtó akkumulátorok élettartamát. Nem vettem figyelembe a CO₂-megtakarítást.

Az elektromos buszok meghajtó (nagyfeszültségű) akkumulátorainak hasznos élettartama jelenleg tapasztalati úton még nem határozható meg, mert még az első ütemben üzembe helyezett buszokban elhelyezett akkumulátorok is üzemelnek (néhány hibás koncepcióval megépített busztípus kivételével). Az akkumulátorok teljesítménycsökkenésének mért adatai alapján elemző modellek szerint a busz üzemben elvárt paramétereit (energiasűrűség, teljesítményleadási képesség, külső hőmérséklet-változás tűrése) várhatóan 10–12 éves időszakra tudják a jelenleg működő akkumulátorok biztosítani. A maximum és minimum értékek közötti különbség nemcsak az akkumulátor típusától függ, hanem az üzemeltetés körülményeitől is (a kisütés mélysége, a feltöltés mértéke, a töltési ciklusok száma, külső hőmérséklet stb.). A legrosszabb lehetőséggel számolok, ezért az akkumulátort a működés tizedik évében újra cserélem. Tekintettel arra, hogy a tízéves akkumulátor még 75–85%-os kapacitással rendelkezik, továbbá hasznos élettartama fixen telepített tárolóban még legalább 10 év, ezért feltételezem, hogy a használt akkumulátor az új akkumulátor árának 50%-áért értékesíthető. Feltételezem továbbá, hogy a cserélt akkumulátor már életciklusa végéig kiszolgálja az elektromos buszt.

A tervezett 1000 elektromos busz maximum 25 különböző telephelyen üzemelne, telephelyenként 20–100 darab 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 energiaellátásának két különböző esetét vizsgálom. Mindkét esetben azzal számolok, hogy egy darab töltőberendezés négy busz töltését képes ellátni kellő üzembiztonsággal. Az első esetben a buszok töltése hálózatról vett energiával történik, kizárólag az éjszakai órákban. A második esetben a telephelyekre napelem és akkumulátoros energiatároló rendszer telepítésével számolok, amely zöld energiával látja el a telephely buszait, a telephely egyéb létesítményeit. A különböző telephelyeken megtermelt energiát egy Volánbusz Energiaközösségen belül a telephelyek megosztják egymással, így elősegítve a pillanatnyi teljesítményegyensúly fenntartását. A saját igényekhez képest megtermelt napenergiatöbblet egy részének értékesítésével kalkulálok. A Volánbusz Energiaközösség

számára további üzleti lehetőség aFRR⁶ szolgáltatóként is belépni az energiapiacra, de ezzel a jelenleg bemutatott modell nem foglalkozik.

Fontos hangsúlyozni, hogy az elektromos buszok energiafogyasztása jelentősen megnöveli az üzemeltető telephelyek energiaigényét. A jelenleg üzemelő 101 elektromos busz tapasztalatai alapján azokon a telephelyeken, ahol a buszok száma 10 vagy afölötti, a buszok energiafogyasztása már jelentősen meghaladja a telephely egyéb fogyasztóinak fogyasztását. Nagyobb elektromosbusz-darabszám esetén a telephely fogyasztása többszörösére növekszik, aminek ellátásához fejleszteni szükséges a hálózatot. Ez a nagymértékű fogyasztásnövekedés indokoltá teszi helyi naperőmű vagy egyéb helyi zöld energiát előállító rendszer üzembe helyezését is.

1. Az elektromos buszok üzemeltetésének gazdasági lehetőségei hálózati energia vásárlása esetén:

a. Az elektromos buszok futásteljesítményének hatása az üzemeltetési költségre

A Volánbusz elektromos buszainak átlagos futásteljesítménye 2023-ban ~150 kilométer/nap volt, ami jelentősen elmarad a hasonló fordákon üzemelő dízelbuszok 240 kilométer/nap futásteljesítményétől. Ennek oka, hogy az elektromos buszok üzembe állításukkor olyan fordákba kerültek, amelyeket biztonsággal tudtak teljesíteni az akkumulátor lemerülésének kockázata nélkül.

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.

4. táblázat: Adatkörök – a villamosenergiadíj-változás elemzése

Megnevezés	Érték
Autóbusz-darabszám	1 000 darab
Autóbusz-kihasználtsági határfok	90%
Napi futásteljesítmény	250 és 300 kilométer/nap
Üzemeltetési napok száma egy évben	300 nap
E-buszok éves futásteljesítménye	40 500 000 kilométer
E-buszok átlagos villamosenergia-fogyasztása	1,1 kWh/kilométer
Töltőberendezések száma	250 darab
Töltőberendezés és a telepítés beruházási egységára	15 000 000 forint/darab
Dízelbusz ára	80 000 000 forint
Elektromos busz ára	160 000 000 forint
E-busz/Dízelbusz üzemeltetési költségaránya (üzemanyag nélkül)	55%
Új akkumulátor egységára e-buszokba (10. évben)	30 000 000 forint/darab

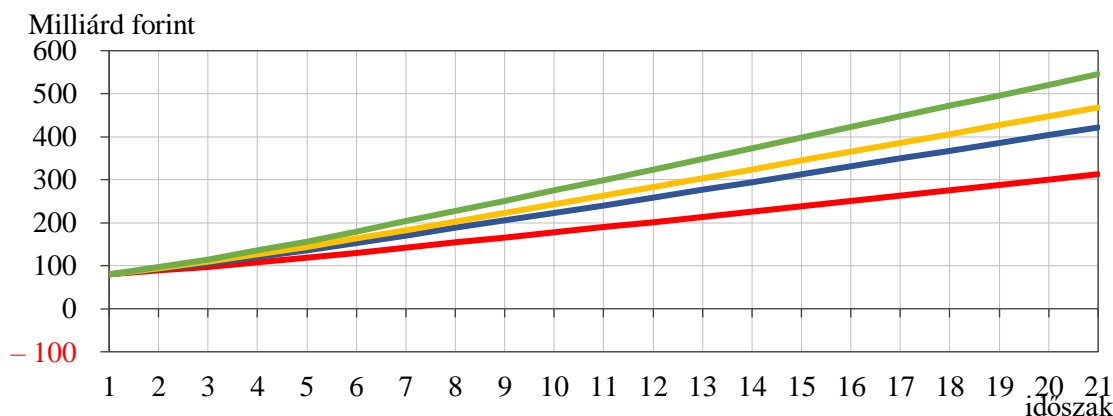
⁶ Az „automatic Frequency Restoration Reserve” (aFRR) szolgáltatás az elektromos hálózat pillanatnyi egyensúlytalanságainak (a felhasználni kívánt energia pillanatnyilag kevesebb vagy nagyobb, mint az éppen megtermelt energia) kiegyenlítését segíti. Az energiatároló a MAVIR igényei és a saját képességei szerint termelőként vagy fogyasztóként lép be a rendszerbe, és ezzel elősegíti a hálózat egyensúlyának fenntartását.

Villamosenergiadíj-egységár	Változó
Dízelüzemanyag-ár	437 forint/liter

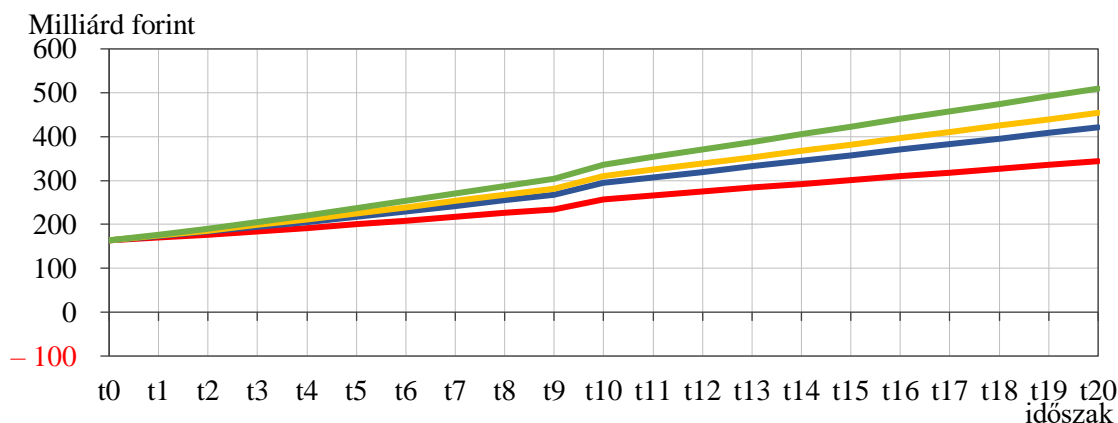
Az elemzés rámutat arra, hogy a jelenlegi futásteljesítmény mellett az elektromos buszok összköltsége a teljes élettartam alatt magasabb, mint a dízelbuszoké. (Ezért jelenleg kizárólag vissza nem térítendő támogatás igénybevételével vásárol a Volánbusz elektromos buszokat.) 220 kilométer/nap futásteljesítmény esetén az elektromos és dízelbuszok TCO-ja a 20. év végén lesz egyenlő, azaz a buszok életciklusának legvégén. A futásteljesítmény növelésével az elektromos buszok költségelőnyei nagyobb mértékben érvényesülhetnek. Az 2000-es évek üzemeltetési tapasztalatai alapján ismert, hogy a napi futásteljesítmény legtöbb busz esetén anélkül növelhető, hogy a busz akkumulátorának lemerülésétől kellene tartani, ezért javaslom a buszok futásteljesítményének lehetőség szerinti növelését.

29. ábra: Az új beszerzésű dízel- és elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében állandó dízelolaj ár (437 forint/liter) mellett, 107 forint/kWh villamosenergia-tarifával

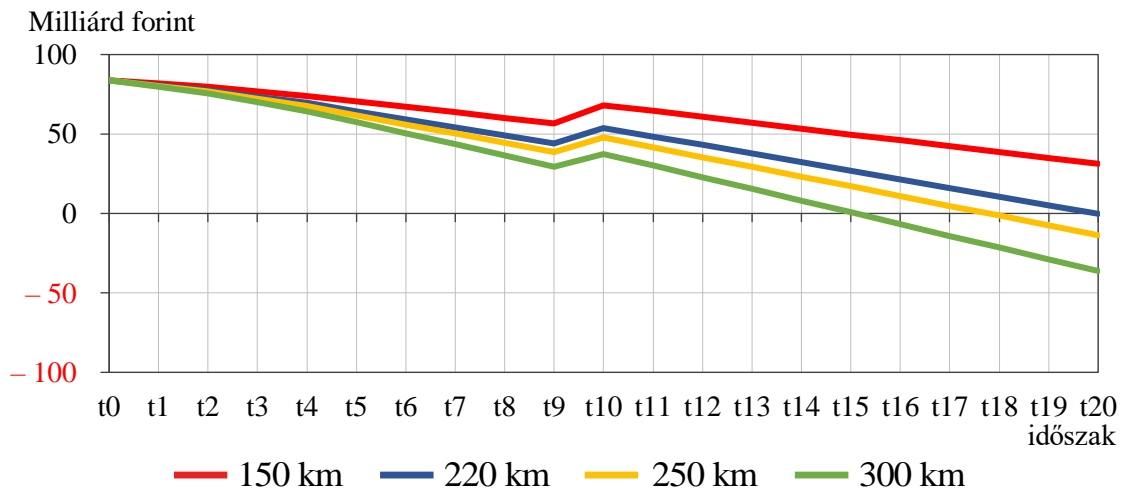
Dízelbusz



Elektromos busz



Különbség



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

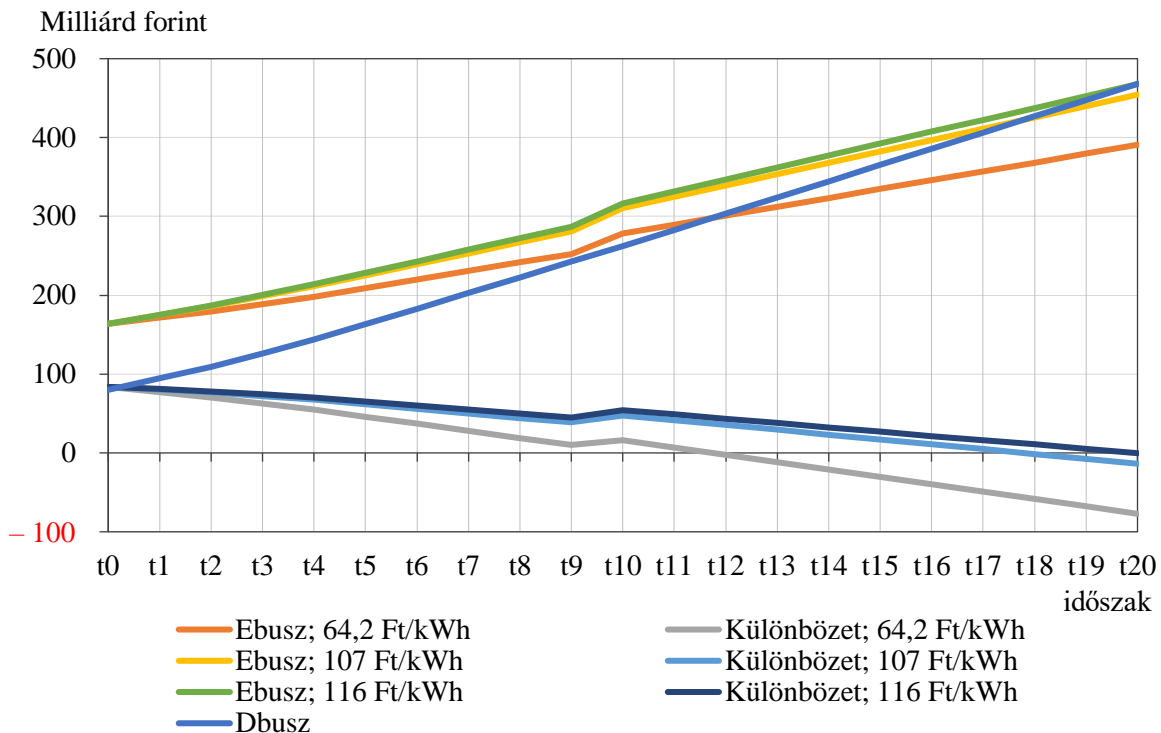
A Volánbusz villamosenergia-szolgáltatásra kötött szerződése alapján az ország területén egységes és a teljes időszakra állandó tarifával vásárolja az energiát. A több fix és forgalomfüggő tétel országos átlaga ~107 forint/kWh, ami nagyon kedvezőnek számít. A 2022-es energiaválság ugyanakkor rámutatott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

Megvizsgáltam, hogy az energiaárak változásának milyen számszerű hatása lehet az elektromos buszok élettartamköltségére. Az elemzéshez 250 kilométer/nap, illetve 300 kilométer/nap időszakra. A buszokat kizárólag éjszaka töltik, ezért megvizsgáltam egy völgyidőszaki tarifa bevezetésének hatását is.

5. táblázat: Adatkörök – a futásteljesítmény-változás elemzése

Megnevezés	Érték
Autóbusz-darabszám	1 000 darab
Autóbusz-kihasználtsági határfok	90%
Napi futásteljesítmény	Változó
Üzemeltetési napok száma egy évben	300 nap
E-buszok éves futásteljesítménye	40 500 000 kilométer
E-buszok átlagos villamosenergia-fogyasztása	1,1 kWh/kilométer
Töltőberendezések száma	250 darab
Töltőberendezés és a telepítés beruházási egységára	15 000 000 forint/darab
Dízelbusz ára	80 000 000 forint
Elektromos busz ára	160 000 000 forint
E-busz/Dízelbusz üzemeltetési költségaránya (üzemanyag nélkül)	55%
Új akkumulátor egységára e-buszokba (10. évben)	30 000 000 forint/darab
Villamosenergiadíj-egységár	107 forint/kWh
Dízelüzemanyag-ár	437 forint/liter

30. ábra: Az új beszerzésű dízel- és elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a villamosenergia-tarifa függvényében állandó dízelolaj ár (437 forint/liter) mellett, napi 250 kilométer futással

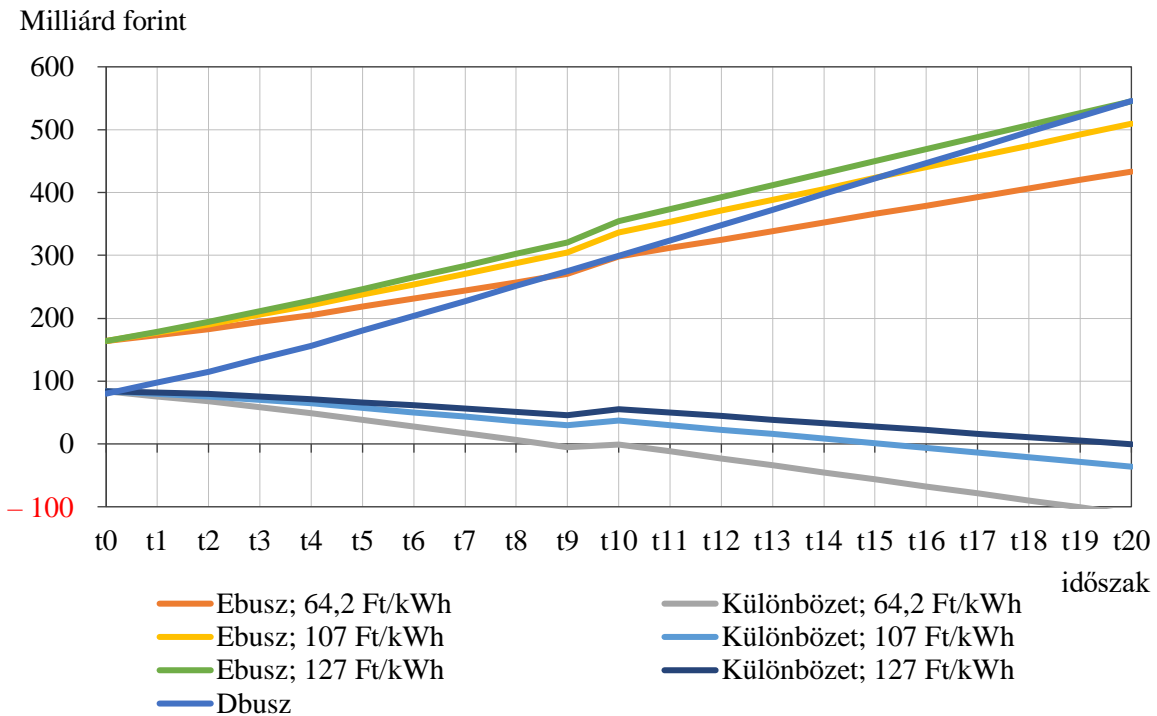


A 30. ábrán 250 kilométer/nap futásteljesítmény mellett mutatom a jelenlegi tarifa (107 forint/kWh) és egy 40%-kal csökkentett völgyidőszaki tarifa (64,2 forint/kWh), valamint a 20 éves vizsgált időszak végén azonos elektromos és dízelbusz TCO-t eredményező tarifa (116 forint/kWh) mellett a költségek alakulását. 25 kilométer/nap futásteljesítmény esetén 8,4% díjrugalmasságot tartalmaz a jelenlegi villamosenergia-tarifa, azaz még 8,4%-kal megemelt díj mellett is azonos lehet az elektromos és a dízelbusz élettartamköltsége a tervezett élettartam (20 év) végére.

A 31. ábrán 30 kilométer/nap futásteljesítmény mellett ismertetem a jelenlegi tarifa (107 forint/kWh) és egy 40%-kal csökkentett völgyidőszaki tarifa (64,2 forint/kWh), valamint a 20 éves vizsgált időszak végén azonos elektromos és dízelbusz TCO, továbbá a 20 éves vizsgált időszak végén azonos elektromos és dízelbusz TCO-t eredményező tarifa (127 forint/kWh) mellett a költségek alakulását. 300 kilométer/nap futásteljesítmény esetén 18,7% díjrugalmasságot tartalmaz a jelenlegi villamosenergia-tarifa, azaz még 18,7%-kal megemelt díj mellett is azonos lehet az elektromos és a dízelbusz élettartamköltsége a tervezett élettartam (20 év) végére.

Ábrán nem szerepel, de kiszámoltam, hogy a jelenlegi futásteljesítmény (150 kilométer/nap) mellett 71 forint/kWh villamosenergia-díj esetén lenne azonos az elektromos és dízelbuszok élettartamköltsége.

31. ábra: Az új beszerzésű dízel meghajtású és elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a villamosenergia-tarifa függvényében, állandó dízelolaj ár (437 forint/liter) mellett, napi 300 kilométer futással



A 30–31. ábrák alapján megállapítom a következőket:

- A villamos energia tarifájának változása jelentősen befolyásolja az elektromos buszok élettartamköltségét, és már minimális energiaár-változás is jelentős kockázatot jelent.
- A jelenlegi, 150 kilométer/nap átlagos futásteljesítmény mellett az elektromos buszok fenntartása magasabb költséggel jár, mint a dízelbuszoké.
- A buszok magasabb kihasználtsága (nagyobb futásteljesítmény) egyre nagyobb mértékben kiemeli az elektromos buszok üzemeltetésének a dízelbuszokhoz képest mérhető költségelőnyeit.
- Legalább 220 kilométer/nap futásteljesítmény esetén, a jelenlegi tarifával számolva, abban az esetben is gazdasági hasznot hoz elektromos buszt vásárolni dízelbusz helyett, ha nincs a vásárláshoz vissza nem térítendő támogatás.

2. A napelem- és energiatároló rendszer kiépítésének hatása az elektromos buszok üzemeltetésére

A 2000-es évektől a jelentős energiaár-emelkedés és -ingadozás, valamint az energiahordozó-hiány veszélye arra hívják fel a figyelmet, hogy az energiabiztonság és függetlenség megteremtése érdekében szükséges olyan beruházások megvalósítása, melyek csökkenthetik ezeket a kockázati elemeket és a kiszolgáltatottságot.

Az 1000 elektromos busz üzembe helyezése szükségessé teszi a töltési infrastruktúra megteremtését. Ezen felül kiemelt fontosságú, hogy a szükséges villamos energiához a lehető legalacsonyabb áron és a legnagyobb ellátási biztonsággal jussunk hozzá. Ennek lehetőségét teremtheti meg a napelemparkok által termelt és energiatároló rendszerben

eltárolt saját előállítású villamos energia, mely a saját igények kielégítése mellett az ipar és a közlekedés egyéb résztvevőinek igényét is ki tudná szolgálni, legyen az akár lakossági, akár vállalati.

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

A napelem- és energiatároló rendszerek alapvető jellemzői:

- A napelempark maximális leadható teljesítménye, melynek mértékegysége pkW (kilowatt peak), amely a napelemrendszer ideális körülmények között leadott maximális teljesítményével egyenlő.
- 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 fejezi ki.
- 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 vizsgált napelem- és energiatároló rendszer méretezésekor alapvető szempontként figyelembe vettem, hogy a teljes beruházás (elektromos busz és energiarendszer együtt) élettartamköltsége legfeljebb 20 év alatt érje el az azonos körülmények között üzemelő dízelbuszok élettartamköltségét.

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 megközelítően az átlag napsütési intenzitáshoz kell igazítani. Ugyanakkor ez azt is jelenti, hogy a napelem az év jelentős részében sokkal több energiát termel, mint amennyit a tároló képes felvenni. A megtermelt többletenergia hasznosítására a következő lehetőségek adódnak, amelyeket akár együttesen is lehet alkalmazni:

- A telephely ipari fogyasztóinak rákapsolása 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.
- A közületek (futárszolgálat, Posta, éjszakai kiszállítással foglalkozó kereskedők stb.) elektromos flottáinak nappali töltése – ezzel az egyébként nappal kihasználatlan töltőinfrastruktúra is gazdaságosabbá válik, és a közületek 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 modellkalkulációban a buszok és a telephely energiaellátását követően még rendelkezésre álló energia 50%-ának a hálózati villamosenergia-tarifa díjának 75%-án történő értékesítésével számoltam.

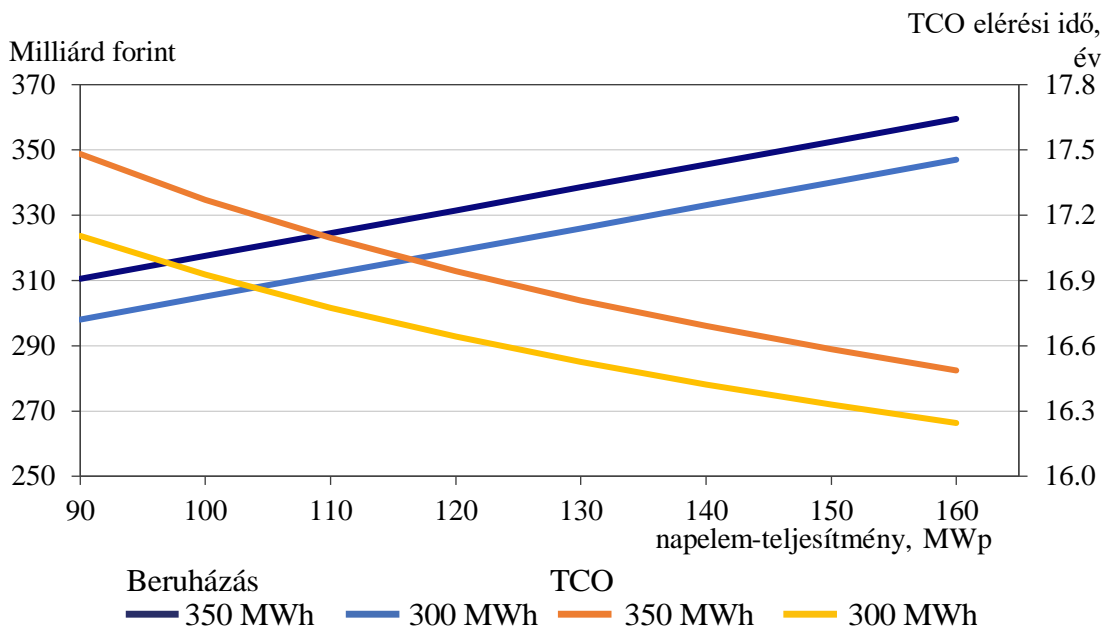
a. A napelem- és energiatároló rendszer méretezésének gazdasági hatása az 1000 elektromos buszt üzemeltető Volánbusz Zrt. esetében.

6. táblázat: Adatkörök – energiarendszer-elemzés

Megnevezés	Érték
Autóbusz-darabszám	1 000 darab
Autóbusz-kihasználtsági határfok	90%
Napi futásteljesítmény	300 kilométer/nap
Üzemeltetési napok száma egy évben	300 nap
E-buszok éves futásteljesítménye	40 500 000 kilométer
E-buszok átlagos villamosenergia-fogyasztása	1,1 kWh/kilométer
Töltőberendezések száma	250 darab
Töltőberendezés és a telepítés beruházási egységára	15 000 000 forint/darab
Dízelbusz ára	80 000 000 forint
Elektromos busz ára	160 000 000 forint
E-busz/Dízelbusz üzemeltetési költségaránya (üzemanyag nélkül)	55%
Új akkumulátor egységára e-buszokba (10. évben)	30 000 000 forint/darab
Villamosenergia-egységár	107 forint/kWh
Dízelüzemanyag-ár	437 forint/liter
Napelem teljesítménye	Változó
Energiatároló kapacitása	Változó
Energiatároló kisütési mélysége	80%
Energiatároló határfoka	90%
Napelem-beruházási egységár (tervezés, kivitelezés, infrastruktúra felújítása)	700 000 forint/pkW
Energiatároló-beruházási egységár	250 000 forint/kWh
Többlet-napenergia-értékesítés aránya	50%
Napenergia-értékesítés egységárának aránya a vásárolt energia egységárához	75%
Az energiaberuházást üzemeltető telephelyek iparienergia-felhasználása	9 586 299 kWh/év
E-busz – Dízelbusz élettartamköltség-egyenlőség időpontja	Változó
A beruházás után is hálózatról vett energia aránya	Változó
Dízelbusz-beruházás értéke	Változó
Elektromosbusz- és energiarendszer-beruházás értéke	Változó

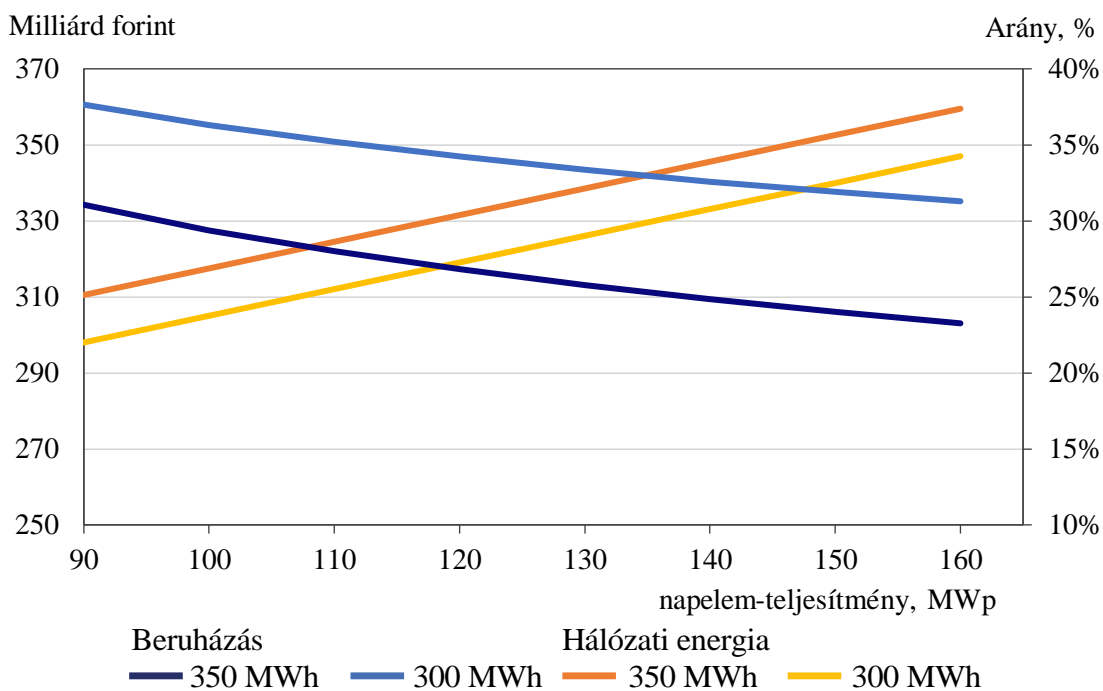
A 32. ábra azt mutatja, hogy a nagyobb napelem-teljesítmény javítja a megtérülést, de a nagyobb energiatároló rontja azt. A beruházás mértéke lineárisan változik a teljesítmény változásával.

32. ábra: Az energiarendszer beruházási költsége



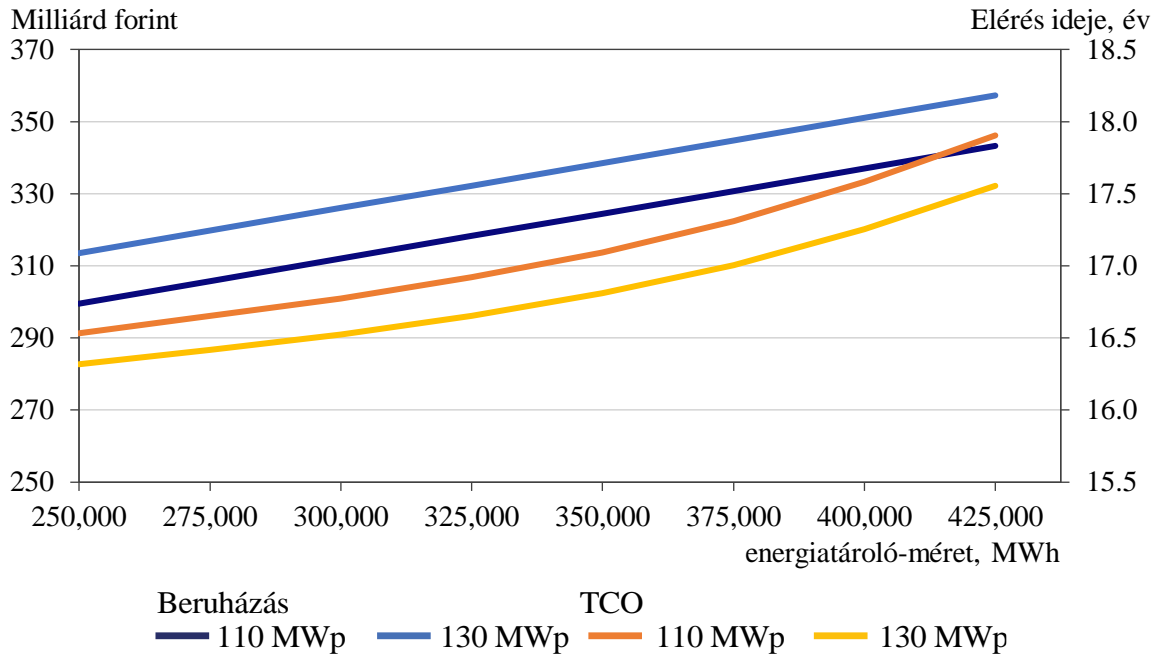
A beruházás növelésének jelentős hatása van a továbbra is hálózatról felvett energia mennyiségére, és a 33. ábrán az is megmutatkozik, hogy nagyobb energiatároló-kapacitás esetén a hálózatienergia-felvétel meredekebben csökken.

33. ábra: Az energiarendszer beruházási költsége, valamint a hálózatról felvett energia aránya



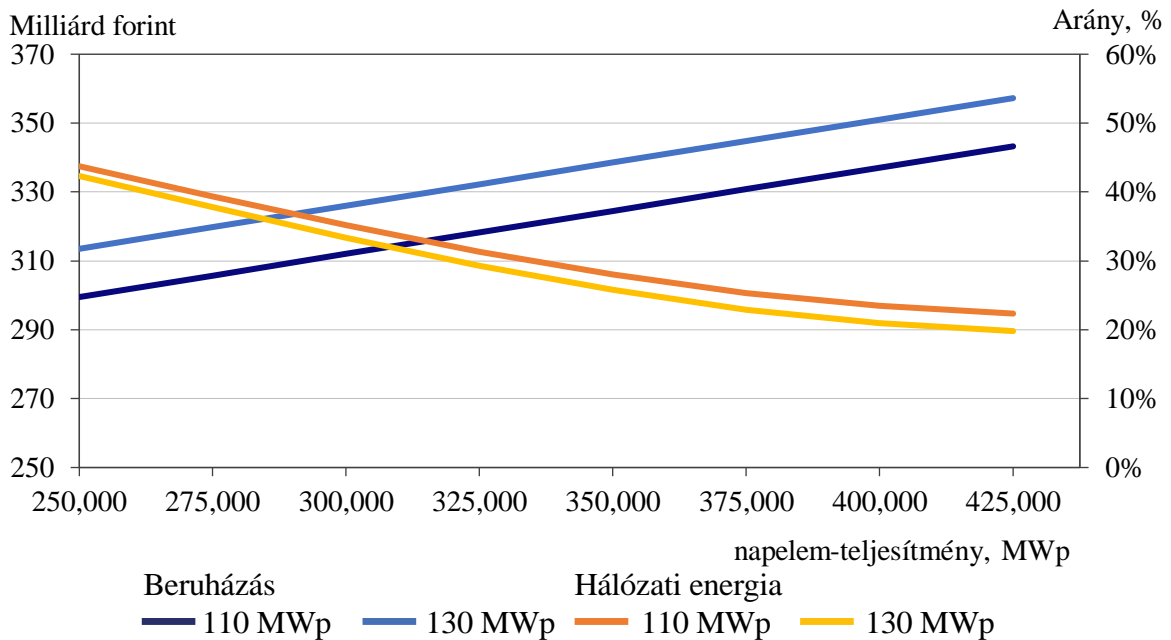
Ahogy az előzők alapján várható volt, a 34. ábra azt mutatja, hogy az energiatároló méretének növelése rontja a megtérülést.

34. ábra: A napelem energiarendszer beruházási költsége



A 35. ábra azt szemlélteti, hogy az energiatároló méretének növelése egy pontig lineárisan javítja a hálózatienergia-megtakarítást, aztán telítésbe fordul.

35. ábra: A napelem energiarendszer beruházási költsége, valamint a hálózatról felvett energia aránya



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

A 7. táblázatban összefoglaltam az általam optimálisnak tartott rendszer főbb paramétereit, 110 MWp napelem és 300 MWh energiátároló, 1000 elektromos busz esetében.

7. táblázat: *A rendszer főbb paramétereit*

Megnevezés	Érték
Az ipari tevékenység által közvetlenül felvett napenergia	4 254,3 MWh/év
Az ipari tevékenység által az energiátárolón keresztül felvett napenergia	3 582,5 MWh/év
A buszok által közvetlenül felvett napenergia	0 MWh/év
A buszok által az energiátárolón keresztül felvett napenergia	56 112,1 MWh/év
Az értékesíthető napenergia	62 431,4 MWh/év
A buszok töltéséhez hálózati energiát használó napok száma	365 nap/év
A buszok töltéséhez a hálózatból felvett energia aránya, %	37,0%
A telephely (ipari és busz) ellátásához hálózatról felvett energia aránya	35,2%
Dízelbusszal azonos TCO elérésének időpontja	16,8 év
Összes hasznosított napenergia	63 949 MWh/év
Energiarendszer- és buszberuházás összesen	312 milliárd forint

Fontos hangsúlyozni, hogy az elektromosbusz- és energiarendszer-beruházás, valamint annak üzemeltetése a 17. év végére úgy mutat kisebb élettartamköltséget, mint a dízelbusz-beruházás, hogy az elektromos rendszer beruházása vissza nem térítendő támogatás nélkül valósul meg. Ennek feltételei ismételten összefoglalva:

- a buszok futásteljesítménye 300 kilométer/nap,
- a megtermelt többletnapenergia legalább 50%-a értékesíthető,
- a dízel- és elektromos energia ára egymással körülbelül arányosan változik a jövőben (a modell állandó dízel- és elektromosenergia-árral számolt),
- rendelkezésre áll a Volánbusz számára annyi terület, amelyen a tervezett napelemmennyiség elhelyezhető.

A bemutatott esettanulmány arra az eredményre vezetett, hogy a különböző gazdasági modellek alátámasztják a disszertációban ismertetett 1. tézisemben megfogalmazott keretrendszert. Bizonyítást nyert, hogy lehetséges olyan zöld átmenet, amely nem csupán környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is fenntartható egy közösségi közlekedésben tevékenykedő vállalat számára. A számított megtérüléseket tovább javítja a disszertáció lezárásakor – 2025. január 4-én a dízel ára 644,7 forint/liter, az áram ára körülbelül 107 forint/kWh – megismerhető dízel- és áramárak, mivel a számításokat még jóval kedvezőbb dízelárral végeztem el. Mint kimutatható a modellekből, a dízel és az áram ára közötti különbség egyre jelentősebb, így az elektromos autóbusszok megtérülése is egyre kedvezőbb.

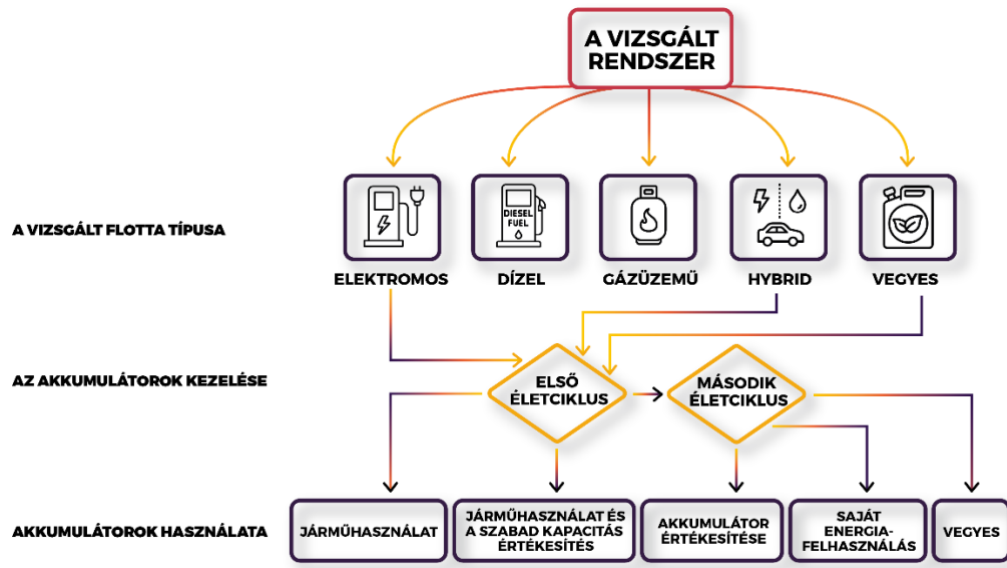
5. Az autóbusszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntési modell és módszer kidolgozása

Az üzemeltető társaság számára megfelelő flotta kiválasztása számos döntési szempont figyelembevételét, valamint egy normalizálás alapú, minden lényeges szempontra kiterjedő 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 autóbusszszolgáltatásban részt vevő társaságra alkalmazható, függetlenül a vizsgált flotta típusától, az akkumulátorok kezelésének és felhasználásának módjától. A vizsgált lehetőségeket a 36. ábra tartalmazza. A vizsgálat során egy adott járműtípusból álló – az elvárt napi futásteljesítmény elérésére alkalmas – optimális flottát választhatunk ki. Ha a vizsgált elektromos flottát is tartalmaz, akkor csak az akkumulátorok első, illetve első és második életrőlhatásait lehet figyelembe venni. Az akkumulátorok első életrőlhatásában vizsgálható a járművek üzemeltetésének és a szabad kapacitás értékesítésének lehetősége is az áramszolgáltatónak. Ha az akkumulátorok kapacitása egy előre meghatározott határ alatti, 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 szélenergia által termelt energia tárolása, a csúcsidőszaki villamos energia tárolása a járművek meghajtására maximális kibocsátás mellett stb., vagy ezek kombinációja.

36. ábra: A tesztelhető rendszerváltozatok leírása



Forrás: saját szerkesztés [P/7].

5.2. A döntéshozatali módszer ismertetése

Az optimális flottatípus meghatározásához a következő lépések végrehajtása szükséges. Először bemutatom a vizsgált busztípusok műszaki-gazdasági paramétereit, majd meghatározom, hogy mely paraméterek szerepelnek jelentős súllyal a modellem megalkotásakor. A megszerzett tapasztalatok és mérések alapján a következő tulajdonságok vonatkoznak a vizsgált busztípusokra:

8. táblázat: Az autóbustípusok összehasonlító táblázata fő ismérvenként

Elektromos	CNG	Dízel
autóbusz		
Beszerzési ár		
Dízel beszerzési ár ~1,5-szerese	Dízel beszerzési ár ~1,2-szerese, Beszerzéshez támogatás: nincs	Legkedvezőbb ár a többi típushoz képest
Felhasználási terület		
Városi, elővárosi, regionális	Városi, elővárosi, regionális	Városi, elővárosi, regionális
Károsanyag-kibocsátás		
Kibocsátásmentes	CO ₂ kibocsátás: ~80 kilogramm/100 kilométer	CO ₂ kibocsátás: ~100–110 kilogramm/ 100 kilométer
Zajterhelés		
Zajterhelés minimális (beépített zajgenerátor)	Dízelhez képest kisebb	Jelentős
Üzemanyag költsége		

Villamos energia egységára: 90 forint/kWh, Fajlagos üzemanyagköltség: ~90 forint/kilométer	Földgáz egységára: 377,6 forint/m ³ , Fajlagos üzemanyagköltség: ~254 forint/kilométer	Dízel egységára: 437 forint/ liter, Fajlagos üzemanyagköltség: ~180 forint/kilométer
Üzemanyag előállítása		
Előállítása fosszilis vagy megújuló energiaforrásból	A felhasználási helyre meglévő hálózatban továbbítható. Külön kezelést nem igényel. Fosszilis energiaforrás	Töltőállomásokon hozzáférhető
Töltőinfrastruktúra		
Hálózatfejlesztés és töltőbeszerzés szükséges. Ár: flottaméret függvényében ~5 millió forint/busz, egy töltő 2 buszt tud tölteni	Sűrítéshez kompresszorok szükségesek Ár: 8–10 millió forint/busz	Nem szükséges
Töltési idő		
1,5–2 óra	10–20 perc	10–15 perc

(A táblázat a következő oldalon folytatódik.)

(Folytatás.)

Elektromos	CNG	Dízel
autóbusz		
Hatótáv		
300–400 kilométer	300–400 kilométer	500–600 kilométer
Karbantartás		
Nagyfeszültségű részekhez speciális feltételek. Egyszerűbb hajtáslánc, egyszerűbb karbantartás. Egyszerűbb hajtáslánc, egyszerűbb karbantartás, fele költsége a CNG vagy dízel buszoknak	Gázauto-szerelő műhely szükséges. Dízelhez hasonló hajtáslánc és karbantartási igény	Költséges
Utaselégedettség (autóbusz-vezetők által megkérdezett utasok, nem reprezentatív felmérés)		
Nagyon pozitív/ környezetbarát és csendes	Pozitív, környezetbarát	Inkább negatív környezetszennyező a többi típushoz képest, zajos
Üzemeltetés költsége 15 évre, átlag		
5–7 millió forint	15–18 millió forint	16–19 millió forint

Az üzemeltetési tapasztalatom alapján a később ismertetett matematikai modellben a teljes tulajdonlasi költséget (TCO), a karbonlábnymot, illetve az ügyfél- és utaselégedettséget, mint változókat kell figyelembe vennem. E három változót kell standardizálnom és igény szerint súlyoznom. A 8. táblázat azt mutatja, hogy az elektromos

autóbusz (CAPEX) beruházási költsége jelentősebb, mint az ismertett másik két busztípusé, de üzemeltetési ágon (OPEX) 15 évre vetítve már jóval kedvezőbb, így a tisztán elektromos meghajtású autóbusz kompenzálja a kezdeti beruházási költséghátrányt. Az előny a károsanyag-kibocsátásnál, a zajterhelésnél, továbbá az utaselégedettségénél is szignifikáns. A disszertáció bevezetőjében ismertett jogszabályi kötelezettségeket is figyelembe véve megállapítható, hogy a környezetvédelmi előírásoknak az ismertett busztípusok közül csupán az elektromos felel meg tiszta járműnek. Tehát, ebben a fejezetben a flotta üzemeltetése során teljesítendő követelményeket határozom meg, 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.

– **A megvásárlandó járművek számának meghatározása**

A szolgáltatás előre jelzett futásteljesítményének megtételéhez és a megfelelő szolgáltatási színvonal (SLA) biztosításához szükséges gépjárművek számának meghatározásának lépései a következők:

– **A vizsgálandó járműtípusok meghatározása**

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

– **A döntési kritériumok és a kívánt cél eléréséhez szükséges paraméterek meghatározása**

Számos értékelési módszer alapvető problémája, hogy csak költségalapú összehasonlításra alkalmas, anélkül, hogy bevonna más tényezőket, mint például minőségi és szubjektív szempontokat. Az általam kidolgozott döntéshozatali módszer alkalmazásakor a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- Működési összköltség a teljes tulajdonlási költségből (TCO) számolva.
- Karbonlábnyom.
- Ügyfél- és utaselégedettségi tényező.
- A célfüggvény értékeinek normalizálása.
- A mutatók meghatározása flottatípusonként és járművenként.
- A megvásárolni szándékozott flotta típusának kiválasztása.

A teljes tulajdonlási költség (TCO) meghatározása

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:

$$C_i^{CAP} = C_i^{AM_v} + C_i^{AM_I} - R_i^I - R_i^O, \quad (5.1)$$

ahol:

- $C_i^{AM_v}$: az i típusú flotta járművei amortizációs költségének jelenértéke,
- $C_i^{AM_I}$: az i típusú flotta infrastruktúra amortizációs költségének jelenértéke,
- R_i^I : 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 jelentéértéke.

Működési költségek a vizsgált időszakban:

$$C_i^{OP} = C_i^{OP_M} + C_i^{OP_F} + C_i^{OP_S} + C_i^{OP_o}, \quad (5.2)$$

ahol:

- $C_i^{OP_M}$: az i típusú flotta karbantartási költségeinek jelenértéke,
- $C_i^{OP_F}$: az i típusú flotta energiaköltségeinek jelenértéke,
- $C_i^{OP_S}$: az i típusú flotta humán ráfordításainak jelenértéke,
- $C_i^{OP_o}$: az i típusú flotta egyéb költségeinek (például útdíj, parkolás stb.) jelenértéke.

Teljes tulajdonlási költség a vizsgált időszakban:

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

–Karbonlábnyom

Ez a mutató azt fejezi ki, hogy a vizsgált időszakban egy adott járműtípushoz tartozó egységjármű gyártásához és későbbi üzemeltetéséhez mennyi szén-dioxid-egyenértékű ÜHG keletkezik. Ez egy alapvető mutató a fenntarthatóság szempontjából, és a járműre vonatkozólag CF_i -vel jelöltem, ahol az i a flottatípust jelenti.

– Ügyfél- és utaselégedettségi tényező

Ez egy szubjektív mutató, amely kifejezi a vásárlók elégedettségét egy adott jármű esetén. (például biztosított szolgáltatások, járműtípus megbízhatósága) A mutatót a szolgáltatást igénybe vevők körében végzett felmérés alapján határozom meg, és az i flottatípusra CS_i -vel jelölöm az értékét. Ennél a mutatónál az értékek 1-től 5-ig terjednek, ahol az 5 a legjobb értékelés.

– **A célfüggvény értékeinek normalizálása**

Ebben a lépésben a döntés szempontjából releváns döntési kritériumok (h) értékeit határoztam meg, majd normalizáltam ezeket az értékeket. A normalizálás során a definiált értékeket úgy alakítottam át, hogy azok 0 és 1 közöttiek legyenek, így bekerülhetnek a célfüggvénybe.

1, Működési összköltség (TCO)

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

$$\alpha_i^1 = C_i^{TCO} / C^{TCO(max)}$$

2, Karbonlábnyom (CF)

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

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

3, Utaselégedettség (CS)

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

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

– **A megvásárolni kívánt flotta típusának kiválasztása**

Az optimális flottaszerkezet kiválasztása egy tipikusan az optimalizálási feladatok halmazához tartozik. Az általunk vizsgált optimalizálási feladat általános alakban a következőképp írható fel:

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.9)$$

$$AX = b; X > 0 \quad (5.10)$$

ahol, A egy $m \times n$ mátrix, b pedig egy m komponensű vektor.

Az $f(X)$ -et célfüggvénynek nevezzük, aminek a szélsőértékét (minimumát vagy maximumát) keressük az $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ változókra, amelyeket döntési változóknak nevezünk. (A mi esetünkben ez a flottatípus.) Azokat a pontokat, melyek eleget tesznek az összes megadott korlátozó feltételnek, az optimalizálási feladat lehetséges megoldásainak vesszük, és halmazukat L-lel jelöljük.

A következő lépésben a célfüggvény együtthatóinak a normalizálását végeztem el. A célfüggvény normalizálása azt jelenti, hogy egy optimalizációs probléma célfüggvényéhez tartozó együtthatókat olyan formába hozzuk, amely skálázás vagy átalakítás révén könnyebben kezelhetővé, összehasonlíthatóvá vagy numerikusan stabilabbá válik. A normalizálás során általában egy előre meghatározott tartományra (például $[0,1]$) alakítjuk át a célfüggvény együtthatóit.

A mi esetünkben a modell stabilitása végett a MIN-MAX scalling módszert használtam.

Tegyük fel, hogy van egy együtthatóvektorunk $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$, ebben az esetben a normalizálás a következőképpen történik. Meghatározzuk az együtthatók abszolút értékeinek a maximumát (esetünkben az abszolút érték elhagyható, mivel minden együttható pozitív):

$$M=[|\alpha_1|,|\alpha_2|,\dots,|\alpha_n|], \quad (5.11)$$

Utána minden együtthatót elosztunk a maximummal.

$$\alpha'_i = \frac{\alpha_i}{M} \quad (5.12)$$

Implementálom az ismertett módszertanhoz a feladatot, amelynek első lépéseként meghatározom a peremfeltételeket, azaz a szóban forgó vállalat szakértőinek meg kell határozniuk az egyes értékelési szempontok súlyozását fontossági sorrendben 5.13 és 5.14). Ezt követően kialakul a normalizált célfüggvény összetevőinek súlyozott összege, így a minimális értékű egységjármű a legmegfelelőbb választás a vállalat szempontjainak szerint.

A célfüggvénykomponensek súlyának meghatározása:

$$0 \leq w_h \leq 1, \quad (5.13)$$

$$\sum_{h=1}^3 w_h = 1 \quad (5.14)$$

A célfüggvény meghatározása:

$$F(w) = \min_i \sum_{h=1}^3 w_h \cdot \alpha_i^h \quad (5.15)$$

A függvény meghatározásával megalkottam egy olyan matematikai modellt, amelynek segítségével az autóbuszos operátorok meg tudják határozni a flottájuk összetételét. A képlet segít egy optimális döntés meghozatalában, amely révén a már említett környezetvédelmi fenntarthatóság mellett a gazdasági fenntarthatóság is elérhető. A fejezetre vonatkozó 2. tézist a 7. fejezetben fejtem ki.

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

A vizsgált rendszer Magyarország legnagyobb tömegközlekedési autóbusz-társasága, a Volánbusz Zrt. elektromos és dízelüzemű, sűrített földgázüzemű és vegyes autóbuszflottájának üzemeltetésére vonatkozik. A döntéshozatali módszer kidolgozásának célja, hogy az adott körülmények között kiválasztható legyen az a flotta, amely a jövőben leginkább megfelel a cég kritériumainak. Az előzetes felmérések alapján a cég követelményeinek négyféle flottatípus felel meg: elektromos, dízel, CNG (sűrített földgáz) és vegyes flotta. A vegyes flotta összetétele a hajtásrendszerek összeválogatásával szabadon megválasztható. Jelen esettanulmányban dízelhajtású és elektromos járműveket 50-50%-ban vettem figyelembe.

Az előzőekben ismertett döntéshozatali módszernél a teljes életciklusköltséggel számoltam, feltételezve, hogy már csak ezen mutató alapján is az elektromos busz a bizonyos paraméterek mentén optimális választás (az elektromos busz karbonlábnyoma egyértelműen jobb, és az utaselégedettség szempontjából sincs jelentős különbség a lehetőségek között).

A bemeneti adatokban a következő döntési kritériumokat (h) vettem figyelembe, mint az működési összköltség, a karbonlábnyom és az utaselégedettség. Az elemzésben a négy különböző hajtástechnológiát – elektromos, dízel, CNG (sűrített földgáz) és vegyes rendszerek – költségeit, környezeti hatásait és egyéb szempontjait vizsgáltam az adatok alapján.

Az esettanulmányban M. di Pasquale és szerzőtársai [95] és saját rendelkezésre álló Volánbusz Zrt. adatbázis működésiösszköltség-adatait használtam fel. A másik két szempont esetén ugyanazzal az adatsorral dolgoztam.

5.3.1. Működési összköltség (TCO –Total Cost of Ownership, euró/kilométer)

Az adott technológia kilométerenkénti működési költségeit fejezi ki a működési összköltség számértéke.

9. táblázat: *A működési összköltség bemeneti adatai az autóbusszflotta által használt hajtásrendszer alapján*

Működési összköltség	Elektromos		Dízel		CNG		Vegyés	
	MDP	VB	MDP	VB	MDP	VB	MDP	VB
Jármű amortizációs költség	1,09	0,92	0,44	0,44	0,55	0,55	0,765	0,765
Karbantartási költség	0,37	0,2	0,39	0,39	0,41	0,41	0,38	0,38
Infrastrukturaköltség	0,1	0,008	0,004	0,004	0,0008	0,0008	0,052	0,052
Energiaköltség	0,16	0,16	0,58	0,58	0,36	0,6	0,37	0,37
Teljes működési összköltség	1,72	1,288	1,414	1,414	1,3208	1,5608	1,567	1,567

ahol MDP=M. Di Pasquale és szerzőtársai adatai, VB=Volánbusz Zrt. adatai.

A költségekkel kapcsolatban a következő fontosabb megállapításokat emelem ki:

- *Az elektromos járművek amortizációs költségei* a legmagasabbak (1,09, illetve 0,92 euró/kilométer), míg a dízelé a legalacsonyabb (0,44 euró/kilométer).
- *Karbantartási költségek* szinte azonosak, de a CNG esetében a legmagasabb (0,41 euró/kilométer). De a Volánbusz Zrt.-nél ezen járművek esetében a karbantartási költségek alulmaradtak a többi átlaghoz képest.
- *Az infrastrukturaköltségek* az elektromos és vegyes rendszereknél jelentősek (0,10, illetve 0,052 euró/kilométer), szemben a dízel és CNG minimális költségeivel.
- *Energiaköltségek:* A dízel ebben a szegmensben a legdrágább (0,58 euró/kilométer), az elektromos pedig a legalacsonyabb költségű (0,16 euró/kilométer). A Volánbusz Zrt. esetén a sűrített földgáz költségei: 0,6 euró/kilométer.

A normalizált értékek alapján az elektromos járművek referenciaként 1,00 pontot kapnak. A dízel (0,82) és a CNG (0,77) költséghatékonyabb, míg a vegyes rendszerek (0,91) drágábbak.

5.3.2. Karbonlábnyom – ÜHG-kibocsátás alapján (CF, gramm/kWh)

A szén-dioxid-egyenérték-kibocsátás az energiaforrástól függően változik, és jelentősen befolyásolja a döntéseket:

Elektromos járműflotta:

Az energia-előállítás kibocsátása nagymértékben függ az adott régió, ország energiamixétől, így az energiát előállító erőművek kibocsátásától [96].

- Lengyelország (szénalapú energia): 600 gramm/kWh.

- Magyarország (vegyes energia): 240 gramm/kWh.
- Franciaország (atomenergia): 50,25 gramm/kWh.

Ez azt mutatja, hogy az elektromos járművek környezeti előnyei nagymértékben függenek az energiaellátás tisztaságától. Értekezésemben a továbbiakban a magyar energia-előállítás kibocsátási értékeit vettem alapul. A fogyasztást 1,5 kWh/kilométerrel számoltam, mely a megközelítőleg egy átlagos kibocsátást jelent. Beleszámolva az energiaátalakítások veszteségeit. (Elektromos töltés, AC/DC és DC/DC átalakítások.)

Dízel járműflotta:

A dízel a legmagasabb kibocsátást eredményezi (1340 gramm/kWh), így a legkevésbé környezetbarát.

CNG járműflotta:

A kibocsátásuk 833 gramm/kWh, ami jobb, mint a dízel, de rosszabb, mint az elektromos járművek általában.

Vegyes járműflotta:

970 gramm/kWh kibocsátással a dízel és a CNG között helyezkednek el.

A normalizált értékek alapján a francia energiaforrást használó elektromos járművek a legjobbak (pontszám: 0,45), míg a dízel a legrosszabb (1,00).

5.3.3. Utaselégedettség (CS, pontszámok)

Az utaselégedettséget három szempont alapján értékeltem: hozzáférés/elterjedtség, rugalmasság és megbízhatóság. Az értékeket a Volánbusz Zrt. 2023–2024-es időszakából szerzett műszaki tapasztalataimból, továbbá az autóbusz-vezetők beszámolóiból – nem reprezentatív adatgyűjtés – szerzett információik alapján, valamint *Borén–Nurhadi* [16] adataira alapozva alkottam meg.

10. táblázat: Az utaselégedettség értékelése
az autóbuszflotta által használt hajtásrendszer szerint

(pont)

Utaselégedettség	Elektromos	Dízel	CNG	Vegyes
Hozzáférés, elterjedés	3	1	2	2
Rugalmasság	3	2	2	2,5
Megbízhatóság	2	3	4	2,5
Összesen	8	6	8	7

Az utaselégedettséggel kapcsolatban megállapításaim a következők:

- *Hozzáférés/Elterjedés:* Az elektromos járművek (3 pont) a legelterjedtebbek a vegyes rendszerekkel együtt, míg a dízel (1 pont) a legkevésbé hozzáférhető.
- *Rugalmasság:* A vegyes rendszerek (2,5 pont) rugalmasabbak, a többi technológia hasonlóan teljesít (2–3 pont között).
- *Megbízhatóság:* A CNG járművek kapják a legjobb értéket (4 pont), míg az elektromosak a legrosszabbakat (2 pont).

Összességében az elektromos és a CNG rendszerek hasonló pontszámot értek el (8 pont), míg a vegyes rendszerek 7, a dízel pedig 6 ponttal zárt.

5.3.4. Összegzés

Az elektromos járművek a legalacsonyabb működési összköltség értékekkel és megfelelő környezeti teljesítménnyel rendelkeznek, különösen tiszta energiaforrásokkal. Ugyanakkor a rugalmasságuk és a megbízhatóságuk még fejlesztésre szorul. A dízel magas kibocsátása, a CNG pedig köztes eredményei alapján kevésbé számít vonzónak hosszú távon. A vegyes rendszerek kiegyensúlyozott választást nyújtanak, de költségeik viszonylag magasak.

Az 5.2.1. alfejezetben bemutatott $F(w)$ függvény alkalmazásával kaptam a 9. táblázatban közreadott értékeket. Ezen döntési kritériumok tetszőleges súllyal vehetők figyelembe, melyet a flottaüzemeltető, illetve a szolgáltatást megrendelő határozhatja meg az aktuális preferenciái alapján.

11. táblázat: Az utaselégedettség bemeneti adatai az autóbuszflotta által használt hajtásrendszer alapján

Forrás	Elektromos	Dízel	CNG	Vegyes
M. Di Pasquale	0,807	0,854	0,794	0,831
Volánbusz Zrt.	0,707	0,854	0,849	0,831

Elemelve a működési összköltség, a karbonlábnyom és az utaselégedettség szerint a flottákat, valamint rendre 0,4; 0,3; 0,3 súllyal véve a bemeneti szempontokat a legjobb technológiának M. Di Pasquale és szerzőtársai adataira az elektromos meghajtású flotta (0,807), majd CNG (0,794), majd a vegyes (0,831), végül a dízel flotta (0,854) adódik.

A Volánbusz Zrt. esetében az elektromos járműflotta még jobbnak adódik (0,707), majd követi a vegyes (0,831), CNG (0,849) és a dízel meghajtású (0,854) autóbuszflotta.

5.4. Az esettanulmány kapcsán levonható következtetések

A részletes szakirodalmi elemzés alapján megállapítom, hogy az ideális flottakiválasztási folyamatból több lényeges összetevő hiányzik, ami hibás döntéshozatalhoz vezethet. E tényezők közé tartozik az akkumulátorok másodlagos életciklusának, a fenntarthatóságnak és a logisztikának a figyelembevétele. Ebben a fejezetben egy általános és innovatív döntéshozatali módszert dolgoztam ki, amely ezeket a hiányosságokat orvosolja, és kiegészíti olyan egyéb tényezőkkel, mint a karbonlábnyom, vagy az ügyfél-elégedettség mutató. A módszer helyességét a Volánbusz Zrt. és egy szakirodalomban fellelt adatok alapján esettanulmányban igazoltam. Az eredmények azt mutatják, hogy az elektromos autóbusz minden esetben a legjobb mutatót kapta, így érdemes a meghatározott paraméterek mellett ezt a busztípust használni. A kutatás következő szakaszában az akkumulátorok másodlagos életciklusához kapcsolódó innovatív működési modellek kidolgozását tervezem.

6. Az elektromos autóbusszflottát 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 úgynevezett „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 autókban használt akkumulátorokhoz. A későbbi fejezetek azt tárják fel, hogy milyen jellegű kérdések merülnek fel az akkumulátor-életciklus során, és milyen megoldások alkalmazhatók a problémák kezelésére. Az elektromos autók térhódításával együtt jár a gépjármű-akkumulátor- (EVB – Electric Vehicle Battery) igény növekedése, ezért célszerű az akkumulátoros elektromos autók (BEV) közlekedési ágazatbeli regisztrációjának utóbbi évekbeni dinamikus felfutásának áttekintése.

A piacra kerülő akkumulátorok számának növekedésével együtt nőtt az igény az akkumulátorok életciklusának meghosszabbítására is. Azzal is szembe kellett nézni, hogy bár a lítium-ion akkumulátorok abban az értelemben nem mérgezőek, mint az ólom-savas vagy a nikkell-kadmium akkumulátorok, tartalmaznak azonban olyan elemeket, amelyek környezetbe kerülését meg kell akadályozni. Továbbá 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 nagymértékben elősegíti a környezeti és gazdasági szempontok érvényesülését.

Az elektromos járművek (EV), köztük az elektromos autók gyártói számára egyre világosabbá válik az ellentmondás, hogy míg az elektromos járművek a dekarbonizáció szempontjából tisztának tekinthetők, addig az akkumulátoraik előállításához erősen karbonintenzív tevékenység. A probléma a fenntarthatóság szempontjából nem csupán a klímavédelmi törekvések oldalán jelentkezik, hanem gazdasági oldalon is. Az akkumulátorok előállításához szükséges nyersanyagok és ásványkincsek fogytán vannak, hosszabb távon tehát akár az akkumulátorhiány akadályozhatja is 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?” [97].

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 lítiumkészlete azonban nem kerülhet csak az elektromos járművek akkumulátoraiba. A fémeket számos egyéb termékhez, például laptopokhoz és mobiltelefonokhoz, valamint a repülőket, vonatok és kerékpárok gyártásához is használják [98].

Ráadásul az akkumulátoroknak a járművekhez képest rövidebb élettartama ronthatja a járművek teljes élettartamköltségének (TCO) csökkentésére irányuló erőfeszítéseket. Egy 2023-ban készült elemzés [93] szerint az akkumulátorok felelnek ugyanis az elektromosjármű-gyártás során keletkező ÜHG-kibocsátás 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 hazánkban is, a társadalom és lakosság széles körét foglalkoztató kérdés. Az akkumulátorgyártás és -technológiák rohamos fejlődése, a nyersanyagok szűkössége és a használt akkumulátorok kezelése egyaránt hatással van az iparban felhasznált akkumulátortípusok keresletére, beszerzési árára, ami egyaránt befolyásolja mind az elektromos járművek, mind azok vontató akkumulátorainak élettartamát és teljes tulajdonlási költségét (TCO). Különösen fontos tehát, hogy az elektromos autóbusszflották kialakítása tekintetében tisztában legyünk az akkumulátortechnológiák nyújtotta előnyökkel és hátrányokkal, az egyes akkumulátortípusok várható életciklusával és az akkumulátorcsomagok (battery pack) árát jellemző trendekkel. A következő fejezetben röviden áttekintem ezeket a kérdéseket.

6.1. A degradációra vonatkozó saját mérések és megállapítások

A Volánbusz Zrt.-nél – mint autóbusszos közösségi közlekedési közszolgáltatást végző társaságnál – stratégiai alternatívaként már kidolgoztam az ismertetett elveknek megfelelő elektromos járműfejlesztési koncepciót, és ennek keretében az autóbussz-állomány jelentős fiatalítását és fejlesztését célul kitűző cselekvési programot. Ezen járműfejlesztés mentén a társaság már 100 darab tisztán elektromos hajtású autóbusszt üzemeltet.

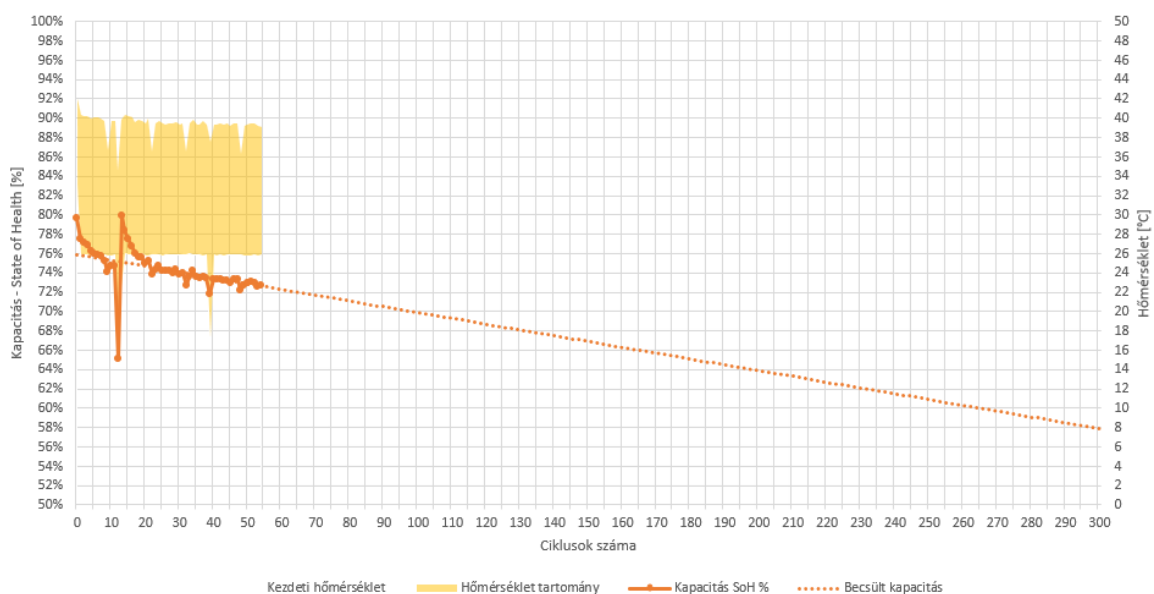
Az elektromobilizáció jegyében történő fejlesztés egyik fő mozgatórugója a technológiai fejlődés és a szolgáltatási színvonal növelésének igénye, az energiafelhasználás hatékonyságának javítása, valamint a károsanyag-kibocsátás csökkentése mellett az, hogy a villamos energiát mint üzemanyagot a társaság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

A saját energiatermelési képesség kialakításának vizsgálata mentén és ahhoz kapcsolódóan általam vezetett kutatás, melynek keretében piaci szereplőkkel és egyetemekkel együttműködve vizsgáltam, hogy például az elektromos autóbusszokból kikerülő akkumulátorok a körforgásos működés elve mentén, másodlagos hasznosítás keretében az infrastruktúrába épített tárolóként hogyan tudják tovább szolgálni a társaság működését és érdekeit. Feltételezésem szerint az akkumulátorok további használatának a jelentősége jóval nagyobb, mint azt a kutatásom megkezdésekor feltételeztem.

Az autóbuszokban lévő akkumulátorokat – melyeknek jelentős a beszerzési költségük – a gyártói és a felhasználói tapasztalatok alapján elvileg 10 évente cserélni szükséges azok kapacitásvesztése okán. Ezen gyártói garanciavállalásnál idősebb, de működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre lehet az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, így javítva a beruházási költségek megtérülését. Az 1. tézisemnél már kifejtettem, hogy az akkumulátorok 10-12 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, melynek célja elsősorban az volt, hogy összehasonlíthatóvá váljanak a nemzetközi irodalomban ismertetett mérési eredmények a saját mérési eredményeimmel.

A 37. ábra a Volánbusz Zrt.-nél használt akkumulátortípusnál az általam meghatározott módszertan alapján végeztetett tesztelés mérési eredményeit összegzi.

37. ábra: A valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 1. mérés



Forrás: Volánbusz Zrt., saját szerkesztés.

A 37. ábrán az X-tengely a teljes ciklusok számát jeleníti meg. A ciklusokat 0,5 C töltés és 1,0 C merítés jellemzi. A bal oldali Y-tengely az eredeti kapacitáshoz viszonyítva mutatja az akkumulátor megmaradt kapacitását, azaz százalékos állapotát, a mérési pontokat a narancssárga pontok ábrázolják. A narancssárga szaggatott vonal az adatok lineáris extrapolációját fejezi ki, azaz egy becslést, hogy ugyanilyen ütemű töltés-merítés esetén milyen további kapacitásvesztés várható.

A bemutatott mérések alapján 60%-os megmaradt kapacitásig igaz ez a linearitás, onnantól fokozatosan erőteljesebben csökken a kapacitás (az akkumulátor öregedése), majd egy bizonyos szintnél teljesen összeesik. 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 azok nem képesek eredeti funkciójuknak megfelelően működni.

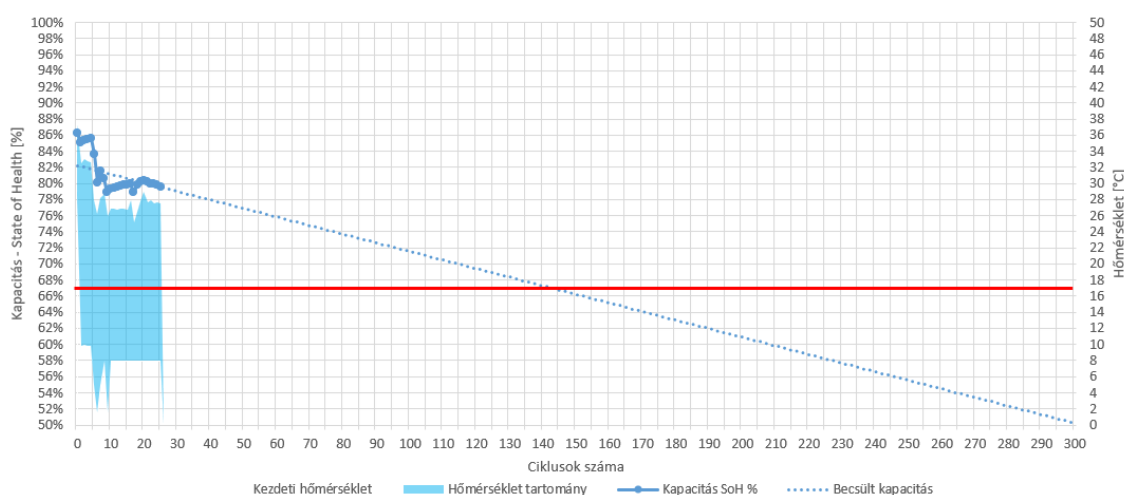
Az akkumulátorokat 55 teljes ciklusban teszteltük. A modellszámítás alapján a tesztelt akkumulátornál a 60% alá csökkenés várhatóan a ~265. ciklusnál következik be, azaz az akkumulátor a mostani állapotához képest még ~210 ciklust tud elviselni. Attól, hogy 60% alá esik a megmaradt kapacitása, még használható marad az akkumulátor, akár a 40–50%-os szintig is, viszont a jelenlegi mérésből a 60% alatti intervallum nem becsülhető. A kimért kapacitásvesztési trendet lehet erre a szakaszra egy felső becslésnek tekinteni.

Az elvégzett mérés alapján 100 ciklus alatt ~6%-nyi kapacitást veszít az akkumulátor, ebből arra lehet következtetni, hogy 60%-os megmaradt kapacitásról 40%-os megmaradt kapacitásig kevesebb mint 333 ciklusra lesz szükség. Ezek alapján, ha a tesztelt akkumulátor a mostani 72,6%-os állapotáról tovább használjuk a 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 töltjük fel és merítjük le az akkumulátort. Például, ha nem 100%-0%-100% merítés-töltési ciklusban használjuk az akkumulátor, hanem például 75%-25%-75% ciklusban, 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, 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.)

A 35. ábra a hűtött közegben végzett akkumulátortesztelés mérési eredményeit összegzi. A tengelyjelölések és az ábraelemek ugyanazt jelentik, mint a 25. ábrán, csak a mérési értékek különbözőek.

38. ábra: A 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 kapacitásvesztés körülbelül a 210. ciklusnál fog bekövetkezni, vagyis 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, ebből arra lehet következtetni, hogy 60%-os megmaradt kapacitásról 40%-os kapacitásig kevesebb mint 188 ciklusra lesz szükség. Ezek alapján, ha a tesztelt akkumulátor a mostani 78%-os állapotáról további használatnál 40%-osra csökken, akkor legfeljebb $\sim 170 + 188 = \sim 358$ teljes (100%-0%-100%) merítési-töltési ciklusra lehet számítani.

A 38. ábra 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.) Az erőforrás hiánya miatt a saját mérések nem adtak lehetőséget több tízezer ciklus vizsgálatára, így az eredmények összehasonlítása természetesen korlátozott a nemzetközi szakirodalomban ismert adatokkal. A közel kétszáz kisülés azt bizonyítja, hogy a degradáció iránya és módja megfelel az ismertett szakirodalomban találhatóakkal, tehát bizonyos feltételek mellett a használt akkumulátorok még alkalmasak energiatárolás céljára.

A 3.4.5 fejezetben a 17. ábra kapcsán a korábban leírtak szerint az optimális akkumulátorhasználatra a 12. táblázat szerinti paraméterek vonatkoznak.

12. táblázat: *Optimális akkumulátorfelhasználás*

Jellemző	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%)	8 400 kapacitás-egység	9 600 kapacitás-egység	12 000 kapacitás-egység	9 600 kapacitás-egység	16 000 kapacitás-egység	12 000 kapacitás-egység

A 12. táblázat alapján levonható következtetések:

- 85–25% SoC között a belső ellenállás körülbelül 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 pedig kisebb.
- A nagyobb terhelés (magasabb C érték) jobban öregíti az akkumulátort.
- A hosszú élettartam érdekében az akkumulátorokat 85–25 vagy 75–25% töltöttségi szint között érdemes használni.

A 12. táblázat a kívánatos akkumulátor töltés-kisülés ciklus meghatározásában segít számomra és az elektromos autóbust operálóknak, így biztosítható a fordárhoz illesztett akkumulátorfeltöltés és az akkumulátor szükséges maradványértéke.

6.2. A visszautas logisztika szerepe elektromos járművek akkumulátorainak második életciklusában

A 3.4.6. fejezetben hivatkozott publikációk a figyelmet a visszautas logisztika és a körforgásos gazdaság összekapcsolásának fontosságára irányítják, és azt igazolják, hogy az akkumulátorok degradációjának nyomon követésén alapuló üzemeltetési modellben ezen megoldások a rendszer nélkülözhetetlen elemeinek tekintendők.

A degradációra vonatkozó mérések egyértelművé teszik, hogy az akkumulátorok életciklusa 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 életciklusával (second life).

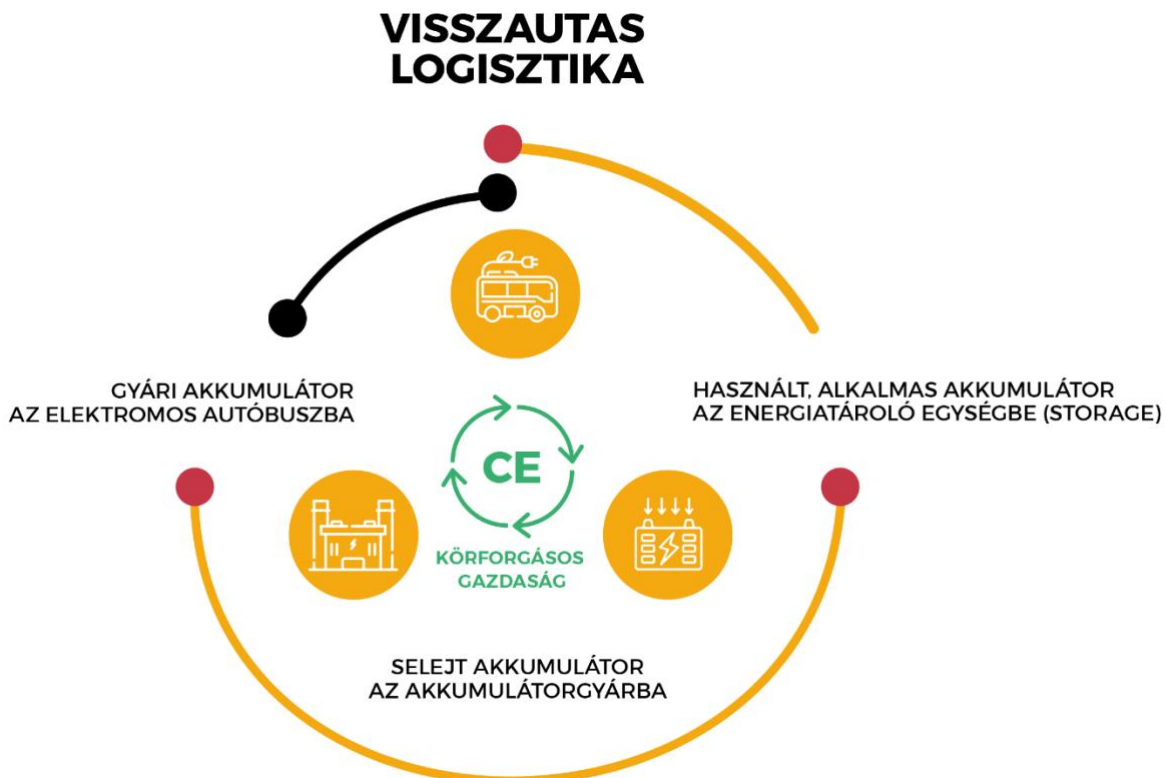
Az elektromos autóbuszok akkumulátorainak degradációjával kapcsolatos publikációk egy-egy részterületre vonatkoztak. Ezek eredményei felhasználhatók egy holisztikusabb üzemeltetési modellben, amelyben az akkumulátorok degradációjának pontos ismerete lehetővé teszi azok második életének megtervezését annak érdekében, hogy a flotta teljes életciklusköltsége optimális legyen. Az akkumulátorok második életciklusának tervezésében kiemelt szerepet kap a járműállományban lévő akkumulátorok degradációs és töltési jellemzőinek pontos ismerete, ami az üzemeltető tényleges mérési eredményeinek birtokában érhető el. Megállapítottam, hogy ilyen komplex modell a szakirodalomban nem lelhető fel, ezért adott összetételű elektromos autóbuszparkra és fordaszerkezetre vonatkozóan egy ilyen megközelítésű rendszert mutatok be.

Tegyük fel, hogy egy elektromos autóbusz akkumulátora 400 kWh-ás. A szakirodalmi ajánlás szerint ideális alkalmazás során az akkumulátorok töltöttsége 85 és 25% közötti. A 12. táblázat alapján ezen üzemeltetési paraméterek mellett az akkumulátor élettartama 12000 ciklus, míg eléri azt a degradációs értéket, amikor már nem tudja kiszolgálni a közlekedési feltételeket. Amennyiben azt feltételezzük, hogy egy busz évente 300 napot üzemeltetjük, valamint naponta egyszer töltjük fel és sütjük ki, ez azt jelenti, hogy 12000 ciklust több mint 40 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 el egy elektromos autóbusz akkumulátorától. Az üzemeltetés során 25% és 100% között kell tartanunk az akkumulátor töltöttségi szintjét, hogy ezt az élettartamot elérhessük. Ebben az esetben az akkumulátorban 300 kWh teljesítmény marad, amely kapacitás 1 kWh/kilométer fogyasztás esetén megfelel egy átlagos napi fordának. (Saját üzemeltetési tapasztalat ugyanis, hogy időjárástól függetlenül az elektromos autóbuszok fogyasztása átlagosan körülbelül 1 kWh/kilométer.) Ez a kihasználási arányt is növeli, az előbbi 60-ról 75%-ra. Az elsődleges élettartam végén az akkumulátor kapacitása még mindig 300–320 kWh, amit további alkalmazásokban, például tárolóként, hasonló töltöttségi körülmények között használva további 3900 ciklusig alkalmazhattuk. Ez hasonlóan évi 300 ciklussal számolva további 13 évnnyi tárolási kapacitást jelent. A modellben egy nap egy

ciklussal számolok és egy jármű évi 300 napos üzemidővel. Megítélésem szerint a bemutatott modell szerint az elektromos autóbusszflottát üzemeltető vállalatok, elérhetik a meghatározott környezetvédelmi célokat, a lokálisan zéró emissziót.

A 39. ábra azt a körforgásos modellt mutatja be, melyben a Volánbusz Zrt. a járművekből kikerülő használt, üzemképes, azonban járműben történő használatra már gazdaságosan nem alkalmas akkumulátorokat további használatra fogná be, ezzel második életciklust adva az akkumulátoroknak.

39. ábra: Az akkumulátorok második életciklusának kialakítása a körforgásos gazdaságban

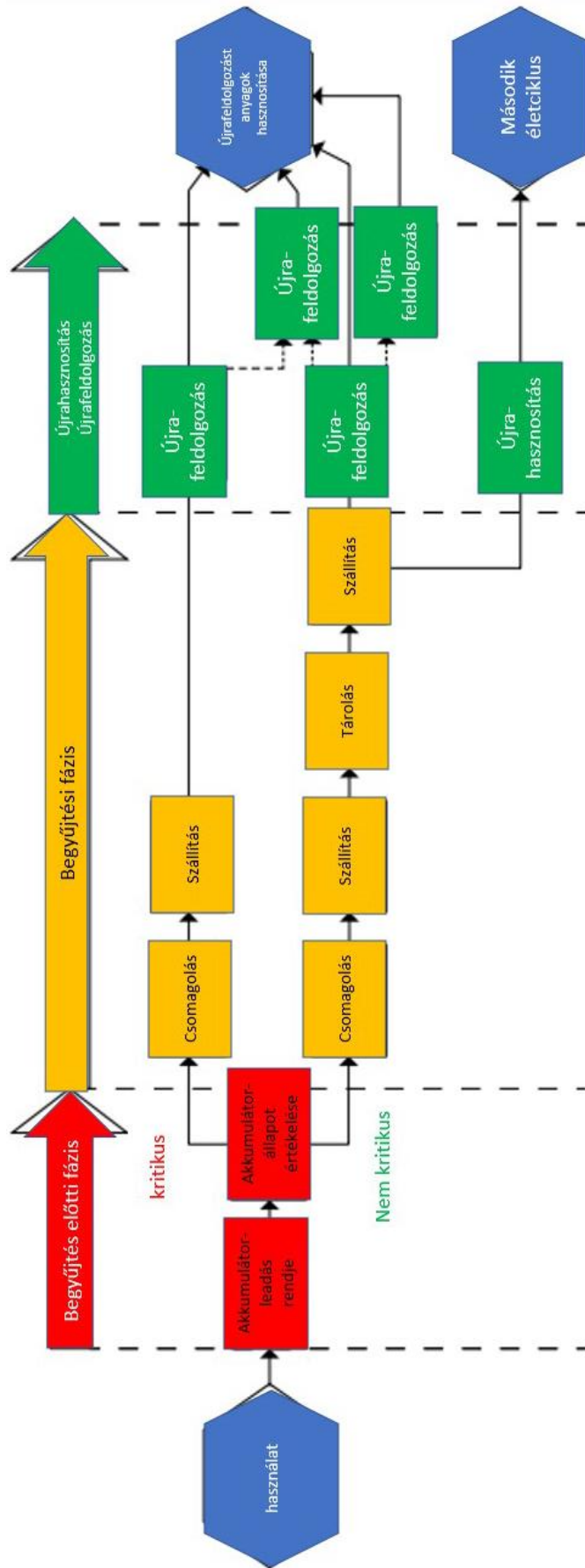


Forrás: saját szerkesztés.

A koncepció szerint a járművekben üzemelő akkumulátorok a kapacitásvesztésük miatt körülbelül 10–12 év után, az első életciklusukat felhasználva, kikerülnek a járművekből, azonban ahelyett, hogy hulladékká válnának, az egyes telephelyeken storage-ként így használhatók a telephelyen megtermelt kerülő villamos energia eltárolására. A tárolt villamos energia ezáltal bármikor felhasználható.

A 40. ábra azt mutatja, hogy az akkumulátorok állapotát használatuk során egy szabályozott folyamatban értékelni kell, ami történhet egyrészt a járművekbe szerelt online, valós idejű diagnosztikai rendszer alapján, másrészt pedig a 6.1 fejezetben bemutatott mérésekkel. Ez – az ábrán pirossal jelölt fázis – kritikus az akkumulátorok begyűjtési fázisát tekintve (sárga színnel jelölt fázis), mert a visszautas logisztikai folyamat lefolyását ez határozza meg. A közlekedési vállalat elektromos akkumulátorainak menedzsmentrendszerét ezekre a folyamatokra alapozva célszerű felépíteni.

40. ábra: A vállalati akkumulátormenedzsment folyamata



Forrás: saját szerkesztés.

A járművekből kikerülő, ámde működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre lehet az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, valamint javítva a beruházási költségek megtérülését. Ezen túlmenően a hulladékká válás időszaka is évekké kitolható, ezzel is csökkentve a környezeti terhelést. A storage-ként funkcionáló akkumulátorok ezeken felül jövedelemtermelő képességgel is rendelkezhetnek, hiszen a társaság a megtermelt, de általa fel nem használt villamos energiát akár értékesítheti is a lakosság vagy piaci szereplők számára rendelkezésre bocsátott töltőinfrastruktúráján keresztül.

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

Az elektromos autóbuszok fajlagos fogyasztása 0,9 és 1,1 kWh/kilométer közötti. Mivel az elektromos autóbuszok akkumulátorainak kapacitása (C) átlagosan 300 kWh, ezért az ilyen buszokkal teljesíthető forda-hatótávolság (dei) 300 kilométer. Ezen kalkuláció alapul vételével megállapítható, hogy az elektromos autóbuszok darabszámát technológiai szempontból a fordaszerkezet és a töltési mód befolyásolja, azonban a teljes életciklusköltség meghatározása egy gazdálkodó szervezetnél elengedhetetlen szempont.

Az életciklusköltség összehasonlítása a dízelüzemű járművekéhez viszonyítva javasolt, hiszen – a helyközi személyszállításban meglévő 300 kilométer fölötti fordák esetében – a dízelautóbuszokra is szükség van az úgynevezett vegyes flottában (mixed fleet).

Az akkumulátorok degradációjának nyomon követésén alapuló adatvezérelt fordított logisztika alkalmazásával a dízelautóbuszok TCO-jához képest TCO_δ megtakarítás érhető el.

$$TCO_{\delta} = TCO_e - TCO_d$$

A modell alkalmazásával elvégzett számítások azt igazolják, hogy az elektromos autóbuszok az ismertetett feltételrendszer mellett versenyképes alternatívát jelentenek belső égésű motorral üzemelő társaikhoz képest. A megtérülést javítja az akkumulátorok másodlagos felhasználási lehetősége (energiatároló). A TCO-összehasonlítást az 4. fejezetben lévő 29. ábra mutatja be. A fejezetre vonatkozó 3. tézist a 7. fejezetben fejtem ki.

6.3. Az 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 *Szilassy–Kruchina* [P/8] és társai (2022, 2023), ide vonatkozó tanulmányainak összefüggéseit vettem alapul [99], [100].

Az elektromos és dízeljárművek kilométerenkénti költségét az élettartamra vetített költségek alapján határozom meg. Az említett költségelemek közül a kétfajta hajtás között jelentős az eltérés a járműbeszerzési és a hajtási energiaköltség között. Ezeket a költségelemeket a teljes élettartam figyelembevételével kilométerre vetítve határoztam meg.

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

ahol DTD a napi fordulóterv-távolság hossza kilométerben.

Ahol: LT a jármű hasznos élettartama évben megadva, AOD az éves üzemnapok száma DTD a napi fordulóterv-távolság hossza kilométerben, a VPC: járműbeszerzési költség (Vehicle purchase cost), EC: Energiaköltség (Energy cost). Az ismertetett módszertan használatával számítható ki mind a dízelüzemű, mind az elektromos üzemű autóbuszok esetén a járművek pontos fogyasztása. A járműveket naponta egyszer tankolják, illetve feltöltik fel. A fordulóterv-távolság és a külső hőmérséklet a térség adatainak megfelelően napi szinten változik. A fogyasztásra a korábban kifejtettek szerint (1) a 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 paraméter alapján, melyek

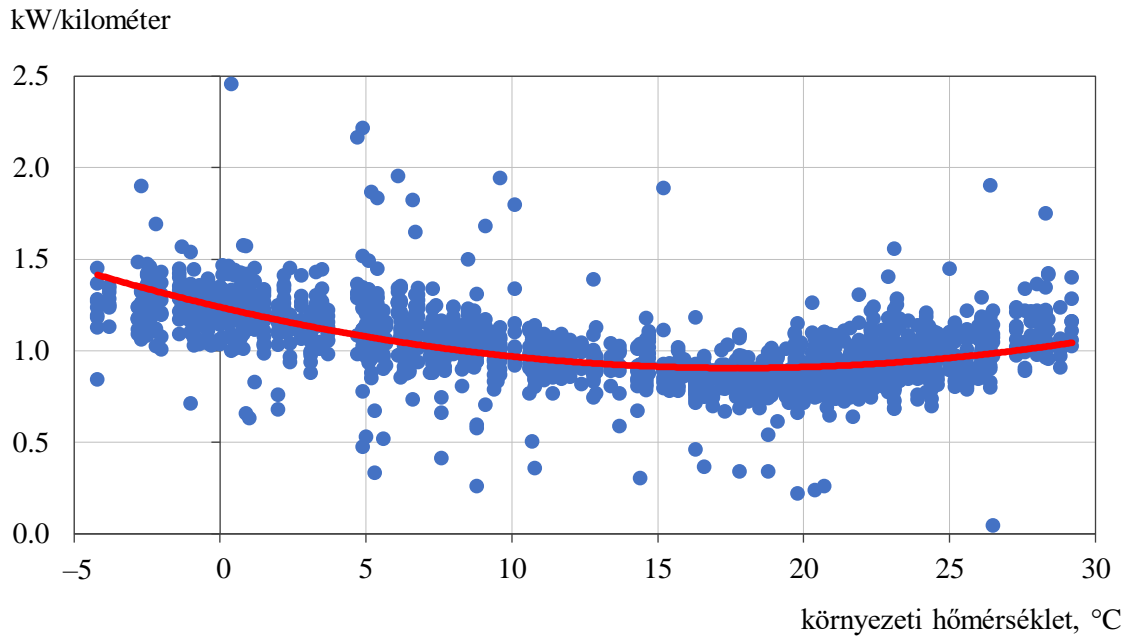
- az optimális akkumulátorméret és a
- 10 évre vonatkozó megtérülési mutató,

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

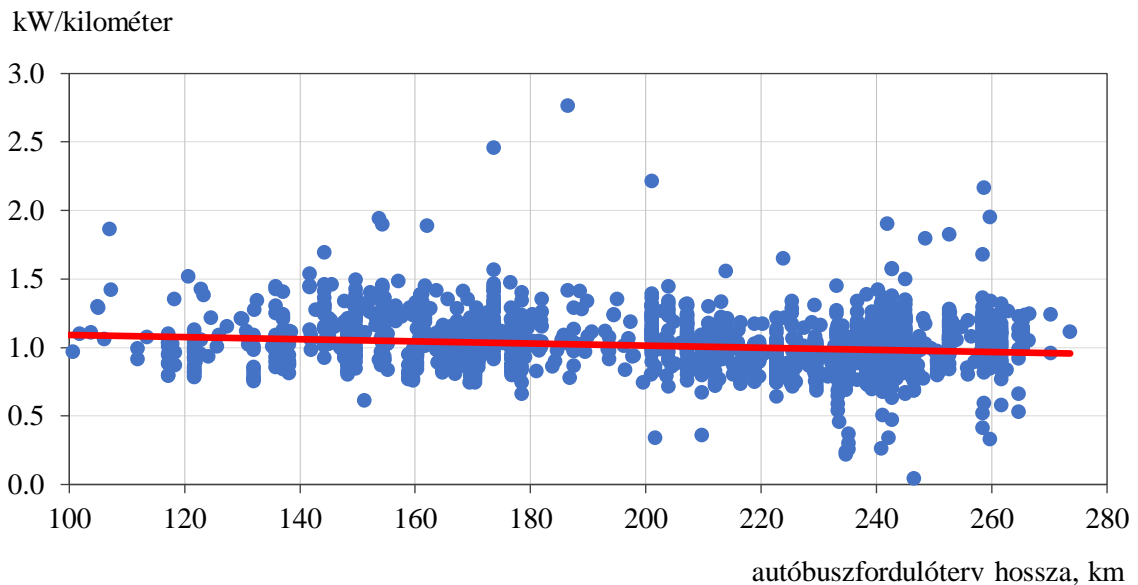
Jelenleg a Volánbusz Zrt.-nél a következő fordulóterv-szerkezet alakult ki a 2024. januári állapot szerint: míg a 300 kilométer alatti fordák száma 3098 darab, addig a 300 kilométer felettek száma 1730 darab. Megállapítható, hogy a napi fordulók több mint 60%-a 300 kilométeres teljesítményű, ami mind a szakirodalmi kutatások, mind a vállalat saját mérései alapján a jelenlegi lítium-ion akkumulátorokkal egy feltöltéssel teljesíthető. Szolnok környéki fordák közül 1897 napi autóbusz-forduló vizsgáltam 2023 júniusa és 2024 februárja között. A következőkben az adatokat átlag (szórás) alapon közlöm.

A fordulótervek átlagosan 202,7 kilométer hosszúak; 8:48 (1:48) órán keresztül tartottak, 392 (80) megállót tartalmaznak. A fordák 28 (6) járatból álltak, melyek energiaigénye 204 (55) kWh volt. Az átlagos fogyasztás 1,01 (0,2) kWh/kilométer 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 41. ábrán a következő trendet mutatják.

41. ábra: *Kilométerenkénti fogyasztás a környezeti hőmérséklet függvényében*

A megtett távolság és a kilométerenkénti fogyasztás között kialakult trendet a 42. ábra mutatja. Előzetes elgondolás alapján kijelenthető, hogy a kilométer nincs hatással a fogyasztásra, mégis a nagyobb fordák hosszabb megállóközöket tartalmaznak, amely által hosszabb fordák esetében a kilométerenkénti fogyasztás enyhén csökken.

42. ábra: *Kilométerenkénti fogyasztás az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében*

Az előzőek alapján a közép-európai (magyarországi) esetben az optimális hasznos akkumulátorméretet a 13. táblázatban mutatom be:

13. táblázat: Optimális hasznos járműakkumulátor-méret a külső hőmérséklet és az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében

°C Km	(kWh)																								
	-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	100	100	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	100	110	110	120	130	130	140
80	170	160	150	140	130	120	110	110	110	110	110	110	100	100	100	100	110	110	110	120	130	130	140	150	160
90	190	180	170	160	150	140	130	120	120	120	120	110	110	110	110	120	120	120	130	130	140	150	160	170	180
100	210	200	190	170	160	150	140	130	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	240	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	250	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	260	250	240	240	240	240	250	250	250	270	290	300	320	340	360	390

14. táblázat: A téli, a tavaszi/őszi és a nyári időjárás esetén (0 °C) használandó optimális akkumulátorméret

Hatótáv	100	150	200	250	300	350
	kilométer					
Téli időjárás esetén (0 °C)						
Akkumulátorkapacitás	160	230	300	350	400	450
Tavaszi/őszi időjárás esetén (5–6 °C)						
Akkumulátorkapacitás	140	200	250	300	340	380
Nyári időjárás esetén (18 °C)						
Akkumulátorkapacitás	120	180	220	260	300	330

Mindezek ismeretében kisebb akkumulátor használata esetén az autóbusz-fordulók összevonhatók. Ez azt is 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. Az elmúlt évek (2020–2023) középhőmérsékleti átlagértékei alapján egy adott akkumulátorkapacitású jármű különböző kilométert képes megtenni. Ebből az autóbuszforduló-tervek áttervezhetőek szélsőséges nyár/tél esetén rövidebbekre, enyhe időszak esetén hosszabbakra.

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

Továbbiakban érdemes megfontolni a középhőmérséklettől függő hosszú távú autóbuszforduló-tervek készítését, melyekben az akkumulátor mérete az optimálishoz közelebbi módon használható ki. Az optimális akkumulátorméret mellett az optimális akkumulátorkihasználtsággal (75–80%) és a degradációval szükséges számolni. Korábbi tanulmányok alapján, napi egyszeri töltéssel számolva 3000 ciklus utáni degradáció 83–84%-nak felel meg, 75–80%-os kihasználtság mellett.

15. táblázat: Optimális hasznos járműakkumulátor-méret a külső hőmérséklet és az autóbusszforduló-terv távolságának függvényében, 10 év időtartamra

Km	°C																				(kWh)				
	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30		32	34	36	38
70	-0,56	0,15	-1,35	-1,35	-1,13	-0,91	-0,91	-0,69	-0,69	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,47	-0,69	-0,91	-1,13	-1,35	-1,35	0,15
80	-1,9	-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	-0,35	-0,54	-0,54	-0,54	-0,73	-0,92	0,42	-0,21	-1,03
90	-3,63	-2,39	-1,47	-0,68	0,06	0,63	-0,59	-0,59	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,59	-0,59	0,63	0,06	-0,68	-1,47	-2,39
100	-6,13	-4,35	-3,09	-1,12	-0,4	0,27	0,80	0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	0,80	0,27	0,27	-0,4	-1,12	-3,09	-4,35
110	-10,3	-7,37	-3,81	-2,66	-1,61	-0,83	-0,17	0,45	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,45	-0,17	-0,83	-1,61	-2,66	-3,81	-5,46
120	-19,1	-9,41	-6,68	-3,37	-2,29	-1,32	-0,6	0,02	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,02	-0,6	-1,32	-2,29	-3,37	-6,68	-9,41
130	-46,9	-17,8	-8,65	-6,09	-4,42	-2,99	-1,98	-1,07	0,39	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	-1,07	-1,07	-1,98	-4,42	-6,09	-8,65	-17,8
140	N/A	-44	-16,6	-8	-5,59	-4,02	-2,67	-1,72	-0,86	-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	-16,6	-44
150	N/A	N/A	-23,8	-15,6	-7,43	-5,15	-3,67	-2,39	-1,49	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-2,39	-3,67	-5,15	-7,43	-15,6	-23,8	N/A
160	N/A	N/A	N/A	-22,5	-14,7	-6,94	-4,77	-3,36	-2,14	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-1,29	-3,36	-4,77	-6,94	-14,7	-22,5	N/A	N/A
170	N/A	N/A	N/A	N/A	-21,3	-13,9	-6,5	-4,43	-3,09	-3,09	-1,93	-1,93	-1,93	-1,93	-1,93	-1,93	-1,93	-3,09	-4,43	-6,5	-9,14	-21,3	N/A	N/A	N/A
180	N/A	N/A	N/A	N/A	-35,7	-20,3	-8,64	-6,11	-4,13	-4,13	-2,84	-2,84	-2,84	-2,84	-2,84	-2,84	-2,84	-4,13	-6,11	-8,64	-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	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-3,86	-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	-7,79	-5,45	-5,45	-3,62	-3,62	-3,62	-3,62	-3,62	-5,45	-5,45	-12	-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	-5,17	-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	-11	-7,09	-7,09	-7,09	-7,09	-11	-11	-11	-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	-28,4	-15,9	-15,9	-15,9	-15,9	-15,9	-28,4	-28,4	-28,4	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	-27,6	-27,6	-27,6	-27,6	-27,6	-27,6	-27,6	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	-26,7	-26,7	-26,7	-26,7	-26,7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Az üzemeltetési időt 10 és 20 évre (akkumulátorcserével) választva hasonlítom össze az üzemeltetést. (15–16. táblázat) A gázolaj ára az összehasonlításban 437 forint/liternek, míg az elektromos áram ára 107 forint/kWh-nak felelt meg. A teljes élettartamfutást és -költségeket véve utaskilométerre számítottam ki a költségeket, figyelembe véve, hogy nagy akkumulátorkapacitás esetén az utaskapacitás csökken. Az üres cellák azt jelölik, hogy azokon a kapacitású járműveken az utasteret gyakorlatilag (5 fő) teljesen kitölti az akkumulátor helye. A jármű beszerzési és üzemeltetési költségét kilométerre vetítve számítottam ki, majd ezt követően a dízeléből kivontam az elektromos jármű kilométerköltségét. A pozitív eredményt zölddel, a –0,5 forint/utaskilométer felettit pedig világoszölddel jelöltem. (–0,5 forint/utaskilométer körülbelül 25–26 millió forinttal drágább üzemeltetést jelent.) A többi szerviz- és személyzeti költséggel nem számoltam, mert a szervizköltség mindegyik típus esetén hasonlóan tekinthető, míg a személyzeti költség azonos.

A bemutatott esettanulmányból megállapítottam, hogy a jelenlegi, nem a leghatékonyabb vezetési stílust és üzemeltetést tekintve optimális akkumulátorméret használatával a 80–130 kilométer hosszú fordák esetén kaphatóak 20 év üzemi időre kedvezőbb költségek. A 15. és 16. táblázatban közölöm a hasznos energiára vonatkozó akkumulátorméreteket.

Ennek értelmében a 70–140 kilométeres flottákat érdemes optimális esetben elektromos üzeművé tenni. Ez Szolnok esetében 75 futást jelent az elektromos autóbuszok esetében, ami a fordák 4%-a. Ez a 4% közlekedik valójában optimálisan, a többi esetben lehetséges, hogy a dízeljármű költséghatékonyabb lehet.

A technológia fejlődésével nagyobb városi flotta, hosszú távon pedig a távolsági utazási flotta is elektrifikálható lesz. Ezen az elektrifikáción túl ezzel a példával felhívnom a figyelmet arra, hogy ne csak elektrifikáljunk, hanem optimális elektromosautóbusz-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, továbbá a megmaradt akkumulátorkapacitás újrahasznosítása tárolóként.

16. táblázat: Optimális hasznos járműakkumulátor-méret a külső hőmérséklet és az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében, 20 év időtartamra

°C Km	(kWh)																								
	-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	-0,33	-0,16	0,16	0,02	0,19	0,19	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	0,7	-0,19	-0,19	-0,04	0,12	0,12	0,12	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,12	0,12	0,12	-0,04	-0,19	-0,19	0,7	0,25	-0,33
90	-2,16	-1,27	-0,62	-0,06	0,47	0,88	0,06	0,06	0,2	0,2	0,2	0,33	0,33	0,33	0,33	0,2	0,2	0,2	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	1,02	0,26	1,02	0,26	0,26	0,38	0,38	0,38	0,38	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	-0,7	-0,14	0,34	0,79	0,79	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	0,79	0,34	-0,14	-0,7	-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	1,23	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	-1,7	-0,97	-0,3	0,19	0,61	0,61	0,61	1,01	1,01	1,01	0,61	0,61	0,61	-0,3	-0,3	-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	-11	-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	-1,27	-2,21	-3,31	-4,99	-11	-17	N/A
160	N/A	N/A	N/A	-16,2	-10,4	-4,65	-3,04	-2	-1,1	-1,1	-0,46	-0,46	0,11	0,11	-0,46	-0,46	-1,1	-1,1	-2	-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	-1,8	-1,8	-0,94	-0,94	-0,34	-0,34	-0,94	-0,94	-1,8	-1,8	-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	-2,6	-2,6	-1,63	-1,63	-0,8	-0,8	-1,63	-1,63	-2,6	-2,6	-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	-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	-8,19	-5,14	-5,14	-3,43	-3,43	-3,43	-3,43	-5,14	-5,14	-5,14	-13	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	N/A	-22	-12,1	-12,1	-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	N/A	-21,3	-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	-20,7	-20,7	-20,7	-20,7	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	-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

7. Az értekezés tézisei

1. tézis: Értekezésemben feltártam az autóbusszal szolgáltató közúti közlekedési vállalkozásoknál eddig alkalmazott üzemeltetési modellek eredményeit és hiányosságait, valamint egy innovatív, adatvezérelt, körforgásos logisztikai modellt alkottam. E modell alapján megállapítható, hogy a közlekedési, az energetikai és a visszautas logisztikai folyamatok összekapcsolásával egy gazdaságilag, környezetvédelmileg és társadalmilag is fenntartható működés biztosítható.

A nemzetközi és a hazai szakirodalom bemutatásával ismerttettem az autóbusszos közösségi közlekedés jelenlegi és jövőbeni kihívásait. A változások legfontosabb elemei az EU-s és hazai jogszabályok, irányelvek, illetve célkitűzések, amelyek alapján törekedni kell a tiszta járművek beszerzésére, ezáltal eleget téve a környezetvédelmi előírásoknak, valamint elő kell segíteni a fosszilis energiától való függőség csökkentését.

A járműiparban megjelent elektrifikációs forradalom a személygépjárműveken túlmenően jelenleg már az *autóbusszoknál* is észlelhető. Az ebből fakadó technológiai és jogszabályi változások jelentős kihívások elé állítják az *autóbusszos operátorokat*. A szakirodalom ismertetése azt mutatja, hogy a tudományos művek szerzői egyelőre még nem alkottak meg egy olyan jól *működő logisztikai modellt, amely a vállalat gazdasági fenntarthatóságát hosszú távon biztosítja a környezetvédelmi és technológiai átmenet implementálásakor. Rávilágítottam arra, hogy az elektromos autóbusszokat nem önálló egységnek, hanem egy komplex logisztikai rendszer entitásának kell tekinteni.*

Az 1. tézisemben egy olyan innovatív, valós idejű adatokon alapuló döntéshozatali logisztikai modellt alkottam meg, amely a vállalaton belül és kívül mind ez ideig szigetyszerűen működő entitásokat *összekapcsolja*. A modell segítségével az autóbusszos operátorok számára a fenntartható közlekedés – a környezetvédelmi előírásokra figyelemmel – hosszú távon biztosítható. Számításokkal mutattam be, hogy kialakítható egy olyan gazdasági és műszaki környezet, amelyik az elektrifikációt, a zöld átállást gazdaságilag is fenntartható módon segíti elő ([P/1], [P/2], [P/3], [P/4], [P/5], [P/6]).

2. tézis: Feltártam azokat a szempontokat, kritériumokat és tényezőket, amelyek az innovatív üzemeltetési modellben a közlekedéslogisztikai folyamat releváns entitásai, valamint meghatározzák az autóbusszflotta optimális kialakításának módszertanát és döntéshozatali modelljét. Elemeztem a döntési modelleket, majd alkalmaztam az életciklus-költségelemzést, melyben a teljes életciklusra jutó költségeket határoztam meg az elektromos, dízel-, CNG- és vegyes meghajtású autóbussztípusokra. Végül kialakítottam az autóbusszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételét szolgáló döntési modellt. Ennek alapján a különböző meghajtású (elektromos, dízel, CNG és vegyes) autóbusszflották életciklusköltségeinek, karbonlábnyomának és ügyfél-elégedettségének elemzésével, illetve összehasonlításával meghatározható a különböző üzemű autóbusszflottát használó vállalat optimális járműösszetétele.

Elemzésemmel rávilágítottam olyan hiányosságokra, amelyek nehezítették a zöld átállás gazdaságilag is jövedelmező üzemeltetési módját. Megalkottam egy olyan általános matematikai modellt, melynek segítségével az autóbuszos operátorok meg tudják határozni a számukra optimális autóbuszflottát. A 2. tézis ismertetésekor bemutattam azokat a változókat, amelyek befolyásolják az autóbusz-beszerzés folyamatát. A döntési modell megalkotásakor figyelembe vettem a teljes tulajdonlási költséget, a karbonlábnyomot és az ügyfél-elégedettséget, amelyeket standardizáltam. A modellt azért nevezem általánosnak, mert az operátorok tetszőlegesen tudnak súlyokat adni ennek a három változónak, saját igényeiknek megfelelően. A matematikai modellt gyakorlati példán keresztül teszteltem, amelyben saját méréseim során kapott adatokat használtam fel. A saját adatgyűjtések által kapott eredményeket a nemzetközi szakirodalomban ismertetett adatokkal ellenőriztem, és az összehasonlítás nem mutatott szignifikáns eltérést ([P/7], [P/8]).

3. tézis: Feltártam azokat a tényezőket, amelyek az elektromos járművek vontató akkumulátorainak környezetvédelmi és gazdasági szempontjait befolyásolják. Az akkumulátoregységek második életciklusának megtervezése és a visszautas logisztika megoldásainak alkalmazása az elektromos buszok teljes tulajdonlási költségét javítják.

Az 1. tézisben megalkotott döntéshozatali modellben a körforgásos gazdaságnak rendkívül jelentős szerepe van. A 3. tézisben ismertettem az elektromos autóbuszokban megtalálható akkumulátorok újrahasznosításának logisztikai modelljét. Bemutattam egy olyan táblázatot, amely segítségével meghatározható az optimális akkumulátorhasználat. A módszer segítségével egy operátor számára kimutatható az optimális töltés-kisütés ciklus, továbbá a gazdaságilag még hasznos akkumulátor másodlagos felhasználása. Kifejtettem továbbá, hogy az autóbusz esetében az akkumulátort nem csupán energiaforrásként lehet használni, hanem egy degradációs pontnál érdemes az autóbusból kiszerezni, és a továbbiakban energiatárolóként működtetni, végül pedig hulladékként komponenseire bontani és újrahasznosítani. Ezzel a logisztikai modellel az operátorok számára az elektromos autóbuszok versenyképessé tehetőek, így hosszú távon gazdaságilag is biztosítható a zöld átmenet ([P/8], [P/9], [P/10]).

8. Összefoglalás

8.1. A tézisek tudományos és gyakorlati megalapozottsága

A disszertáció bevezetőjében ismertettem a téma aktualitását, a témában rejlő nehézségeket, tudományos kihívásokat. Bemutattam, hogy a logisztika és az informatika tudománya hogyan tud hozzájárulni a disszertációban megfogalmazott klímapolitikai célokhoz, amelyek jogszabályi kötelezettségek is egyben. A dolgozat első részeiben áttekintettem, a témához kapcsolódó nemzetközi szakirodalmat, amely több mint 100 művet és 93 hivatkozást tartalmaz. Ismertettem azon tudományos módszertanokat, amelyekkel alátámasztottam téziseimet. Több mint egy éven keresztül többszáz műszaki adatot gyűjtöttem 100 elektromos autóbusról és közel 50 elektromos töltőről. Önálló mérést végeztem használt akkumulátorokon, amelyek eredményeit összehasonlítottam a nemzetközi szakirodalomban megtalálható adatokkal. Végül az egyes téziseket esettanulmányokkal igazoltam, ezzel is alátámasztva az elméleti modellek gyakorlati alkalmazhatóságát.

A disszertációban megfogalmazott tézisek rendszerszemléletű és innovatív választ adnak a közlekedési logisztika területén az elektrifikációs és dekarbonizációs folyamatokkal összefüggő jelentős kihívásokra. Az 1. tézis jelentősége abban van, hogy komplex modellként tekint a rendkívül összetett rendszer elemeire, entitásaira és az így kialakuló ökoszisztémára. A modell segítségével az autóbusz-üzemeltető vállalatok elérhetik a lokálisan zéró emissziót oly módon, hogy nem csupán környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is fenntartható a vállalat hosszú távú működése. Az 1. tézisben ismertetett modellt egy esettanulmányon keresztül validáltam, amely bizonyította a modell gyakorlati alkalmazhatóságát. Az esettanulmányban két különböző scenáriót vizsgáltam, az egyikben a szükséges energiát, áramot éjszaka veszi fel az elektromos busz, míg a másikban komplex rendszert ismertettem, ahol tárolót, napelemet telepítek a telephelyekre, és a vállalat mint áramkereskedő is megjelenik a piacon, hiszen a megtermelt, fel nem használt áramot értékesíti az árampiacon. Mindkét scenárió eredménye alátámasztja az elméleti modell használhatóságát, tehát a hosszú távú működés – bizonyos paraméterek mellett – gazdaságilag is fenntarthatóvá válhat a vállalat számára, és így biztosítható a zöld átmenet.

A 2. tézis a komplex rendszer egy olyan elemére ad innovatív szemléletű megoldási javaslatot, amelynek feladata a változó energiaellátási erőforrásokhoz igazodó, hosszú távon fenntartható, zöld közlekedési logisztikai rendszer működtetése. Az e tézisben megalkotott matematikai modell alapján az üzemeltetők meghatározhatják az optimális flottaösszetételt. Részletes szakirodalmi elemzéssel megállapítottam, hogy az ideális flotta kiválasztásának folyamatából több lényeges összetevő hiányzik, ami akár hibás döntéshozatalhoz is vezethet. E tényezők közé tartozik az akkumulátorok másodlagos életciklusának, a fenntarthatóságnak és a logisztikának a figyelembevétele. E tézis kidolgozásának keretében egy általános és innovatív döntéshozatali módszert határoztam meg, amely a megfelelő flottatípus kiválasztásával kiküszöböli ezeket a hiányosságokat. A módszert a Volánbusz Zrt., valamint egy nemzetközi tanulmány M. di Pasquale és szerzőtársai [95] adatai alapján ismertettem,

melynek eredményeként megállítható, hogy az elektromos busz mindenhol a legjobb működési értéket szerezte meg.

A 3. tézis az elektromos járművek zéró emissziós működése szempontjából kritikus elemnek számító vontató akkumulátoroknak a logisztikai körfolyamatba illesztését vizsgálja, amelyben szerepet kap a visszautas logisztika és az akkumulátorok második élelciklusának komplex rendszerbe integrálása. A megalkotott modell alkalmazhatóságát ebben az esetben is egy esettanulmánnyal igazoltam. Bebizonyítottam, hogy amennyiben sikerül optimális akkumulátorméretet megadnom az elektromos autóbuszok üzemeltetéséhez, és az e tézisben ismertetett modell alapján meg tudom határozni az optimális töltés-merítés intervallumot, akkor elérhető az akkumulátoroknál a legnagyobb ciklusszám. Ezzel biztosítható az akkumulátorok második élelciklusának műszaki és gazdasági szempontból is optimális felhasználása, amely javítja az elektromos autóbuszok teljes tulajdonlási költségeit.

8.2. További kutatási irányok

Érdeemes tovább kutatni az informatika, az energetika és a körforgásos gazdaság logisztikai hálózatának összefüggéseit. Kérdés, az Ipar 4.0 módszere milyen módon tudna hozzájárulni egy környezeti és gazdasági szempontból is fenntartható közlekedéshez, illetve az Ipar 4.0-án belül rohamosan fejlődő mesterséges intelligencia milyen módon fogja támogatni a valós idejű, adatalapú vállalati döntések meghozatalát, melynek segítségével még gyorsabban elérhető a két legfontosabb kitűzött cél: a környezetvédelem és a gazdasági hatékonyság.

A javasolt komplex rendszernek fel kell tudni dolgoznia az egyre szélesebb körben elterjedő megújuló energiákra alapozott közlekedéslogisztikai rendszerek üzemszerű működésével járó kockázatokat és az azok kezelésére alkalmas módszereket. Elemzések sora hívja fel a figyelmet arra, hogy a fosszilis energiáról történő leválás milyen kihívás elé állítja a megújuló energiaforrásokra átálló felhasználókat ([101], [102]).

Az autóbuszflották kialakítása esetében is vannak intő példák arra, hogy az összetétel optimális diverzifikálása nélkül akár közlekedési káoszhoz is vezető nehézségekkel találkozhatunk szembe magunkat. Többek között a klimatikus viszonyok extrém változása is okozhatja ezt, mint Hollandiában és Németországban, valamint a közelmúltban az oslói helyi közlekedést kiszolgáló elektromos autóbuszok esetében. Utóbbiakra kizárólag elektromos autóbuszokkal teljesíthető koncessziókat hirdettek meg, azonban a helyenként -16 °C -os téli hideg kifogott a járműveken [103].

A használt akkumulátorok újrahasznosításának fontosságát jelzi, hogy hét japán cég összefogásából létrejövő megegyezés szerint 2027-re bevezetik az „akkumulátor-útlevelet”, amely megmutatja az akkumulátorok romlásának mértékét és maradványértékét, ami elősegíti a visszautas logisztika alkalmazását is [104].

A közlekedési vállalkozásoknál működő komplex rendszerek irányításában az adatvezérelt döntéshozatal előtérbe kerülését és a korszerű informatikai rendszerrel támogatott monitoringfolyamatok szerepét emelik ki azok a kutatási eredmények is, amelyeket egy Q2-es minősítésű tudományos folyóiratban – társszerzőként – publikáltam [P/11].

9. Irodalomjegyzék

9.1. Értekezés témakörében használt saját publikációk

- [P/1] KRUCHINA, V. (2023): The industrial revolution of our age: the opportunities in the electrification of public transport buses *Advanced Logistic Systems – Theory and Practice*, 17 (1): 21–26.
- [P/2] KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T. (2023): Az elektrifikáció térnyerése és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepe a fenntartható közösségi közlekedésben, I. rész *Közlekedéstudományi Szemle*, 73 (3): 17–34. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.3.2>
- [P/3] KRUCHINA, V., SÁRKÖZI, Gy. T. (2023): Az elektrifikáció térnyerése és az elektromos autóbuszok kiemelt szerepe a fenntartható közösségi közlekedésben, II. rész *Közlekedéstudományi Szemle*, 73 (4): 4–12. <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. (2023): The possibility of electrification in public transport bus services *Acta Technica Jaurinensis*, 16 (4): 158–166. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00713>
- [P/6] KRUCHINA, V., TAMÁS, P., SÁRKÖZI, Gy. T., ILLÉS, B. (2024): Autóbuszflottát üzemeltető vállalatok innovatív működési modellje *Advanced Logistic Systems – Theory and Practice* 18 (3) 43–57. <https://doi.org/10.32971/als.2024.027>
- [P/7] KRUCHINA, V., TAMÁS, P., ILLÉS, B. (2024): An innovative decision-making method for choosing a bus fleet based on logistics and sustainability aspects *Acta Logistica – International Scientific Journal about Logistics* 11 (4): 559–568. <https://doi.org/10.22306/al.v11i4.544>
- [P/8] SZILASSY, P. Á., KRUCHINA, V. (2024): *Vegyes autóbuszflotta optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló módszertan az autóbusz-fordulóterv figyelembevételével* CoTS, Győr.
- [P/9] KRUCHINA, V., ILLÉS, B., TAMÁS, P. (2023): The importance of inverse logistics for public transport companies operating a large battery electric bus fleet *Advanced Logistic Systems – Theory and Practice* 17 (4): 23–32.
- [P/10] KRUCHINA, V. (2024): *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 (CECOL) 2024.
- [P/11] SZILASSY, P., Á., LACSNY, M., KRUCHINA, V. (2025): Concepts of Complex Road Information Systems in Urban Areas *Acta Polytechnica Hungarica* 22 (3): 79–99.

9.2. 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 CO₂-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
- [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. (2023): *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. (2023): *Lantos Csaba az Indexnek*.
<https://index.hu/gazdasag/2023/01/25/energia-lantos-csaba-ellatasbiztonsag-gazszerzodes-elektromos-aram-paks-mol-mvm-megujulo-energia/>
- [8] M. ORBÁN, A. (2023): *Nem csökken a villamosenergia-igény Magyarországon*.
<https://magyarnemzet.hu/gazdasag/2023/02/nem-csokken-a-villamosenergia-igeny-magyarorszagon-2>
- [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, M., LAJOSNÉ TÖRÖK, M., MAKRA, N., MÉSZÁROS-PINTÉR, Sz. (2023): *A fenntartható zöld közlekedés lehetőségeinek vizsgálata*.
<https://www.mkt.hu/wp-content/uploads/2023/02/A-fenntarthato-zold-kozlekedes-lehetosegeinek-vizsgalata.pdf>
- [12] EURÓPAI 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
- [13] *Literature review*. <https://wikis.ec.europa.eu/display/ExactExternalWiki/Literature+review>
- [14] MENGIST, W., SOROMESSA, T., LEGESE, G. (2020): *Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research* *MethodsX* 7: 100777.

- [15] KAMARÁSI, V., MOGYORÓSY, G. (2015): Szisztematikus irodalmi áttekintések módszertana és jelentősége. Segítség a diagnosztikus és terápiás döntésekhez *Orvosi Hetilap*, 156 (38): 1523–1531.
- [16] BORÉN, S., NURHADI, L., NY, H. (2016): 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*, 10 (3).
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:911643/FULLTEXT01.pdf>
- [17] PELLETIER, S., JABALI, O., MENDOZA, J. E., LAPORTE, G. (2019): The electric bus fleet transition problem *Transportation Research Part C: Emerging Technology*, 109 (December): 174–193.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X1930868X>,
- [18] LI, X., GORGUINPOUR, C., SCLAR R., CASTELLANOS, S. (2019): *How to enable electric bus adoption in cities worldwide*, World Resources Institute, Ross Center,
<https://www.wri.org/research/how-enable-electric-bus-adoption-cities-worldwide>
- [19] EDITORIAL (2019): *Why the automotive future is electric* McKinsey Center for Future Mobility, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/why-the-automotive-future-is-electric>
- [20] AAMODT A., CORY, K., CONEY, K. (2021): *Electrifying transit: a guidebook for implementing battery electric buses* National Renewable Energy Laboratory,
<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>
- [21] SHAH, K. J., PAN, S-Y., LEE, I., KIM, H., YOU, Z., ZHENG, J-M., CHIANG, P-C. (2021): Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies *Journal of Cleaner Production* 326: 129392.,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129392>
- [22] LI, L., LO, H. K., XIAO, F., CEN, X. (2018): Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 60 (May): 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.001>
- [23] LI, L., LO, H. K., XIAO, F. et al. (2019): Mixed bus fleet scheduling under range and refueling constraints *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 104 (July): 443–462.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.009>
- [24] LEE, J., SHON, H., PAPAKONSTANTINO, I., SON, S. (2021): Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100 (November): 103066.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103066>
- [25] CUI, S., GAO, K., YU, B., MA, Z., NAJAFI, A. (2023): Joint optimal vehicle and recharging scheduling for mixed bus fleets under limited chargers *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 180 (December): 103335.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103335>
- [26] WEI, R., LIU, X. C., OU, Y. (2018): Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system *Journal of Transport Geography*, 68: 160–168.
<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.03.013>

- [27] FIORI, Ch., MONTANINO, M., NIELSEN, S., SEREDYNSKI, M., VITI, F. (2021): Microscopic energy consumption modelling of electric buses: model development, calibration, and validation *Transportation Research Part E*, 98: 102978. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102978>
- [28] DIRKS, N., SCHIFFER, M., WALTHER, G. (2022): On the integration of battery electric buses into urban bus networks *Transportation Research Part C, Emerging Technologies*, 139 (June): 103628. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103628>
- [29] HARRIS, A., SOBAN, D., SMYTH, B. M., BEST, R. (2018): Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies *Renewable and Sustainable Energy Review*, 97 (December): 569–579. <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. (2022): Overview of batteries and battery management for electric vehicles *Energy Reports*, 8 (November): 4058–4084. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016>
- [32] BMZ-POLAND (2021): *Lithium-ion battery technology in e-buses, according to BMZ Poland*. <https://www.sustainable-bus.com/news/bmz-poland-lithium-ion-battery-technology-electric-buses/>
- [33] 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/>
- [34] 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/>
- [35] CHEN, L., TIAN, B., LIN, W., JI, B., LI, J., PAN, H. (2015): Analysis and prediction of the discharge characteristics of the lithium-ion battery based on the Grey system theory *IET Power Electronics, Research Article*, 8 (12): 2361–2369. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-pel.2015.0182>
- [36] TSENG, K-H., LIANG, J-W., CHANG, W., HUANG, S-C. (2015): Regression Models Using Fully Discharged Voltage and Internal Resistance for State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries *Energies*, 8 (4): 2889–2907. <https://doi.org/10.3390/en8042889>
- [37] GAO, Z., LIN, Z., LACLAIR, T. J., LIU, C., LI, J-M., BIRKY, A. K., WARD, J. (2017): Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service *Energy*, 122 (1 March): 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>
- [38] SCHIFFER, M., WALTHER, G. (2017): The electric location routing problem with time windows and partial recharging *European Journal of Operational Research*, 260 (3) 995–1013. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.011>
- [39] WANG, Y. HUANG, Y., XU, J., BARCLEY, N. (2017): *Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis* World Transit Research. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- [40] ROGGE, M. VON DER HURK, E., LARSEN, A., SAURER, D. U. (2018): Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure *Applied Energy*, 211 (February): 282–295. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051>

- [41] LIN, Y., ZHANG, K., SHEN, Z-J., YE, B., MIAO, L. (2019): Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107 (October): 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>
- [42] HE, Y., LIU, Z., SONG, Z. (2020): Optimal charging scheduling and management for a fast-charging battery electric bus system *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142 (October): 102056. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102056>
- [43] LIU, T., CEDER, A. (2020): Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 114 (May): 118–139. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.009>
- [44] HE, Y., LIU, Z., SONG, Z. (2023): Joint optimization of electric bus charging infrastructure, vehicle scheduling, and charging management *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 117 (April): 103653. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103653>
- [45] JEFFERIES, D., GÖHLICH, D. (2020): 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*, 11 (3): 56. <https://doi.org/10.3390/wevj11030056>
- [46] HOMAN, J. (2018): *Description of a S-N Curve* Fatec Engineering. <https://www.fatec-engineering.com/2018/02/20/description-of-a-s-n-curve/>
- [47] XU, B., OUDALOV, A., ULBIG, A., ANDERSSON, G. (2016): Modelling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (2): 1131–1140. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>
- [48] HAN, X., LU, L., ZHENG, Y., FENG, X., LI, Z., LI, J., OUJANG, M. (2019): A review on the key issues of the lithium ion battery degradation *eTransportation*, 1 (August): 100005. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.100005>
- [49] SEVERSON, K. A., ATTIA, P. M., JIN, N., PERKINS, N. (2019): Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation *Nature Energy*, 4 (5): 1–9. <https://www.nature.com/articles/s41560-019-0356-8>
- [50] JOHNEN, M., PITZEN, S., KAMPS, U., KATERI, M., DECHENT, P., SAUER, D. U. (2021): Modelling long-term capacity degradation of lithium-ion batteries *Journal of Energy Storage*, 34 (February): 102011. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102011>
- [51] SHCHUROV, N. I., DEDOV, S. I., MALOZYJONOV, B. V., SHLANG, A. A., MARTYUSHEV, N. V., KLYUEV, R. V., ANDRIASHIN, S. N. (2021): Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex *Energies*, 14 (23): 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>
- [52] ZHANG L., WANG, S., QU, X. (2021): Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 154 (October): 102445. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102445>
- [53] O’KANE, S. E., KIRKALDY, N., OFFER, G. J., MARINESCU, M. (2022): Lithium-ion battery degradation: How to model it *Physical Chemistry Chemical Physics*, 24: 7909–7922. <https://doi.org/10.1039/D2CP00417H>

- [54] DE LA VEGA, J., RIBA, J. R., ORTEGE, J. A. (2023): Mathematical Modelling of Battery Degradation Based on Direct Measurements and Signal Processing Methods *Applied Sciences*, 13 (8): 4938. <http://dx.doi.org/10.3390/app13084938>
- [55] HEYMANS, C., WALKER, S. B., YOUNG, S. B., FOWLER, M. (2014): Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-levelling *Energy Policy*, 71 (August): 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.016>
- [56] CASALS L-C., GARCIA, B.A., CANAL, C. (2019): Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis *Journal of Environmental Management*, 232 (February): 354–363. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.046>
- [57] ISERNIA, R., PASSARO, R., QUINTO, I., THOMAS, A. (2019): The Reverse Supply Chain of the E-Waste Management Processes in a Circular Economy Framework: Evidence from Italy *Sustainability*, 11 (8): 2430. <https://doi.org/10.3390/su11082430>
- [58] WEF (2019): *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. https://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf
- [59] BERGH, W. (2020): *Mapping the European reverse logistics of electric vehicle batteries* Lund University, Faculty of Engineering. <https://lup.lub.lu.se>
- [60] PREGER, Y., BARKHOLTZ, H., M., PRESQUEZ, A., CAMPBELL, D. I., JUBA, D. W., ROMÁN-KUSTAS, J., FERREIRA, S. R., CHALAMALA, B. (2020): Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions *Journal of The Electrochemical Society*, 167: 120532. <http://www.doi.org/10.1149/1945-7111/abae37>
- [61] ILLA FONT, C. H., SIQUEIRA, H. V., NETO, J. E. M., FERREIRA, J. L. (2023): Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: Short Review and Perspectives *Energies*, 16 (2): 953. <http://dx.doi.org/10.3390/en16020953>
- [62] ZHAU, J. ZHU, Y., ZHANG, B., LIU, M., WANG, J., LIU, C., HAO, X. (2023): Review of State Estimation and Remaining Useful Life Prediction Methods for Lithium–Ion Batteries Prediction Methods for Lithium–Ion Batteries *Sustainability*, 15: 5014. <https://doi.org/10.3390/su15065014>
- [63] KOHUT, ZS., NAGY, A., DOBOS, I. (2005): A visszautas logisztika: egy fogalmi keret *Vezetéstudomány*, 36 (2): 47–54.
- [64] AKKAD, M. A., RABEE, R., BÁNYAI, T. (2022): Energy efficiency optimization of last mile supply system with reverse logistics consideration *Acta logistica – International Scientific Journal about Logistics*, 9 (3): 315–323. <https://DOI.org/10.22306/al.v9i3.315>
- [65] YÜKSELTÜRK, A., WEWER, A., PILGE, P., DIETRICH, F. (2020): *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>
- [66] AZADNIA, A., H., ONOFREI, G., GHADIMI, P. (2021): Electric vehicles lithium-ion batteries reverse logistics implementation barriers analysis: A TISM-MICMAC approach *Resources, Conservation & Recycling*, 174: 105751. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105751>

- [67] HAO, H., SUN, Y., MEI, X., ZHOU, Y. (2021): Reverse Logistics Network Design of Electric Vehicle Batteries considering Recall Risk *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2021, Article ID 5518049, 16 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/5518049>
- [68] GONZALES-GALIENCES, G., YU, B., BENSEBAA, F. (2022): 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*, 14 (22): 15321. <https://doi.org/10.3390/su142215321>
- [69] ZHAO, G., WANG, X., NEGNEVITSKY, M. (2022): Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management *iSCIENCE*, 25 (2): 103744. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>
- [70] BARMAN, P., DUTTA, L., AZZOPARDI, B. (2023): Electric Vehicle Battery Supply Chain and Critical Materials: A Brief Survey of State of the Art *Energies*, 16 (8): 3369. <https://doi.org/10.3390/en16083369>
- [71] HARPER, G., KENDRICK, E., ANDERSON, P., MROZIK, W., CHRISTENSEN, P., LAMBERT, S., GREENWOOD, D., DAS, P. K., AHMEID, M., MILOJEVIC, Z. (2023): Roadmap for a sustainable circular economy in lithium-ion and future battery technologies *Journal of Physics: Energy*, 5 (2). <https://doi.org/10.1088/2515-7655/aca57>, PDF
- [72] TINNES, E., PEREZ, F., KANDER, M., PROBST, T. (2024): *Decarbonizing logistics: Charting the path ahead* McKinsey&Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decarbonizing-logistics-charting-the-path-ahead>
- [73] OFFER, G., J., HOWEY, D., CONTESTABILE, M., CLAGUE, R., BRANDON, N. P. (2010): Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system *Energy Policy*, 38 (1): 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040>
- [74] FENG, W., FIGLIOZZI, M. (2013): 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*, 26 (1): 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>
- [75] LAJUNEN, A. (2014): Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008>
- [76] NURHADI, L., BORÉN, S., NY, H. (2014): A sensitivity analysis of total cost of ownership for electric public bus transport systems in Swedish medium sized cities *Transportation Research Procedia*, 3: 818–827. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.058>
- [77] ZHOU, B., WU, Y. ZHOU, B., WANG, R., KE, W., ZHANG, S., HAO, J. (2016): Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions *Energy*, 96 (2): 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>
- [78] KUNITH A., MENDELEVITCH, R., GOELICH, D. (2017): 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*, 11 (10) 707–720. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>

- [79] LAJUNEN, A. (2018): Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods *Journal of Cleaner Production*, 172 (1): 56–67.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066>
- [80] LOZANOVSKI, A., WHITEHOUSE, N., KO, N., WHITEHOUSE, S. (2018): Sustainability Assessment of Fuel Cell Buses in Public Transport, *Sustainability*, 10 (5): 1480.
<https://doi.org/10.3390/su10051480>
- [81] VORA, A. P., JIN, X., GOSALA, V., SHAVER, G. (2018): 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*, 233 (6): 095440701880266. <http://dx.doi.org/10.1177/0954407018802663>
- [82] BARRAZA, O., ESTRADA, M. (2021): Battery Electric Bus Network: Efficient Design and Cost Comparison of Different Powertrains *Sustainability*, 13 (9): 4745.
<https://doi.org/10.3390/su13094745>
- [83] KIM, H., HARTMANN, N., ZELLER, M., LUISE, R., SOYLU, T. (2021): Comparative TCO Analysis of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Buses for Public Transport System in Small to Midsize Cities *Energies*, 14 (14): 4384. <https://doi.org/10.3390/en14144384>
- [84] POLOM, M., WISNIEWSKY, P. (2021): A Review of Experiences and Evaluation of the Current Development Directions *Sustainability*, 13 (7): 4009.
<https://doi.org/10.3390/su13074009>
- [85] AGER-WICK ELLINGSEN, L., THORNE, R. J., FIGENBAUM, E., WIND, J. (2022): Life cycle assessment of battery electric buses *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112 (9):103498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2022.103498>
- [86] ABDELATY H., FODA, A., MOHAMED, M. (2023): The Robustness of Battery Electric Bus Transit Network under Charging Infrastructure Disruption *Sustainability*, 15 (4): 3642.
<https://doi.org/10.3390/su15043642>
- [87] TURNER, S., ULUDAG, S. (2015): *Towards Smart Cities: Interaction and Synergy of the Smart Grid and Intelligent Transportation Systems* 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
- [88] BORÉN, S. (2020): Electric buses sustainability effects noise energy use and costs *International Journal of Sustainable Transportation*, 14 (122020).
<https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>
- [89] BAUER, C., BURGHARDT, S., DASGUPTA, N. P., AGER-WICK ELLINGSEN, L. (2022): Charging sustainable batteries *Nature Sustainability*, 5 (3): 176–178.
<http://dx.doi.org/10.1038/s41893-022-00864-1>
- [90] MCGRATH, T., BLADES, L., EARLY, J., HARRIS, A.: (2022) UK battery electric bus operation: Examining battery degradation, carbon emissions and cost *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109 (August): 103373.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103373>
- [91] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2023): *Do lower speed limits on motorways reduce fuel consumption and pollutant emissions?*
<https://www.eea.europa.eu/themes/transport/speed-limits-fuel-consumption-and>

- [92] 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>
- [93] LINDER, M., NAUCLÉR, T., NEKOVAR, S., PFEIFFER, A., VEKIĆ, N. (2023): *The race to decarbonize electric-vehicle batteries* McKinsey & Company.
<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-race-to-decarbonize-electric-vehicle-batteries>
- [94] GLISTAU, E. (2024): *Logistics as a science and the formation of logistic thinking*, International Conference on Logistics, CECOL 2024, University of Miskolc.
- [95] PASQUALE, M., PISCITELLI, R., D'OVIDIO, G., TOTANI, G. D., ANGELO, L. (2023): *Local Public Transport Operative Total Cost of Ownership Analysis in Relation to the Technology Transition Phase* Conference: Transport Means – Proceedings of the International Conference Volume 2023-October, Pages 611 – 616 2023 27th International Scientific Conference on Transport Means 2023At: Palanga, Lithuania.
https://www.researchgate.net/publication/376951282_Local_Public_Transport_Operative_Total_Cost_of_Ownership_Analysis_in_Relation_to_the_Technology_Transition_Phase
- [96] ELECTRICITY MAPS: *Climate Impact by Area*. <https://app.electricitymaps.com/>
- [97] WEF (2022): *The world needs 2 billion electric vehicles to get to net zero. But is there enough lithium to make all the batteries?* <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/electric-vehicles-world-enough-lithium-resources/>
- [98] IEA (2021): *Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector*.
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [99] SZILASSY, P. Á., FÖLDES, D. (2022): Consumption estimation method for battery-electric buses using general line characteristics and temperature *Energy*, 261 (December): 125080.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125080>
- [100] SZILASSY, P. Á., FÖLDES, D. (2023): Akkumulátoros elektromos autóbuszok fogyasztásának becslése vonali jellemzők és hőmérséklet figyelembevételével *Közlekedéstudományi Szemle*, 73 (1): 38–56. <https://doi.org/10.24228/ktsz.2023.1.3>
- [101] YORK, R., BELL, S. E. (2019): Energy transitions or additions?: Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy *Energy Research & Social Science*, 51 (May): 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.01.008>
- [102] FOUQUET, R. (2010): The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service *Energy Policy*, 38 (11): 6586–6596.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.029>
- [103] <https://magyarbusz.info/2023/12/07/kaosz-osloban-megszenvedik-a-telet-az-elektromos-buszok/>
- [104] <https://www.portfolio.hu/global/20240711/a-tavol-keleti-hatalom-autogyartoi-osszefogtak-az-elektromos-jarmuforradalomban-ezzel-eloznek-a-piacot-698065>

10. Mellékletek

10.1. melléklet: Az elektromos töltőből kinyert adatok

Megnevezés	Magyarázat
Töltésazonosító	A töltési 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, 11 karakteres jelöléssel (betűk, számok).
Töltőállomás-azonosító	Az elektromos járművek töltésére szolgáló töltőállomás egyedi azonosítója, 4 karakteres jelöléssel (számok).
Csatlakozó száma	Az adott töltőberendezésen a töltés során használt csatlakozó száma.
Csatlakozóazonosító	Az adott töltőberendezésen a töltés során használt csatlakozó egyedi azonosító jelölése.
Átlagos kW	A töltés teljes időtartama során mért villamos teljesítmény átlagos értéke (kW).
Aktuális töltöttségi szint (SOC%)	Az elektromos jármű akkumulátorainak %-os arányban meghatározott elektromosenergia-szintje, amikor töltés közben éppen megnézzük. Jellemzően a töltés befejezésekor. A jármű fedélzeti rendszer által közölt adat.
Kezdő töltöttségi szint (SOC%)	Az elektromos jármű akkumulátorainak %-os arányban meghatározott elektromosenergia-szintje a töltés megkezdésekor. A jármű fedélzeti rendszer által közölt adat.
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 azonosítja (éé.hh.nn óó:pp:mp) formátumban.
Töltés befejező időpontja (UTC)	A töltés befejező időpontja, amikor a töltőcsatlakozó a járműről oldásra kerül (éé.hh.nn óó:pp:mp) formátumban.
Időtartam (másodperc)	A töltés kezdő és befejező időpontja között eltelt időtartam másodpercben.
Betöltött energiamennyiség (Wh)	A töltés kezdő és befejező időpontja között a töltőberendezésben elhelyezett mérőberendezés által mért villamos energiamennyiség (DC oldalon, Wh-ban)
Bruttó ár	Volánbusz esetében nem használt
Nettó ár	Volánbusz esetében nem használt
ÁFA	Volánbusz esetében nem használt
Pénznem	Volánbusz esetében nem használt

(A táblázat a következő oldalon folytatódik.)

(Folytatás.)

Megnevezés	Magyarázat
Rfid kulcs	A járműhöz rendelt, a töltés indításhoz szükséges egyedi RFID azonosító jelölése.
Rfid név	A járműhöz rendelt, a töltés indításhoz szükséges egyedi RFID azonosító megnevezése (rendszer).
Rfid típus	A járműhöz rendelt, a töltés indításhoz szükséges egyedi RFID azonosító típusa (fizikai kártya / token)
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 töltés során vagy befejezése után manuálisan, a portálon keresztül rögzíthető (opcionális).
Km óra állás (kézi felvitel)	A jármű km óra állása tankoláskor, mely a töltés során vagy befejezése után manuálisan, a portálon keresztül rögzíthető (opcionális).
Km óra állás mértékegység	A km óra állás mértékegysége.
Azonosító	A tankolást végző gépkocsivezető egyedi azonosítószáma, vállalati törzsszám, mely a töltés során vagy befejezése után manuálisan, a portálon keresztül rögzíthető (opcionális).
Rendszám-országazonosító	A jármű üzembe helyezése szerint honos országának rövidített jelölése.
Rendszám	A jármű forgalmi rendszáma, amennyiben szükséges, a töltés során vagy befejezése után manuálisan, a portálon keresztül rögzíthető (opcionális).

10.2.melléklet: Az elektromos autóbuszokból kinyert adatok

Megnevezés	Magyarázat
Töltéssel töltött idő (h)	Amikor a töltő csatlakoztatva van és a 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)	Időtartam, mikor 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) energiamennyiség.
Összes fogyasztás (kWh)	Összesített fogyasztás a jármű teljes eddigi élettartama alatt.
Menetfogyasztás (kWh)	Az autóbusz mozgása közben felhasznált energia az adott napon (sebesség nagyobb, mint nulla).
Fajlagos fogyasztás (kWh/km)	Kilométerre vetített fajlagos menetfogyasztás.
Üzemi fogyasztás (kWh)	Az autóbusz üzemeltetése közben felhasznált energia az adott napon (sebességtől függetlenül, minden üzemállapotban).
Akkucsomag 1 átlaghőmérséklet (°C)	Az 1-es számú akkumulátorcsomag átlagos hőmérséklete.
Akkucsomag 2 átlaghőmérséklet (°C)	A 2-es számú akkumulátorcsomag átlagos hőmérséklete.
Maximum akkumulátor-hőmérséklet (°C)	Akkumulátorok legnagyobb hőmérséklete az adott napon.
Minimum akkumulátor-hőmérséklet (°C)	Akkumulátorok legkisebb hőmérséklete az adott napon.
SOC – üzemkezdetkor (%)	Akkumulátortöltöttség-szint (SOC%) az adott nap kezdetekor.
SOC – üzemzáráskor (%)	Akkumulátortöltöttség-szint (SOC%) az adott nap végén (töltés kezdetén).
SOC – napi legkisebb érték (%)	Legkisebb akkumulátortöltöttség-érték az adott napon.
SOC – napi legnagyobb érték (%)	Legnagyobb akkumulátortöltöttség-érték az adott napon.
Üzem közben felhasznált akkumulátortöltöttség (%)	Akkumulátortöltés-szint (SOC%) változás üzem közben, az adott napon, sebességtől függetlenül. Beletartozik az állásban fogyasztott % (például közlekedési lámpánál, buszmegállóban) és a mozgás közben elhasznált % is.
Felvett töltés (%)	Akkumulátor töltésekor hány százalékos (SOC%) töltés valósult meg.
Töltési ciklusok száma (darab)	Adott napon elvégzett töltések száma.
CO ₂ -csökkentés (kg)	Hány kg szén-dioxidtól kímélte meg az autóbusz a léghőkört az adott napon.
Visszatermelés aránya (%)	A visszatermelt energia aránya a mozgás során felhasznált energiához képest.

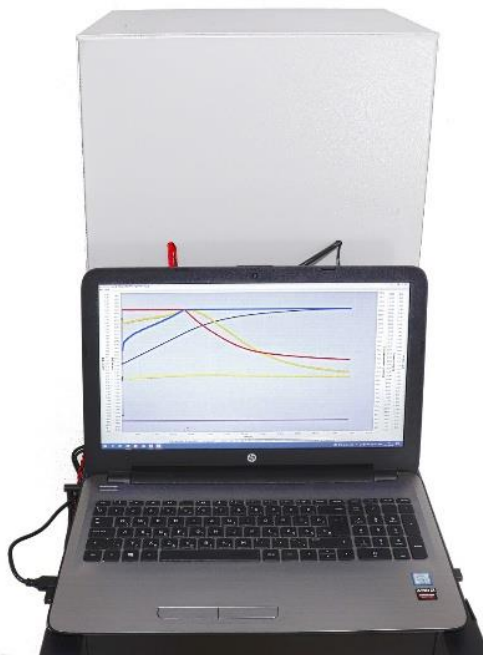
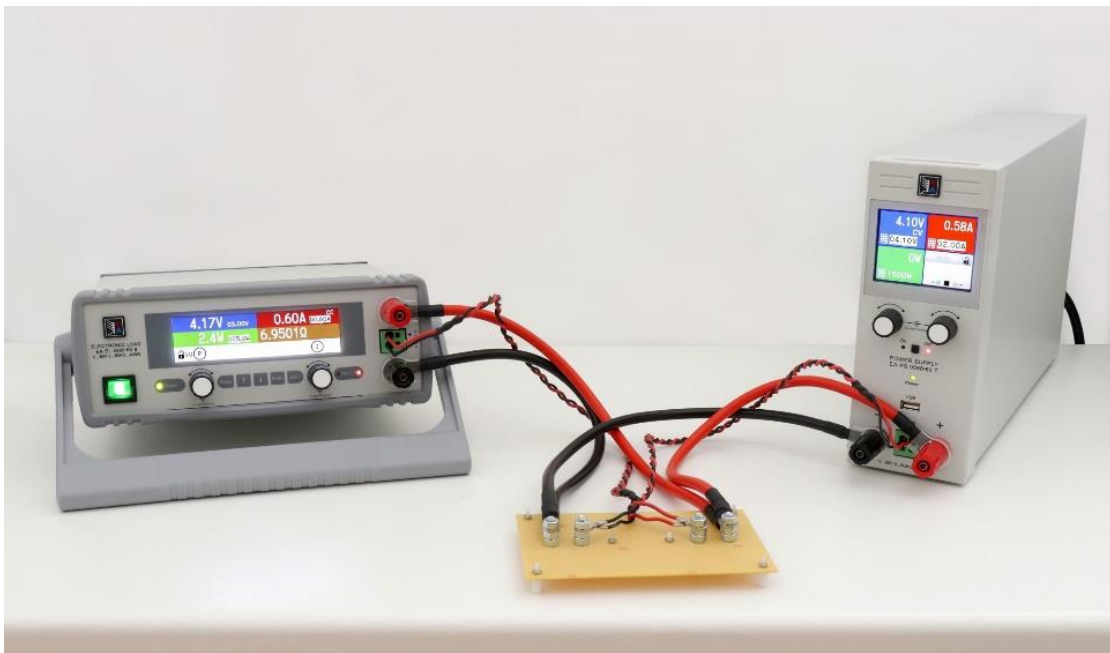
10.3.melléklet: Az 1. akkumulátorállapot-felmérési jelentés

Valence U27-36XP

Egyedi azonosító: CBJ152800214 (1529-006)

Mérést végezte:
XTALIN Mérnöki Tervező Kft.

Akkumulátorállapot-felmérés mérőeszközei



CELLAFESZÜLTÉSÉGEK ELLENŐRZÉSE

Leírás

Az akkumulátorban található összes cella feszültségének ellenőrzése a gyári BMS segítségével. Célja, hogy megállapítsam az akkumulátorról, érdemes-e a többi mérés elvégzése. A cellafeszültségeknek 2.5 V és 3.8 V 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 töltöttem fel az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A töltést az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 0.5 C-vel végzem. A mérés közben mérem a kiegyenlítés során kisütött energiát.

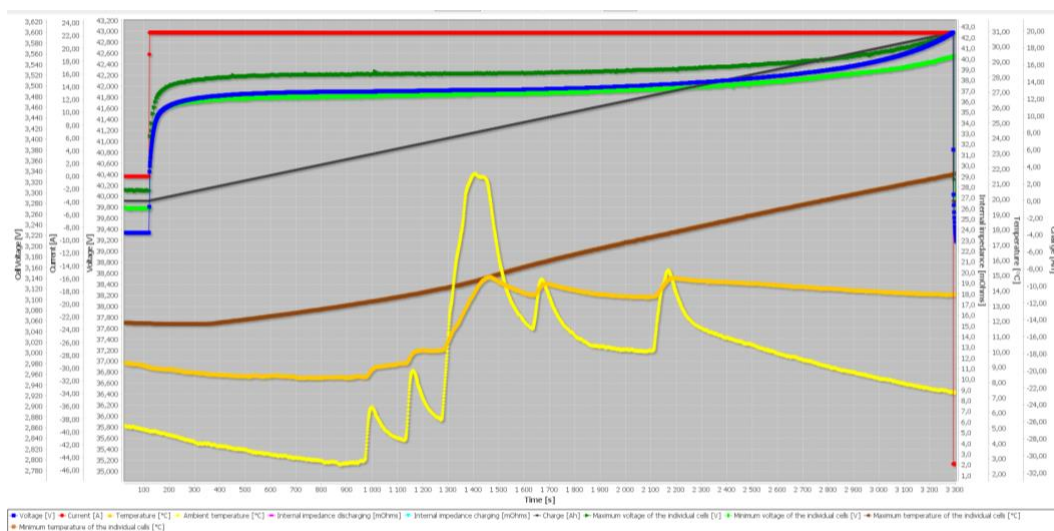
Eredmény

Log fájl: Valence-U27-36XP-27-2023.11.08.13.21.53.401.xcell_log

A mérés időtartama körülbelül 1 óra.

Az akkumulátort feltöltöttem, azaz legalább az egyik cella elérte a 3.6 V-ot vagy a töltőáram 5 A alá csökkent, továbbléphetek 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 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 mértem az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedúra közben mérem a mérítés során kivett energiát, ebből határozható meg a kapacitás, továbbá előre meghatározott szinteknél mérítési és töltési DC belső ellenállást mérek. Az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 1 C-vel mértem és 0.5 C-vel töltöttem. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2.8 V 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.

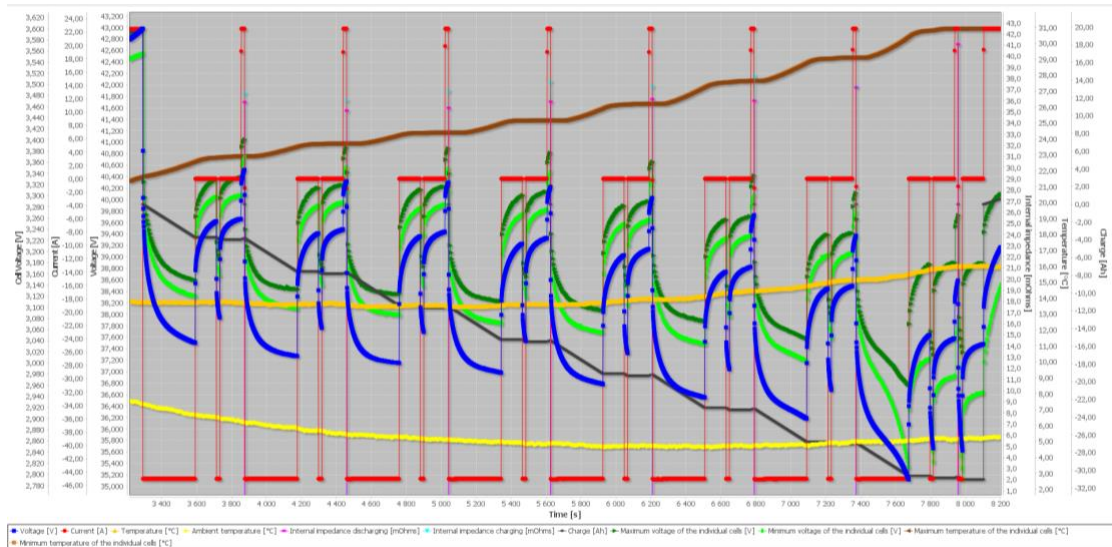
Teljes feltöltés után az akkumulátorból 31.036 Ah-t lehet kisütni, ez az akkumulátor eredetileg vélt kapacitásának (45Ah) 69.0%-a. A mérítési belső ellenállás töltöttségi szinttől függően 35.1–37.2 mΩ között alakult, míg a töltési belső ellenállás 36.0–38.2 mΩ között volt.

	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
Merítési 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 U27-36XP 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-e.

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

Leírás

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 mértem, a tápegységgel töltöttem az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedúra közben mérem a mérítés során kivett, illetve a töltés során felvett energiát, ebből határozható meg a kapacitás, továbbá előre meghatározott szinteknél merítési és töltési DC belső ellenállást mérek. Az akkumulátor névleges 45 Ah kapacitásának megfelelően 1 C-vel mértem és 0.5 C-vel töltöttem. A töltési és merítési ciklusokat egymás után hajtom végre, közben nyomon követem a kapacitás változását.

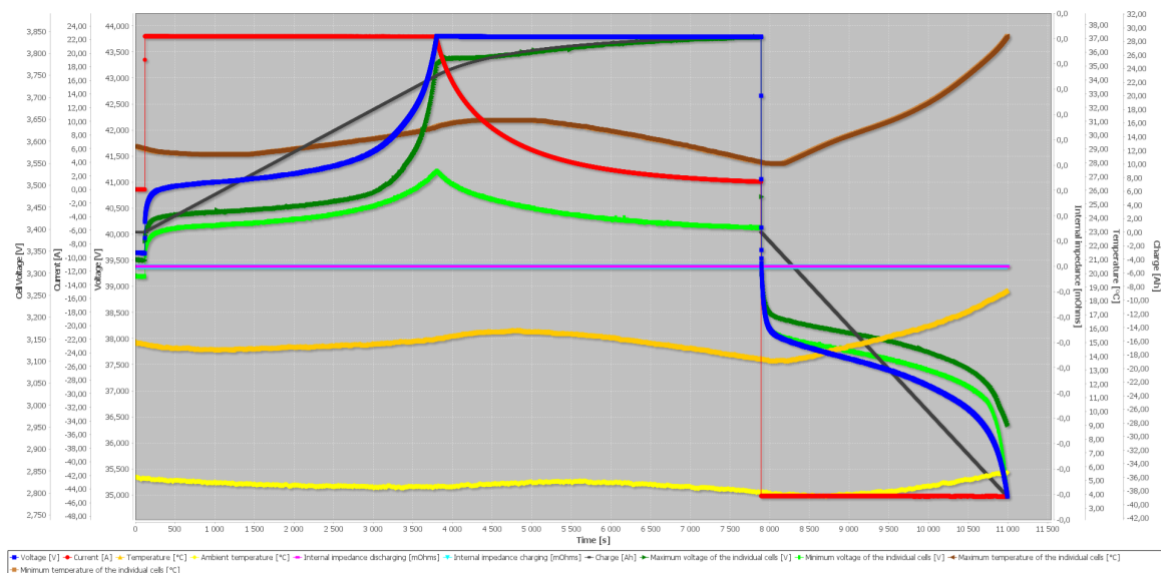
Leírás

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 végeztem. 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.

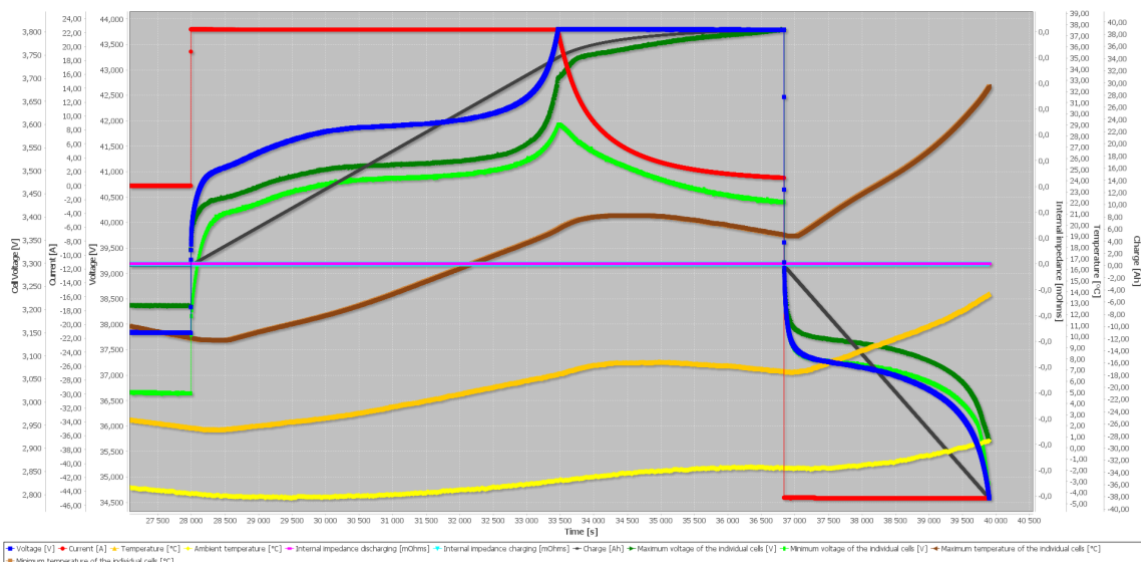
Az első ellenőrző mérést szobahőmérsékletű akkumulátorral indítottam, de 5 °C-os közegben, így a korábbi akkumulátorokkal összehasonlítható ennek az akkumulátornak az állapota.



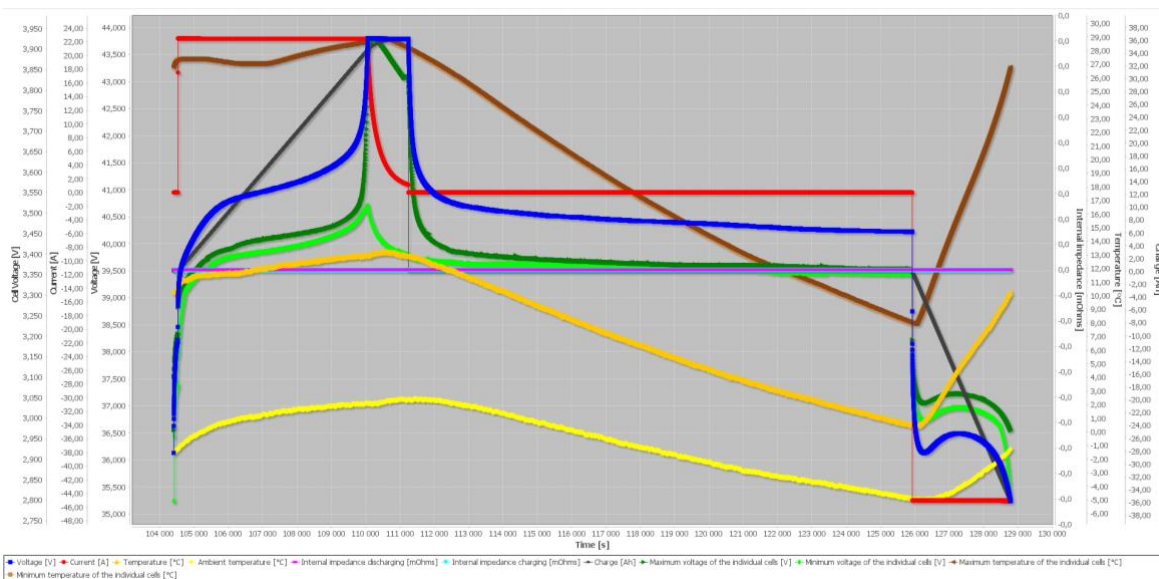
A fenti mérési diagramokból jól látható, hogy az akkumulátor belső és felületi hőmérséklete jelentősen eltér egymástól (15–20 °C különbség), így az akkumulátor folyamatos

használatban tartásával hideg (4–6 °C-os) környezetben is működési hőmérséklet-tartományban 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 mértem, ami hasonló az előző két akkumulátorhoz.

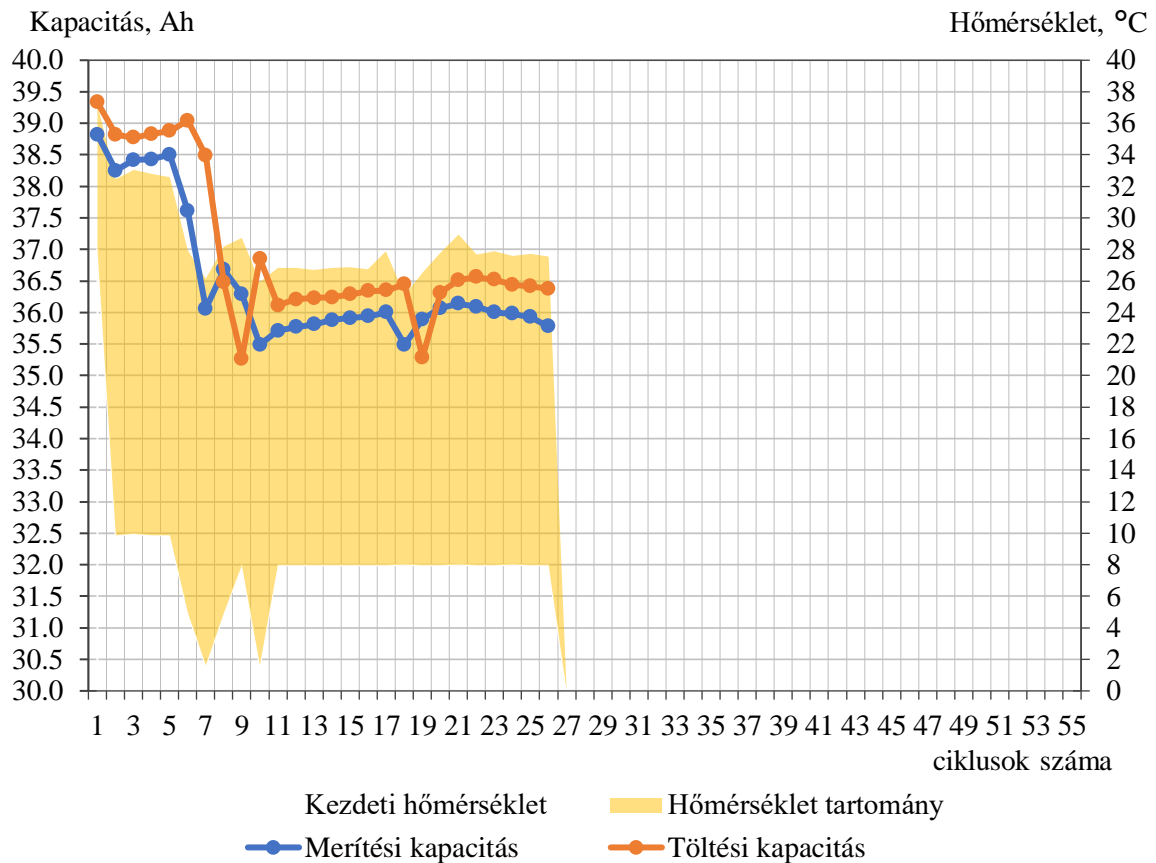


Ezt követően átállítottam a mérést úgy, hogy ne töltés előtt, hanem merítés előtt hűtse vissza az akkumulátort 5 °C alá. Így a kisütés során mért kapacitás jelentős mértékben csökkent 36 Ah-ra. Az akkumulátorház rossz hővezető képessége miatt nagyon sokáig tart -5 °C körüli hőmérsékletű közeggel is 5 °C alá hűteni az akkumulátort, ezért a későbbiekben 8 °C-ra hűtöm 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 használtam, hogy minél több ciklust tudjak futtatni.



Az alábbi diagramon 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 m Ω volt, míg hidegen 46 – 50 m Ω .

Valence U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése



A diagramon látszik, hogy a balanszolás előrehaladtával kismértékben 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 írtam, ennyi információból nem lehet mindenre kiterjedő választ adni az akkumulátor eddigi élete és jövőbeni viselkedése kapcsán. Ehhez legalább néhány akkumulátor teljes ciklizálására lenne szükség, hogy látni lehessen, ezek az akkumulátorok pontosan hogyan viselkednek az életük végén. Nagyban segítene, ha az akkumulátor eddigi életéről rendelkezésre állnának adatok, például, hogy 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 üzemelt stb. Ezek hiányában csak és kizárólag feltételezésekbe lehet bocsátkozni.

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 gyanakszom. (Látható azt is, hogy pontosan mi történik a balanszolás közben, nem a megfelelő cellát balanszírozza a BMS.) Mivel nem ismertek a használat körülményei, 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 ekkora 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)-os cellánál van valamilyen külső szennyeződés/behatás, ami miatt azon a mérőcsatornán többet fogyaszt az áramkör.

Mivel a 028-as akkumulátor belső ellenállásának mérése során a #6-os cella ellenállása megegyezett a többi celláéval, illetve feszültsége együtt mozgott a többi cella feszültségével, így az az eset kizárható, hogy alacsonyabb lenne a cella kapacitása a többi celláéhoz képest. A 027-es akkumulátoron látszódik, hogy a BMS csavaros fedeléről néhány helyről hiányoznak a csavarok tömítőkupakjai. Ebből arra lehet következtetni, 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 oka megbontás nélkül biztosan nem megállapítható.

Élettartam

A 006-os és 028-as akkumulátorok belső ellenállása $30\text{ m}\Omega$ körüli (17–23%-os növekedés), míg a 027-es akkumulátor $36\text{ m}\Omega$ -os ellenállással rendelkezik (44%-os növekedés). Ez azt mutatja, hogy a 027-es akkumulátor sokkal inkább az élettartama végén jár. Mivel nincs

információ az akkumulátorban lévő cellák mivoltáról (típus, gyártói mérések/adatok), így nem lehet egyértelműen megmondani, hogy hol tartózkodnak az élettartamukhoz képest. De az adatok alapján a kapacitása a 027-es és 028-as moduloknak nagyon hasonló, így feltételezhetően hasonló ciklusszám is van bennük, ezért arra lehet következtetni, hogy a 027-es modul magasabb átlaghőmérsékleten üzemelt, mint a 028-as, és emiatt magasabb a belső ellenállása.

	Gyári	006	027	028
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 [$m\Omega$]	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 1 C-s (45 A-es) merítésre, és 0.5 C-s (22.5 A-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 lesz. A cellák közötti töltöttségkiegyenlítés (balanszolás) problémájának megértéséhez a 027-es és 028-as akkumulátorok esetében további vizsgálódás szükséges.

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

10.4.melléklet: A 2. akkumulátorállapot-felmérési jelentés**Valence U27-36XP**

Egyedi azonosító: CBJ153000165 (1531-021)

Mérést végezte:

XTALIN Mérnöki Tervező Kft.

CELLAFESZÜLTSEGEK ELLENŐRZÉSE**Leírás**

Az akkumulátorban található összes cella feszültségének ellenőrzése a gyári BMS segítségével. Célja, hogy megállapítsam az akkumulátorról, érdemes-e a többi mérés elvégzése. A cellafeszültségeknek 2.5 V és 3.8 V 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 töltöm fel az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A töltést az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 0.5 C-vel végzem. A mérés közben mérem a kiegyenlítés során kisütött energiát.

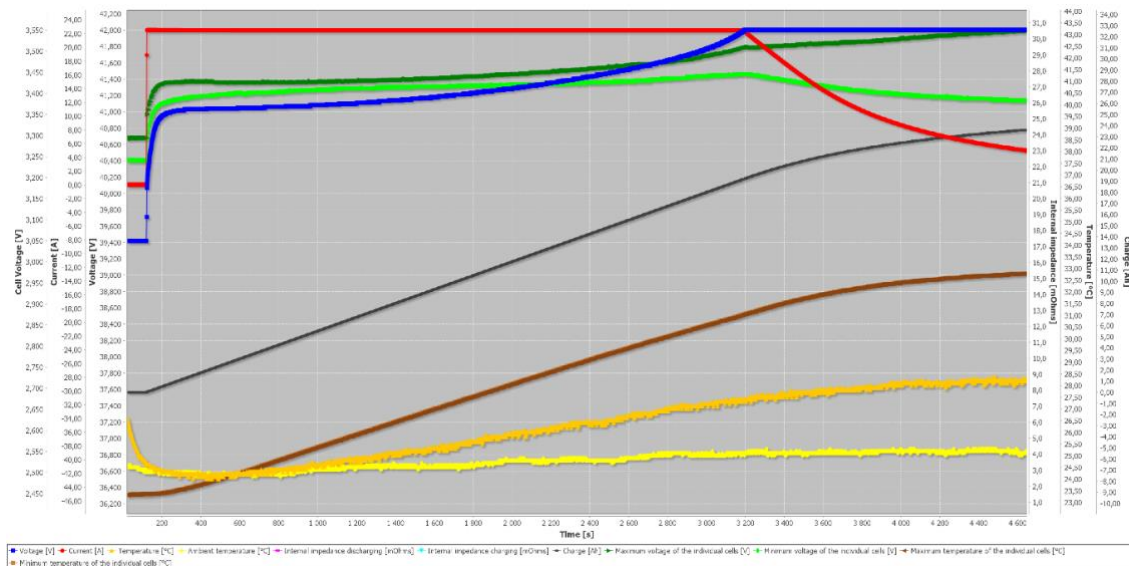
Eredmény

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 feltöltöttem, azaz legalább az egyik cella elérte a 3.6 V-ot vagy a töltőáram 5 A alá csökkent, továbbléphetek 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 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 mértem az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedúra közben mérem a merítés során kivett energiát, ebből határozható meg a kapacitás, továbbá előre meghatározott szinteknél merítési és töltési DC belső ellenállást mérek. Az akkumulátor vélt kapacitásának megfelelően 1 C-vel mértem és 0.5 C-vel töltöttem. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2.8 V alá csökken.

Eredmény

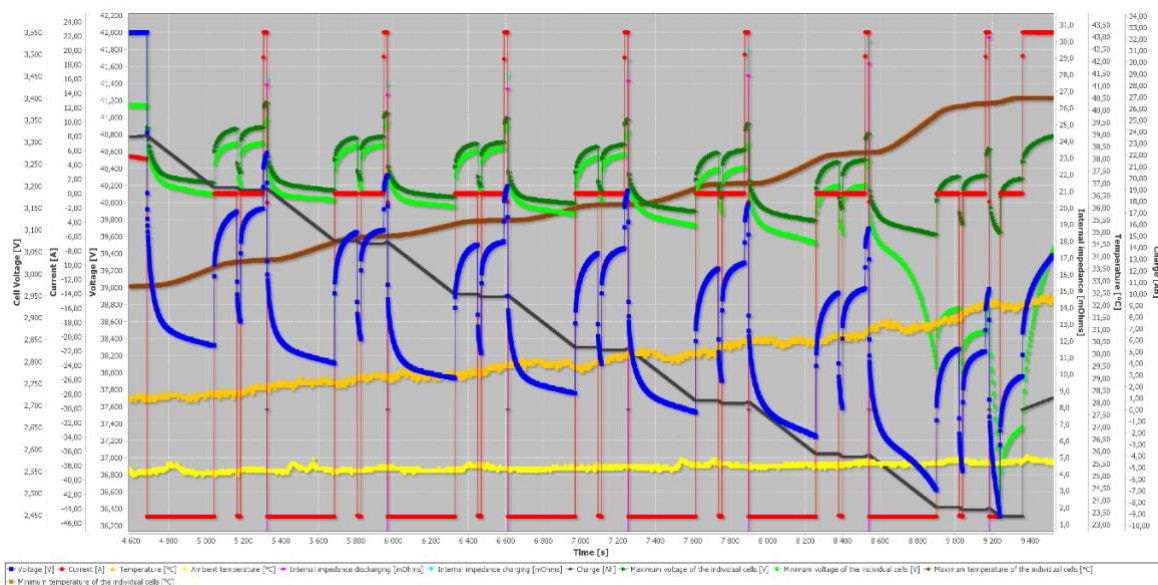
Log fájl: Valence-U27-36XP-28-2023.07.04.15.38.08.137.xcell_log

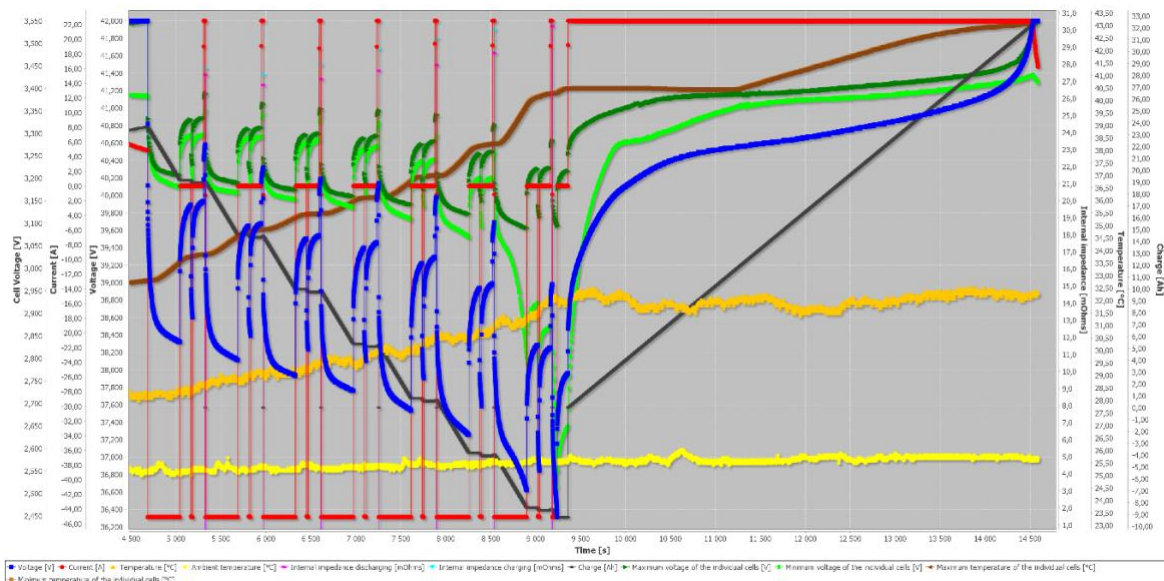
A mérés időtartama körülbelül 1 óra 20 perc + utána körülbelül 1 óra 30 perc töltés.

Teljes feltöltés után az akkumulátorból 32.59 Ah-t lehet kisütni, ez az akkumulátor eredetileg vélt kapacitásának (45 Ah) 72.4%-a. A merítési 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
Merítési belső ellen- állás [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 ellen- állás [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 tudtam megmérni, mivel hamarabb lemerült az akkumulátor. A Valence U27-36XP 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-e. 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 töltöm fel az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A kiegyenlítés célja, hogy azonos feszültség szintre hozza az összes cellát, melyet az akkumulátorban található BMS végez el adott körülmények között. A mérés közben mérem a kiegyenlítés során kisütött energiát. A gyári BMS 3.36 V-os cellafeszültség felett és legalább 0.04 V-os feszültségkülönbség esetén aktiválja a kiegyenlítést, azaz nem egyenlítő 0.04 V-nál kisebb eltéréseket.

Eredmény

A mérés időtartama körülbelül 76 óra.

Az akkumulátort feltöltöttem, minden cella feszültsége elérte a legalább 3.55 V-ot, a cellák töltöttségkülönbségét kiegyenlítettem, továbbléphetek 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 mértem az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A procedúra közben mérem a mérítés során kivett energiát, ebből határozható meg a kapacitás, továbbá előre meghatározott szinteknél mérítési és töltési DC belső ellenállást mérek. Az akkumulátor névleges 45 Ah kapacitásának megfelelően 1 C-vel mértem és 0.5 C-vel töltöm. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2.8 V 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.

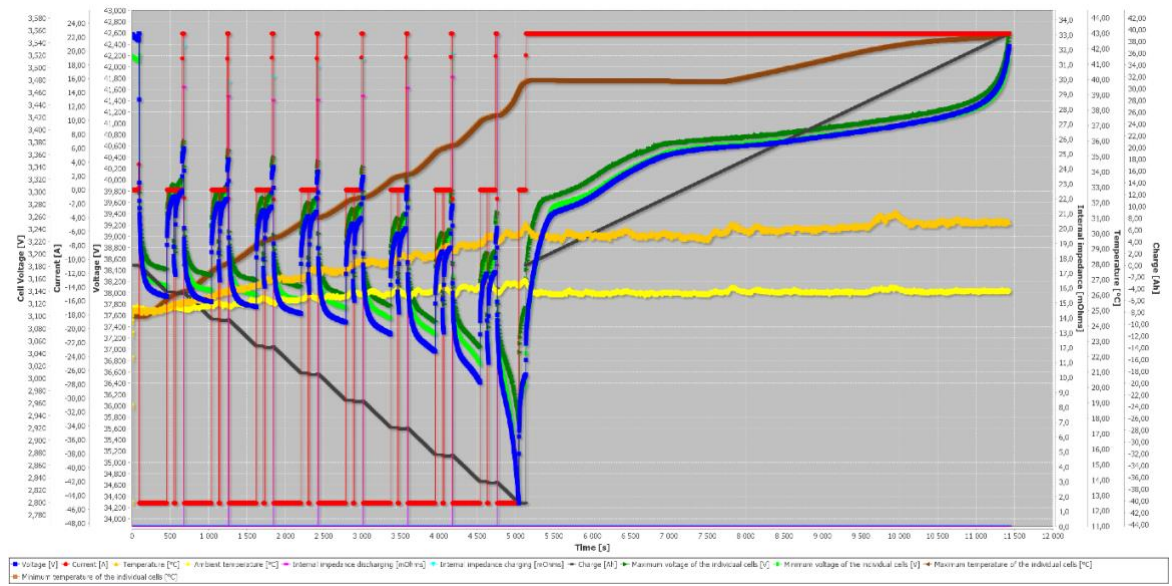
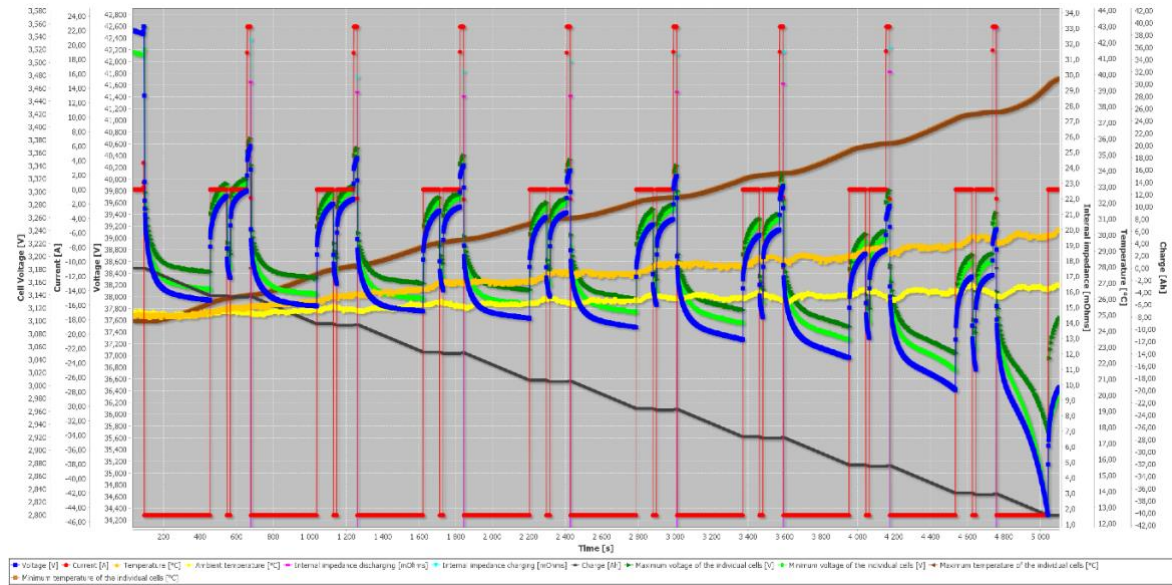
Teljes feltöltés után az akkumulátorból 39.35 Ah-t lehet kisütni, ez az akkumulátor eredetileg vélt kapacitásának (45 Ah) 87.4%-a. A mérítési belső ellenállás töltöttségi szinttől függően 28.6–33.0 mΩ között alakult, míg a töltési belső ellenállás 29.8–32.9 mΩ között volt.

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

A mérési átlag belső ellenállás 29,2 mΩ, ami 16,8%-kal nagyobb a gyári 25 mΩ-nál.
 A töltési átlagellenállás 31,1 mΩ, ami 24,4%-kal nagyobb a gyári értéknél.



11. Ábrák jegyzéke

Száma	Ábracím	Hivatkozás
1.	<i>Az akkumulátor teszt mérőrendszere</i>	saját mérés alapján
2.	<i>Statisztikai idősor: Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításban 2000 és 2024 között</i>	saját szerkesztés
3.	<i>Statisztikai idősor: Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések előfordulása 2000 és 2024 között</i>	saját szerkesztés
4.	<i>Statisztikai idősor: Akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése 2000 és 2024 között</i>	saját szerkesztés
5.	<i>Statisztikai idősor: Akkumulátor degradációja 2000 és 2024 között</i>	saját szerkesztés
6.	<i>Statisztikai kiértékelés: Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban 2000 és 2024 között</i>	saját szerkesztés
7.	<i>A nikkel-mangán-kobalt (NMC), lítium-ferrofoszvá (LFP) és lítium-titán-oxid (LTO) technológiák fejlődésének összehasonlítása az energiasűrűség tekintetében cella és akkumulátorcsomag szinten</i>	BMZ-Poland 2021 [32]
8.	<i>Az NMC és LTO akkumulátor összehasonlítása egy 12 méteres elektromos autóbusz esetében 10 éves időtartam alatt a hatótávolság függvényében</i>	BMZ Poland 2021 [32]
9.	<i>Lítium-ion akkumulátor csomagok árának összehasonlítása</i>	BloombergNEF 2023 [33], [34]
10.	<i>A lítium-ion akkumulátorcsomag és -cella árának összehasonlítása 2013–2023 közötti időszakban</i>	BloombergNEF 2023 [34]
11.	<i>Töltési és kisülési profilok</i>	Tseng és szerzőtársai 2015 [36]
12.	<i>Az elektromos autóbuszok töltési stratégiái</i>	Jefferies 2020 [45]
13.	<i>A töltési logika alapján vezérelt folyamat sémája</i>	Jefferies 2020 [45]
14.	<i>A kisütés mélységének (DOD) hatása az akkumulátor degradációjára</i>	Homan 2018 [46]
15.	<i>Az akkumulátordegradációra alkalmazott S-N görbe</i>	Homan 2018 [46]
16.	<i>A degradáció mechanizmusa</i>	HAN 2019 [48]
17.	<i>Optimális akkumulátorfelhasználás a kapacitás megőrzésével</i>	Xu 2016 [47]
18.	<i>Az akkumulátorok újrahasznosításának körkörös modellje</i>	Casals 2019 [56]
19.	<i>Fenntartható akkumulátor-értéklánc</i>	WEF 2017 [58]
20.	<i>Egy nyilvános hozzáférésű ciklus kiértékelés vizualizált bemutatása</i>	batteryarchive.org [60]
21.	<i>Az akkumulátorok életciklusa a kapacitás függvényében</i>	Zhau 2023 [62]
22.	<i>Az úgynevezett eFLIPS (Electric Fleet and Infrastructure Planning/Simulation) modell</i>	Jefferies 2020 [45]
23.	<i>A valós fogyasztási igény és a csúcs idejű fogyasztás kiegyenlítése (csúcsterhelés-völgykitöltés)</i>	Turner 2015 [87]

(Az ábrajegyzék a következő oldalon folytatódik.)

(Folytatás.)

Száma	Megnevezés	Hivatkozás
24.	<i>A három körforgásos logisztikai folyamat logikai ábrája</i>	saját szerkesztés [P/6]
25.	<i>Az adatközpontokhoz kapcsolódó logisztikai entitások</i>	saját szerkesztés [P/6]
26.	<i>Az elektromos autóbuszok core adatfolyamata</i>	saját szerkesztés [P/6]
27.	<i>Adatvezérelt vállalatirányítási rendszer logikai ábrája</i>	saját szerkesztés [P/6]
28.	<i>Autóbuszflottát üzemeltető vállalat innovatív működési modellje</i>	saját szerkesztés [P/6]
29.	<i>Az új beszerzésű dízel- és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében állandó dízelolaj ár (437 forint/liter) mellett, 107 forint/kWh villamosenergia-tarifával</i>	saját szerkesztés
30.	<i>Az új beszerzésű dízel- és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a villamosenergia-tarifára függvényében állandó dízelolaj ár (437 forint/liter) mellett, napi 250 kilométer futással</i>	saját szerkesztés
31.	<i>Az új beszerzésű dízel- és új beszerzésű elektromos autóbuszok OPEX+CAPEX kiadásai a napi futásteljesítmény függvényében állandó dízelolaj ár (437 forint/liter) mellett, napi 300 kilométer futással</i>	saját szerkesztés
32.	<i>Az energiarendszer beruházási költsége</i>	saját szerkesztés
33.	<i>Az energiarendszer beruházási költsége, valamint a hálózathoz felvett energia aránya</i>	saját szerkesztés
34.	<i>A napelem energiarendszer beruházási költsége</i>	saját szerkesztés
35.	<i>A napelem energiarendszer beruházási költsége, valamint a hálózathoz felvett energia aránya</i>	saját szerkesztés
36.	<i>A tesztelhető rendszerváltozatok leírása</i>	saját szerkesztés [P/7]
37.	<i>A valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 1. mérés</i>	Volánbusz Zrt., saját szerkesztés
38.	<i>A valencia U27-36XP akkumulátor ciklikus tesztelése: 2. mérés</i>	Volánbusz Zrt., saját szerkesztés
39.	<i>Az akkumulátorok második életciklusának kialakítása a körforgásos gazdaságban</i>	saját szerkesztés
40.	<i>A vállalati akkumulátormenedzsment folyamata</i>	saját szerkesztés
41.	<i>Kilométerenkénti fogyasztás a környezeti hőmérséklet függvényében [°C]</i>	saját szerkesztés
42.	<i>Kilométerenkénti fogyasztás az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében [km]</i>	saját szerkesztés

12. Táblázatok jegyzéke

Száma	Táblacím	Hivatkozás
1.	<i>A kutatási tevékenység mátrixa</i>	saját szerkesztés
2.	<i>A tématerületek és a kulcsszavak áttekintése</i>	saját szerkesztés
3.	<i>Az innovatív modell szerinti rendszerben keletkező és felhasznált adatstruktúra a logisztikai folyamatok szerinti adatcsomagok szerint</i>	saját szerkesztés [P/6]
4.	<i>Adatkörök – a villamosenergiadíj-változás elemzése</i>	saját szerkesztés
5.	<i>Adatkörök – a futásteljesítmény-változás elemzése</i>	saját szerkesztés
6.	<i>Adatkörök – energiarendszer-elemzés</i>	saját szerkesztés
7.	<i>A rendszer főbb paraméterei</i>	saját szerkesztés
8.	<i>Az autóbustípusok összehasonlító táblázata fő ismérvenként</i>	saját szerkesztés
9.	<i>A működési összköltség bemeneti adatai az autóbuszflotta által használt hajtásrendszer alapján</i>	saját szerkesztés
10.	<i>Az utaselégedettség bemeneti adatai az autóbuszflotta által használt hajtásrendszer alapján</i>	saját szerkesztés
11.	<i>Az utaselégedettség bemeneti adatai az autóbuszflotta által használt hajtásrendszer alapján</i>	saját szerkesztés
12.	<i>Optimális akkumulátorfelhasználás</i>	saját szerkesztés
13.	<i>Optimális hasznos járműakkumulátor-méret a külső hőmérséklet és az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében</i>	saját szerkesztés
14.	<i>A téli, a tavaszi/őszi és a nyári időjárás esetén (0 °C) használandó optimális akkumulátorméret</i>	saját szerkesztés
15.	<i>Optimális hasznos járműakkumulátor-méret a külső hőmérséklet és az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében, 10 év időtartamra</i>	saját szerkesztés
16.	<i>Optimális hasznos járműakkumulátor-méret a külső hőmérséklet és az autóbuszforduló-terv távolságának függvényében, 20 év időtartamra</i>	saját szerkesztés

13. Rövidítések jegyzéke

Rövidítés	Battery	Rövidítés	Akkumulátor
BES	Battery Energy Storage		Akkumulátoros energiatárolás
BESS	Battery Energy Storage System		Akkumulátoros energiatároló rendszer
BEVB	Battery Electric Vehicle Battery		Akkumulátoros elektromos jármű akkumulátora
BMS	Battery Management (or Monitoring) System		Akkumulátormenedzsment- és -monitoringrendszer
DC	Depo Charging		Telephelyi töltés
DOD	Depth of Discharge		Akkumulátor kisütési mélysége
DST	Dynamic Stress Test		dinamikus stresszteszt
ELIB	End of Life Industrial Battery		Akkumulátor-élettaram vége
ESS	Energy Storage System		Energiatároló rendszer
EVB	Electric Vehicle Battery		Elektromos jármű akkumulátora
IMC	In-motion-charging		Mozgás közbeni töltés
LFP	Lithium iron phosphate		Lítium-vas foszfát akkumulátor
LIB	Lithium Ion Battery		Lítium-ion akkumulátor
LTO	Lithium Titanium Oxid		Lítium Titániám 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 optimalizálása
RUL	Remaining Useful Life		Fennmaradó hasznos élettartam
SEI	Solid Electrolyte Interphase		Szilárd elektrolit interfázis
SLB	Second-life battery		Második élettartamú akkumulátor
SLBESS	Second-life battery energy storage system		Második élettartamú akkumulátort tárolóként felhasználó rendszer
SOC	State of Charge		Töltési állapot
SOH	State of Health		Az akkumulátor állapota
SOS	State of Safety		Az akkumulátor biztonsági állapota
Vdis	Fully discharged voltage		Teljes kisülési feszültség
	Sustainability		Fenntarthatóság
GHG	Greenhouse gases	ÜHG	Üvegházhatású gázok
SDGs	Sustainable development goals		Fenntarthatósági célok

(A rövidítések jegyzéke a következő oldalon folytatódik.)

(Folytatás.)

Rövidítés	Battery	Rövidítés	Akkumulátor
	Vehicles, electric vehicles		Járművek, elektromos járművek
BET-VSP	Battery Electric Transit – Vehicle Scheduling Problem		Akkumulátoros elektromos járművek fordaszerkezeti problémái
BEV	Battery Electric Vehicle		Akkumulátoros elektromos jármű
ECV	Electric Commercial Vehicle		Elektromos haszongépjármű
ELV	End of Life Vehicle		Gépjármű-élettartam vége
EV	Electric vehicle		Elektromos járművek
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		Belső égésű motor
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle		Plug-in hibrid elektromos gépjármű
	Transit, transportation, logistics		Közlekedés, szállítás, logisztika
SLA	Service Level Agreement		Szolgáltatási szint megállapodás
	Methodology		Módszertan
CE	Circular Economy		Körforgásos gazdaság
ILP	Integer Linear Programming		Egész számú lineáris programozás
SLR	Systematic Literature Review		Szisztematikus irodalomkutatás
TS	Time-Space		Idő-tér
TSE	Time-Space-Energy		Idő-tér-energia
	Life cycle		Életciklus
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
	Organisations		Szervezetek
IEA	International Energy Agency		Nemzetközi Energiaügynökség
UTA	Utah Transit Authority		Utah-i Közlekedési Hatóság
WEF	World Economic Forum		Világgazdasági Fórum