

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



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

PhD-értekezés tézisei

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

TÁRS-TÉMAVEZETŐ
Prof. Dr. habil. Tamás Péter
intézetigazgató, egyetemi tanár

Miskolc
2025

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. A kutatás célkitűzése és módszertana	5
2.1. Kutatási célkitűzések	5
2.2. Kutatás módszertana.....	5
3. A témához kapcsolódó szakirodalmi áttekintése	7
4. Az innovatív üzemeltetési modell megalkotása	9
4.1. Az autóbuszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntési modell és módszer kidolgozása	10
4.2. Az elektromos autóbuszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában innovatív újrahajósítási modellek feltárása	14
5. Új tudományos eredmények, a tézisek ismertetése	17
6. Összefoglalás	19
7. New scientific results	21
8. Summary	23
9. Irodalomjegyzék, saját publikációk	25

1. Bevezetés

A disszertáció időszerűségét és a téma indokoltságát elsősorban a világméretű energiaválság és az Európai Unióban (EU) meghatározott klímapolitikai célok elérésével összefüggő jogszabályi kötelezettségek már a 2025 esztendőől feladatokat rónak az autóbuszos operátorokra. Az EU módosította az elektromos járművek és egyéb új technológiák bevezetéséről szóló 2017/2400 rendeletét, amelyben konkrét dátumokat határoztak meg a belső égésű motorok kivezetéséről: 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 a teljes üvegházhatásúgáz- kibocsátás 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 CNG, tisztán elektromos vagy hidrogén meghajtású. Összegezve megállapítható, hogy a hazai és a nemzetközi jogszabályi környezet pontos határidőket szabott annak érdekében, hogy a karbonsemlegesség a közösségi közlekedésben mihamarabb megvalósuljon itthon és az EU területén.

Az alternatív technológiák alkalmazása a közlekedésben elengedhetetlenné vált, hiszen az energiafüggetlenség biztosítása, valamint a már említett EU-s és hazai célok elérése nem lehetséges ezen technológiák alkalmazása nélkül. A zöld átmenet tehát alternatív meghajtású gépjárművek nélkül, legyen az elektromos vagy hidrogénmeghajtású, nehezen kivitelezhető. Meglátásom szerint tehát a klímapolitikai célok elérése a technológia fejlődésének köszönhetően, az elektromos autóbuszok munkába állítása napjainkban már nem csupán a tervezőasztalokon megálmodott mérnöki „hóbort”, hanem 2023-tól ez már maga a beteljesedett valóság.

Az autóbuszos közösségi közlekedés operátorai szerte a világon (Senzen városától Philadelphián vagy Izmirén át Delhiig) egyre nagyobb számban használnak elektromos meghajtású buszokat. Választásukat nem csupán a zöld átmenet támogatása vagy a közlekedési alapzaj csökkentése indokolja, ugyanis 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 energiaimportjának mértéke a lehető legkisebb legyen.

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

Tudományos kutatásomat nem csupán a klímapolitikai céloknak való jogszabályi megfelelés készítette, 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 rendelkező országok, köztük hazánk is, az elektrifikációnak köszönhetően szignifikánsan csökkenthetik energiainport-igényüket, egyúttal növelhetik gazdasági stabilitásukat és függetlenségüket, továbbá meg tudnak felelni a már említett klímapolitikai célkitűzéseknek is.

A disszertáció időszerűségét és témáját tehát EU-s és hazai jogszabályi kötelezettségek, valamint az ezzel párhuzamosan megjelent technológiai fejlődés, akkumulátortechnológiai forradalom – amely az alternatív meghajtású járműveknél forradalmi változást eredményezett – adják. Az ismertetett jogszabályi, technológiai változásokat figyelembe véve kutatásomban arra fókuszálok, hogy a tudomány milyen segítséget tud adni ahhoz, hogy hosszú távon, gazdasági szempontok szerint is fenntartható legyen a zöld átállás.

2. A kutatás célkitűzése és módszertana

A disszertáció témájának és kutatási céljainak megválasztását a bevezetésben részletesen indokoltam. A következőkben megfogalmazom ezeket a célkitűzéseket és ismertetem a kutatás módszertanát.

2.1. Kutatási célkitűzések

Kutatási célkitűzéseimet a következőkben foglalom össze:

1. Autóbuszflottát üzemeltető vállalatok optimális és innovatív működési modelljének megalkotása. Ebben fontos célkitűzésem, hogy a működés gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi szempontból hosszú távon fenntartható legyen, a közlekedési rendszer logisztikai folyamatai együttesen biztosítsák az elérhető legjobb teljes tulajdonlási költségszintet (TCO), a lokálisan majdnem karbonsemleges üzemeltetést és az elektromos autóbuszok akkumulátorainak karbonlábnyomát jelentősen csökkentő visszautas logisztikai megoldást. Elvárásként fogalmaztam meg, 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.
2. Az innovatív modell integráns részét képező vegyes autóbuszflotta optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntési modell és módszer kidolgozása, a teljes tulajdonlási költség, valamint mindazon tényezők figyelembevételével, amelyek az egyes járműtípusok flottába illesztésére ezen kívül még befolyással vannak, különösen a karbonlábnyom és az ügyfél- és utaselégedettségi tényező.
3. A kutatási céloom végül az elektromos autóbuszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában egy innovatív újrahasznosítási modell feltárása a visszautas logisztika eredményeinek figyelembevételével. A modell segítségével az autóbuszos operátorok javítani tudják az elektromosautóbusz-beruházások megtérülési rátáját, melynek segítségével az elektromos buszok megtérülése jobb lesz a hagyományos belső égésű autóbuszokhoz képest.

2.2. Kutatás módszertana

– Szisztematikus irodalomkutatás

Kutatási tevékenységem során szisztematikus irodalomkutatással feltártam a témakörre vonatkozó hazai és nemzetközi releváns forrásokat, publikációkat, elemeztem a bennük lévő megállapításokat és eredményeket. A disszertációban megfogalmazott hipotézisek valódiságát, aktualitását először a hazai és a nemzetközi szakirodalom ismertetésével végeztem el. Segítségül hívtam a szakirodalom feltárásához a ScienceDirect, Elsevier, továbbá Web of Science interneten megtalálható tudományos publikációs gyűjtőhelyeket.

– **Modellalkotás**

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

– **Számítási algoritmusok meghatározása: TCO**

A modellszámításokhoz szükséges algoritmusokat és a felhasznált adatokat definiáltam, és közel száz műszaki-gazdasági adatot gyűjtöttem, különös tekintettel a rendszert alkotó elemek teljes tulajdonlási költségére.

– **Hiányzó adatok és információk biztosítása a modell és az algoritmusok számára**

- Adatforrások: meghatároztam a hiányzó adatok beszerzésének módját és forrását.
- Saját mérések: akkumulátordegradáció tekintetében saját méréseket végeztem.
 - Az elektromos autóbuszok – N=100 – műszaki adatait 2022. szeptember 1-jétől 2024. február 29-ig gyűjtöttem, melynek során vizsgáltam az akkumulátor fogyasztási adatait, töltési sebességét, az e-buszokban meglévő dízelkályha fogyasztását. Mértem az egy adott hőmérsékletre, domborzati viszonyokra és fordára kimutatott fogyasztást. Folyamatosan elemeztem az elektromos és belső égésű autóbuszok karbantartási, fogyasztási költségeit, gyűjtöttem a gázolaj, valamint az áram árának időbeli változását.
 - Elvégeztem az akkumulátordegradációra vonatkozó mérést. A tesztelés 3 darab akkumulátoron zajlott, amelyet a BKV Zrt.-től kaptam meg. Az akkumulátorok Valence U27-36 XP típusúak voltak, amelyeket 3 különböző hőmérsékleten teszteltem. A mérési elrendezésben számítógépes szoftver által vezérelt terhelés és tápegység található. Terheléssel merítettem az akkumulátort, melyet közben a gyári BMS felügyel. A mérés hibahatára 0,01%. A procedúra közben mértem a merítés során kivett energiát, ebből határoztam meg a kapacitást, továbbá előre megadott szinteknél merítési és töltési DC belső ellenállást mértem. Az akkumulátor névleges 45 Ah kapacitásának megfelelően 1 C-vel merítettem és 0,5 C-vel töltöttem. A mérés a jelen beállítások mellett akkor ér véget, ha bármely cellafeszültség 2,8 V alá csökken.

1. táblázat: *Kutatási tevékenységi mátrix*

Hipotézis	Szisztematikus irodalom-kutatás	Gazdasági adatok összegyűjtése, ismertetése	Műszaki adatok összegyűjtése, ismertetése	Akkumulátorok állapotának műszaki mérése	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

A kutatási téma megértéséhez elengedhetetlen a tudománytörténeti ismeretek és terminus technicusok ismertetése, valamint a kutatási irányok hazai és nemzetközi szakirodalmának alapos tematikus feldolgozása. Kulcsszavas keresést alkalmaztam, melynek statisztikai eredményeit ábrákon mutattam be. Az egyes kutatási területeken a hivatkozott publikációk időrendben következnek, ami lehetővé teszi a téma evolúciójának és trendjeinek nyomon követését, az egyes megállapítások időtállóságának megítélését és így a publikáció relevanciájának megítélését. A kutatás során összesen 43 darab kulcsszóra kerestem rá.

A kulcsszavakra történő idősoros keresés céljából több lehetőséget vizsgáltam meg. 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 ugyan az ismertetett keresések lefolytatására, sajnos azonban a találatok időbeli megoszlása nem jeleníthető meg, és a találatok exportálása sem lehetséges.

Megoldásként a JSTOR alkalmazását tartottam célszerűnek. Az így elvégzett keresés menete a következő:

- 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 és 2024 közötti időszakra végeztem el.

Az ismertetettek alapján a következő területekre és a hozzájuk tartozó kulcsszavakra terjedt ki a szisztematikus irodalomkutatás:

- Az elektromos autóbuszok térhódítása és integrálása a közúti személyszállításba, összesen 3028 darab, évről évre folyamatosan növekvő keresési találat.

Kulcsszavak: *adoptálás, közlekedés jövője, elektrifikáció, implementálás, vegyes autóbuszflotta, közlekedés átalakítása, fordaszerkezet.*

- Az elektromos autóbuszok akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdések kezelése, összesen 11 829 darab találat, évről évre folyamatosan növekvő keresési találat.

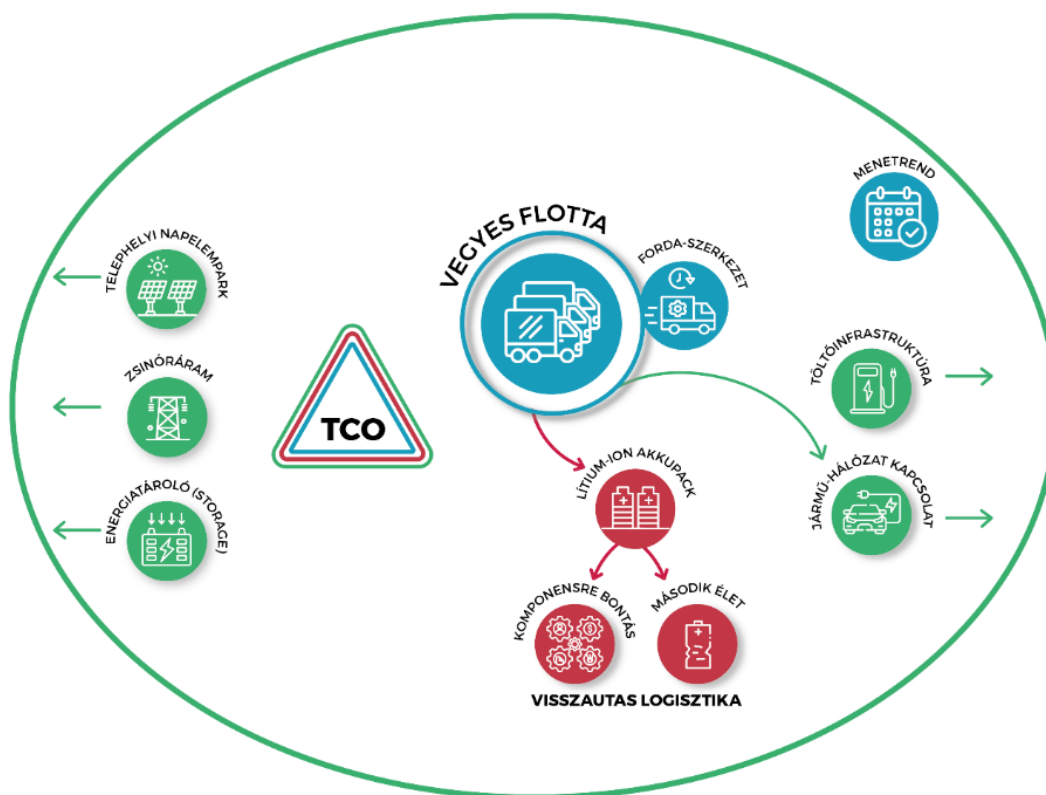
Kulcsszavak: *dekarbonizáció, zéró emisszió.*

- Akkumulátorok kapacitása, töltése és kisülése összesen 161 906 darab találat, évről évre folyamatosan növekvő keresési találat.
Kulcsszavak: *akkumulátormenedzsment, -feltöltés, -kapacitás, lemerülési karakterisztika, részleges feltöltés, stacionárius töltés, töltési igény, töltési infrastruktúra, töltőállomás, -szükséglet, power grid, V2G.*
- Akkumulátor degradációja összesen 94 296 darab találat, évről évre folyamatosan növekvő keresési találat.
Kulcsszavak: *degradáció, kifáradás, állapot, töltöttségi állapot (SoC), akkumulátor élettartama (SoH).*
- Az elektromos autóbusz vontatására már nem alkalmas akkumulátorok másodlagos hasznosítása a fordított logisztikai folyamatban összesen 102 212 darab találat, évről évre folyamatosan növekvő keresési találat.
Kulcsszavak: *akkumulátor AND autóbusz + akkumulátor-értéklánc, fordított logisztika, második életciklus, másodlagos.*

4. Az innovatív üzemeltetési modell megalkotása

A közösségi közlekedésben autóbusszal végzett szolgáltatást nyújtó gazdálkodó szervezeteknek – felismerve azt, hogy az elektrifikációval és a dekarbonizációval való foglalkozás stratégiai fontosságú az ilyen cégek fenntartható működése szempontjából – ki kell alakítaniuk azt a gazdálkodási modellt, amely teljeskörűen figyelembe vesz minden releváns szempontot és elvárást. A velük kapcsolatos irodalom tematikus feldolgozásával a járműpark és az azzal nyújtott szolgáltatások gazdasági, környezetvédelmi és társadalmi fenntarthatósága szempontjából 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 autók optimális működési feltételeinek megteremtésére is (például a töltőhálózat illesztése a fordaszerkezethez, a töltőhálózat lokációja, a töltési módok kiválasztása), a hajtóanyag-ellátás energetikailag optimalizált megoldásával és az elektromos autók vontató akkumulátoraival kapcsolatos fenntarthatósági kérdésekre (degradáció, újrahasznosítás és második életciklus).

1. ábra: A három körforgásos logisztikai folyamat logikai ábrája



Forrás: saját szerkesztés.

Az 1. ábrán bemutatott rendszer három logisztikai folyamatot (logistic flows) kapcsol össze abból a célból, hogy az elektromos autók vegyes flottába történő beillesztése a

teljes tulajdonlási költség (TCO) szempontjából is igazolható legyen. Ezek a folyamatok, amelyeket az entitások szintjén részletesebben is bemutatok, a következők:

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

A szakirodalom feldolgozása megmutatta számomra, hogy a legtöbb gazdasági modellszámítás szerint középtávon az elektromos buszok üzemeltetésének megtérülése egyelőre kétséges. Azonban kérdésként merül fel, hogy valóban igaznak fogadhatók-e el a bemutatott hazai és nemzetközi számítások. Ugyanis a megalkotott, bemutatott modellek és módszertanok a maguk logikai rendszerében kitűnőek, de meglátásom szerint nem teljes körűek. A tanulmányokban bemutatott gazdasági keretrendszerek önmagukban logikusak és rendkívül 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 a beruházási költségekkel, valamint az egyéb gazdasági mutatókkal. Véleményem szerint a modellek hiányossága azonban abban rejlik, hogy a szerzők modelljüket nem egy összetett ökoszisztémában helyezték el, lásd 1. ábra, ahol a szigetszerűen működő rendszereket összekapcsolják, hanem megelégedtek egy szoliter gazdasági modellel.

Ezért publikáltam egy jóval komplexebb modellt [P/6], amely a logisztikatudomány módszertanával felépített ökoszisztémát alkot. Ebben nem csupán az elektromos autóbusszok TCO-ját, beruházási (CAPEX) és üzemeltetési költségeit (OPEX) veszem figyelembe, hanem az elektromos buszokban, az elhasznált akkumulátorokban és a töltőállomásokban rejlő egyéb üzleti lehetőségek bevételi oldalát is vizsgálom, számba véve az elektromos áram, tehát az üzemanyag saját termelési és kereskedelmi lehetőségeit, mellyel egy rendkívül komplex, de realisabb képet lehet alkotni az elektromos buszok alkalmazásának lehetőségeiről.

Az innovatív üzemeltetési modell gyakorlati alkalmazását esettanulmány formájában mutattam be. A következőkben azt igazolom, hogy egy autóbusszos közösségi szolgáltató esetében gazdaságilag is megvalósíthatóvá tehető az elektromos flotta bővítése, ha megfelelően komplex és az egész értékláncot átfogja a koncepció.

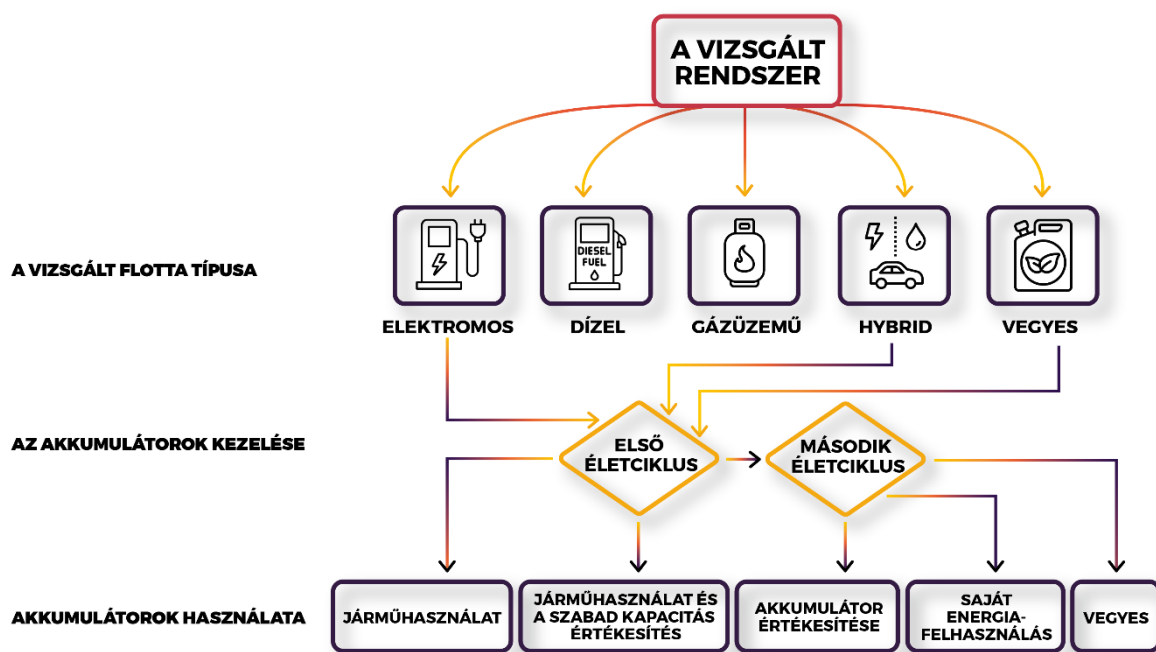
4.1. Az autóbusszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetételének meghatározására szolgáló döntési modell és módszer kidolgozása

Az üzemeltető társaság számára megfelelő flotta kiválasztása számos döntési szempont figyelembevételét, valamint egy normalizálás alapú, minden lényeges szemponttal számoló döntési módszer alkalmazását igényli. A disszertációban ismertettem a lehetséges

rendszerváltozatokat, valamint a megfelelő flotta kiválasztásának kritériumait és döntési módját.

A kidolgozott döntéshozatali módszer minden közszolgáltató autóbusz-szolgáltatásban részt vevő társaságra alkalmazható, függetlenül a vizsgált flotta típusától, valamint az akkumulátorok kezelésének és felhasználásának módjától. A vizsgálat során egy adott járműtípusból álló – az elvárt napi futásteljesítmény elérésére alkalmas – optimális flotta választható ki. Ha a vizsgálat elektromos flottát is tartalmaz, akkor csak az akkumulátorok első, illetve második életciklusának határait lehet figyelembe venni. Az akkumulátorok első életciklusában vizsgálható a járművek üzemeltetésének és a szabad kapacitás áramszolgáltatónak történő értékesítésének lehetősége is. 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 csúcsidezési villamos energia tárolása a járművek meghajtására maximális kibocsátás mellett stb., vagy ezek kombinációja.

2. ábra: A tesztelhető rendszerváltozatok leírása



Forrás: saját szerkesztés.

A 2. ábrán ismertetett rendszerhatárok mentén vezettem le az optimális flottatípus meghatározását. Az optimális flottatípus kialakításához a következő lépések végrehajtására volt szükség. Először ismertettem a vizsgált busztípusok műszaki-gazdasági paramétereit, majd meghatározom, hogy mely paraméterek szerepelnek jelentős súllyal a modellem megalkotásakor. A megszerzett tapasztalatok és mérések alapján kiválasztottam azokat a tulajdonságokat, amelyek a vizsgált busztípusokra vonatkoznak.

A továbbiakban kialakítottam a flotta üzemeltetése során teljesítendő követelményeket, melyek közül a legfontosabbak az átlagos környezeti hőmérséklet és annak ingadozása, a járművek várható átlagsebessége, a várható futásteljesítmény, a rendelkezésre álló erőforrások, a környezeti követelmények és a rendelkezésre álló működőképes infrastruktúra.

A vizsgálandó járműtípusok meghatározása során megállapítottam, hogy mely járművek felelnek meg az előzőekben meghatározott követelményeknek és az üzemeltető igényeinek.

Kidolgoztam a döntési kritériumokat és a kitűzött cél eléréséhez szükséges lépéseket. 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 flottatípusonkénti, járművenkénti meghatározása.
- A megvásárolni kívánt flotta típusának kiválasztása.

A teljes tulajdonlási költség 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 eltekintenek az akkumulátorok lehetséges második életciklusától, amely az üzleti gyakorlatban egyre inkább költségcsökkentő tényezővé válik. Ennek megfelelően a vizsgált flottatípus TCO-ját a következőképpen kell meghatározni.

Tökeráfordítás a vizsgált időszakra:

$$C_i^{CAP} = C_i^{AM_v} + C_i^{AM_I} - R_i^{II} - R_i^O, \quad (1)$$

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^{II} : az i típusú flotta járművei akkumulátorainak második életciklusából származó többletbevétel jelenértéke,
- R_i^O : az i típusú flotta járművei és a kapcsolódó infrastruktúra eladásából származó bevétel jelentéértéke.

Működési költségek a vizsgált időszakban:

$$C_i^{OP} = C_i^{OP_M} + C_i^{OP_F} + C_i^{OP_S} + C_i^{OP_o}, \quad (2)$$

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:

$$- C_i^{TCO} = C_i^{CAP} + C_i^{OP} \quad (3)$$

– Karbonlábnyom

Ez a mutató azt fejezi ki, hogy a vizsgált időszakban egy adott járműtípushoz tartozó egységjármű gyártásához és későbbi üzemeltetéséhez mennyi szén-dioxid-egyenértékű üvegházhatású gáz 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 vásárlóknak egy adott járművel való elégedettségét (például biztosított szolgáltatások, járműtípus megbízhatósága). A mutatót a szolgáltatást igénybe vevők körében végzett felmérés alapján határozzuk meg, és az i flottatípusra CS_i -vel jelöljük az értékét. Ennél a mutatónál az értékek 1-től 5-ig terjednek, ahol 5 a legjobb értékelés.

– A célfüggvény értékeinek normalizálása

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

1. Működési összköltség (TCO)

$$C^{TCO(max)} = \max_i \{C_i^{TCO}\} \quad (4)$$

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

2. Karbonlábnyom (CF)

$$CF^{(max)} = \max_i \{CF_i\} \quad (5)$$

$$\alpha_i^2 = CF_i / CF^{(max)} \quad (6)$$

3. Utaselégedettség (CS)

$$CS^{(max)} = \max_i \{CS_i\} \quad (7)$$

$$\alpha_i^3 = 1 - CS_i / CS^{(max)} \quad (8)$$

– A megvásárolni szándékozott flotta típusának kiválasztása

Az optimális flottaszerkezet kiválasztása tipikusan az optimalizálási feladatok halmazához tartozik. Az általam vizsgált optimalizálási feladat általános alakban a következőképpen írható fel:

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

$$AX = b; X > 0 \quad (10)$$

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

Az $f(X)$ -et célfüggvénynek nevezzük, aminek a szélsőértékét (minimumát vagy maximumát) keresem 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 tekintem, és halmazukat L -l jelölöm.

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

A modell stabilitása végett a MIN-MAX scalling módszert használom.

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

$$M = [|\alpha_1|, |\alpha_2|, \dots, |\alpha_n|], \quad (11)$$

Utána minden együtthatót elosztom a maximummal.

$$\alpha'_i = \frac{\alpha_i}{M} \quad (12)$$

Implementálom a bemutatott módszertanhoz a feladatokat, amelynek első lépéseként meghatároztam a peremfeltételeket, azaz a vizsgált vállalat szakértőinek meg kell határozniuk az egyes értékelési szempontok súlyozását fontossági sorrendben (13. és 14. lépés). Ezt követően kialakul a normalizált célfüggvény összetevőinek súlyozott összege, így a minimális értékű egységjármű a legmegfelelőbb választás a vállalat szempontjai szerint.

A célfüggvénykomponensek súlyának meghatározása:

$$0 \leq w_h \leq 1, \quad (13)$$

$$\sum_{h=1}^3 w_h = 1 \quad (14)$$

A célfüggvény meghatározása:

$$F(w) = \min_i \sum_{h=1}^3 w_h \cdot \alpha_i^h \quad (15)$$

A függvény meghatározásával megalkottam egy olyan matematikai modellt, amely segítségével az autóbuszos operátorok ki tudják alakítani flottájuk összetételét. A képlet segít egy optimális döntés meghozatalában, amely révén a már említett környezetvédelmi fenntarthatóság mellett a gazdasági fenntarthatóság is megvalósítható.

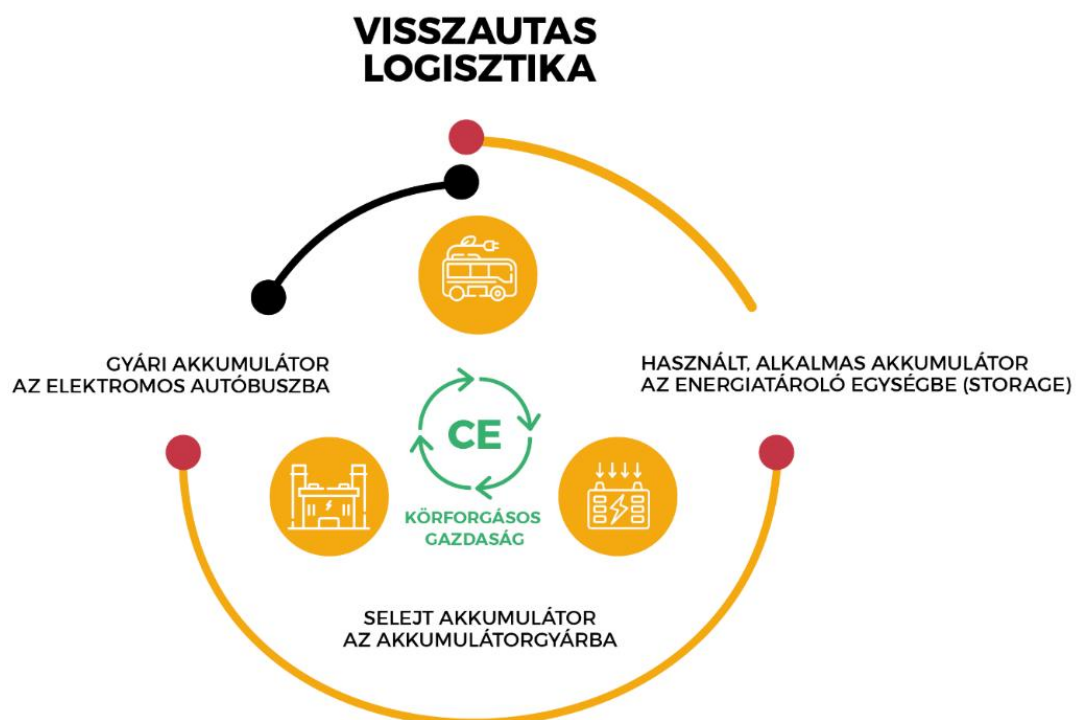
4.2. Az elektromos autóbuszflottát üzemeltető vállalatok akkumulátorai vonatkozásában innovatív újrahasznosítási modellek feltárása

Az elektrifikációra alapozott technológiai transzformációnak együtt kell járnia a dekarbonizációs célok és a közlekedési ökoszisztéma ún. „nettó-zéró” működtetésének megvalósításával is. Az akkumulátorok visszautas logisztikai folyamata megteremti a körforgásos kapcsolatot az energetikai ellátás folyamataival, és az újrahasznosítás során lényegesen hozzájárul a klímacélok teljesítéséhez. 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 nikkel-kadmium akkumulátorok, tartalmaznak azonban olyan elemeket, amelyek környezetbe kerülését meg kell akadályozni. Továbbá ugyanilyen fontos az újra felhasználható 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 akkumulátorokra alapozott elektrifikáció hosszú távú szerepe a gazdasági szakemberek és a tudományos kutatók körében is napjaink egyik leginkább előtérbe kerülő témája, és ez hazánk esetében a társadalom és a 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 és 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 során tisztában legyünk az akkumulátortechnológiák nyújtotta előnyökkel és hátrányokkal, az egyes akkumulátortípusok várható élettartamával és az akkumulátorcsomagok (battery pack) árára jellemző trendekkel, továbbá az újrahasznosítási lehetőségekkel. A 3. ábra azt a körforgásos modellt mutatja be, melyben egy autóbusszos személyszállító vállalat a járművekből kikerülő használt, üzemképes, azonban járműben történő használatra már gazdaságosan nem alkalmas akkumulátorokat további használatra fogná be, ezzel második életciklust adva az akkumulátoroknak.

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



Forrás: saját szerkesztés.

A megalkotott modell szerint a járművekben üzemelő akkumulátorok a kapacitásvesztésük miatt körülbelül 10–12 év után, második életciklusukat felhasználva, kikerülnek a járművekből, azonban ahelyett, hogy hulladékká válnának, az egyes felhasználási helyeken storage-ként használhatók a garázstelephelyen megtermelt villamos energia tárolására. A tárolt villamos energia ezáltal bármikor felhasználható, így gazdaságilag optimalizálható az áram beszerzése és javulna a vállalat üzemi eredménye is.

A saját energiatermelési képesség kialakításának vizsgálata mentén és ahhoz kapcsolódóan kutatást vezettem, melynek keretében piaci szereplőkkel és egyetemekkel együttműködve vizsgáltam, hogy például az elektromos autóbuszokból kikerülő akkumulátorok a körforgásos működés elve mentén, másodlagos hasznosítás keretében az infrastruktúrába épített storage-ként hogyan tudják tovább szolgálni a társaság működését és érdekeit. 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 garanciavállaláson túli, de működőképes akkumulátorok storage-ként történő hasznosításával további évekre lehet az eszközöket termelésben tartani, megőrizve ezzel az alkalmazhatóságot a társaság számára, és javítva a beruházási költségek megtérülését.

5. Új tudományos eredmények, a tézisek ismertetése

1. tézis: Feltártam az autóbusszal szolgáltató közúti közlekedési vállalkozásoknál eddig alkalmazott üzemeltetési modellek eredményeit és hiányosságait, és egy innovatív, adatvezérelt, körforgásos logisztikai modellt alkottam. A modell alapján megállapítható, hogy közlekedési, energetikai és visszautas logisztikai folyamatokat összekapcsolva egy gazdaságilag, környezetvédelmileg és társadalmilag is fenntartható működés biztosítható.

A nemzetközi és a hazai szakirodalom bemutatásával ismertettem az autóbusszal közlekedés jelen- 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 túl mára az *autóbusszoknál* is észlelhető. Az ebből fakadó technológiai és jogszabályi változások jelentős kihívások elé állítják az *autóbusszal operátorokat*. A szakirodalom ismertetése rámutatott arra, hogy a tudományos művek szerzői egyelőre nem alkottak meg egy olyan jól működő logisztikai modellt, amely a vállalat gazdasági fenntarthatóságát hosszú távon biztosítja a környezetvédelmi és technológiai átmenet implementálásakor. Rávilágítottam, 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 az eddig a vállalaton belül és kívül szigetszerűen működő entitásokat *összekapcsolja*. A modell segítségével az autóbusszal operátorok számára a hosszú távú fenntartható közlekedés – a környezetvédelmi előírásokra figyelemmel – biztosítható. Számításokon keresztül mutattam be, hogy lehetséges olyan gazdasági és műszaki környezet kialakítása, amely 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 az autóbusszflotta optimális kialakításának módszertanát és döntéshozatali modelljét meghatározzák. 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. A modell alapján a különböző meghajtású (elektromos, dízel, CNG és vegyes) autóbusszflották életciklusköltségeinek, karbonlábnyomának és ügyfél-elégedettségének elemzésével, illetve összehasonlításával meghatározható a különböző üzemű autóbusszflottát üzemeltető vállalat optimális járműösszetétele.

Elemeztem és rávilágítottam olyan hiányosságokra, amelyek nehezítették a zöld átállás gazdaságilag is jövedelmező üzemeltetési módját. Megalkottam egy olyan általános matematikai modellt, amely segítségével az autóbuszos operátorok meg tudják határozni a számukra optimális autóbuszflottát. A 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 a három változónak, saját igényeiknek megfelelően. A matematikai modellt gyakorlati példán keresztül teszteltem, amelyben saját méréseim által beszerzett adatokat használtam fel. A saját adatgyűjtésekből kapott eredményeket nemzetközi szakirodalomban ismertetett adatokkal ellenőriztem, 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 akkumulátor egységek második életciklusának megtervezése és a visszautas logisztika megoldásainak alkalmazása az elektromos buszok teljes tulajdonlási költségét javítja.

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 számolótáblát, amely segítségével meghatározható az optimális akkumulátorhasználat. A módszer segítségével kialakítható egy operátor számára az optimális töltés-kisütés ciklus, továbbá a gazdaságilag még hasznos akkumulátor másodlagos felhasználása. Ismertettem, hogy az akkumulátort az autóbusz esetében nem csupán energiaforrásként lehet használni, hanem egy degradációs pontnál érdemes az autóbusból kiszerezni és mint energiatárolót működtetni, végül hulladékként komponenseire bontani és újrahasznosítani. Ezzel a logisztikai modellel az operátorok számára az elektromos autóbuszok versenyképessé válnak, így hosszú távon gazdaságilag is biztosítható a zöld átmenet ([P/8], [P/9], [P/10]).

6. Összefoglalás

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 bemutattam a témához illeszkedő nemzetközi szakirodalmat, amely több mint 100 művet és 93 hivatkozást tartalmaz. Ismertettem azon tudományos módszertanokat, amelyek segítségével alátámasztottam téziseimet. Több mint egy éven keresztül több 100 műszaki adatot gyűjtöttem 100 elektromos autóbusról és közel 50 elektromos töltőről. Önálló mérést végeztem használt akkumulátorokon, amelyek eredményeit összehasonlítottam a nemzetközi szakirodalmi adatokkal. Végül az ismertett téziseket minden esetben egy esettanulmánnyal 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 a dekarbonizációs folyamatok kiemelkedő kihívást jelentő problémáira. 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 ismertett modellt egy esettanulmányon keresztül validáltam, amelyben bizonyítottam a modell gyakorlati alkalmazhatóságát. A tanulmányban két különböző scenáriót vizsgáltam, míg az egyik esetben a szükséges energiát, áramot éjszaka veszi fel az elektromos busz, addig a második esetben 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 esettanulmány eredménye alátámasztja az elméleti modell használhatóságát, tehát gazdaságilag is fenntarthatóvá válhat a vállalat számára a hosszú távú működés bizonyos paraméterek mellett, így biztosítható a zöld átmenet.

A 2. tézis a komplex rendszer egy olyan elemére ad innovatív szemléletű megoldási javaslatot, amelynek feladata a hosszú távon fenntartható, zöld közlekedési logisztikai rendszer működtetése a változó energiaellátási erőforrásokhoz igazodva. A 2. tézisben megalkotott matematikai modell alapján az üzemeltetők meghatározhatják az optimális flottaösszetételt. A részletes szakirodalmi elemzés eredményeként megállapítottam, hogy az ideális flottakiválasztási folyamatból 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. A 2. tézis kidolgozásának keretében egy általános és innovatív döntéshozatali módszert határoztam meg, amely ezeket a hiányosságokat orvosolja a megfelelő flottatípus kiválasztásában. A módszert a Volánbusz Zrt., valamint egy nemzetközi tanulmány adatai alapján

ismertetem, melynek eredményeként megállapítható, 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 illesztésével foglalkozik, amelyben szerepet kap a visszautas logisztika és az akkumulátorok második életciklusának integrálása a komplex rendszerbe. A megalkotott modell alkalmazhatóságát ebben az esetben is egy esettanulmány ismertetésével igazoltam. Bebizonyítottam, amennyiben sikerül az optimális akkumulátorméret meghatározása az elektromos autóbuszok üzemeltetéséhez, és meg tudom határozni az optimális töltés-merítés intervallumot a 3. tézisben ismertetett modell alapján, akkor elérhető az akkumulátoroknál a legnagyobb ciklusszám. Ezzel biztosítható az akkumulátorok második életciklusának műszaki és gazdasági szempontból optimális felhasználása, amely javítja az elektromos autóbuszok teljes tulajdonlási költségeit. A javasolt komplex rendszernek fel kell tudni dolgoznia az egyre szélesebb körben elterjedő megújuló energiákra alapozott közlekedéslogisztikai rendszerek üzemszerű működésében rejlő kockázatokat és azok kezelésére alkalmas módszereket. Elemzések sora hívja fel a figyelmet arra, hogy a fosszilis energiáról történő leválás milyen kihívás elé állítja a megújuló energiaforrásokra átállni kívánó felhasználókat ([101], [102]).

Az autóbuszflották kialakítása esetében is vannak intő példák arra, hogy az összetétel optimális diverzifikálása nélkül nagy nehézségek, akár közlekedési káosz is előállhatnak. Többek között a klimatikus viszonyok extrém változása is okozhatja ezt, mint Hollandiában és Németországban az elmúlt években, és a közelmúltban az oslói helyi közlekedést kiszolgáló elektromos autóbuszok esetében. Utóbbiban 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-útlevélet”, amely megmutatja az akkumulátorok romlásának mértékét és maradványértékét is. Ez elősegíti a visszautas logisztika alkalmazását ezen a területen [104]. Érdemes 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, adatlapú vállalati döntések meghozatalát, amely segítségével még hatékonyabban tudnánk elérni a két legfontosabb kitűzött célt: a környezetvédelmet és a gazdasági hatékonyságot. A közlekedési vállalkozásoknál működő komplex rendszerek irányításában az adatvezérelt döntéshozatal előtérbe kerülését és a korszerű informatikai rendszerrel támogatott monitoringfolyamatok szerepét támasztják alá azok a kutatási eredmények, amelyeket társszerzőként publikáltam [P/11].

7. New scientific results

Thesis 1: I have explored the achievements and shortcomings of the operational models used up to now by road transport operators, and have developed an innovative, data-driven, circular logistics model. Based on this model, it can be concluded that economically, environmentally and socially sustainable operation can be provided by combining transport, energy and reverse logistics processes.

I have presented the current and future challenges of buses in public transport through surveying Hungarian and international literature. The key drivers of change are EU and national legislation, directives and targets for promotion of the procurement of clean vehicles in order to meet environmental standards and reduce dependence on fossil energy.

The electrification revolution in the automotive industry is now being seen not only in cars but also in *buses*. The resulting technological and regulatory changes pose significant challenges for *bus operators*. A review of the literature has shown that the authors of scientific studies have not yet developed a *well-functioning logistics model that ensures the long-term economic sustainability of companies when they implement the environmental and technological transition. I have highlighted the fact that electric buses should not be treated as a standalone entity, but as an entity within a complex logistics system.*

In Thesis 1 I have created an innovative decision-making logistics model based on real-time data that *interconnects* entities that previously operated in isolation within and outside the company. This model can be used to ensure long-term sustainable vehicle operations for bus operators, subject to environmental regulations. My calculations have shown that it is possible to create an economic and technical environment that promotes electrification and the green transition in an economically sustainable way ([P/1], [P/2], [P/3], [P/4], [P/5], [P/6]).

Thesis 2: I have identified the viewpoints, criteria and factors that determine the methodology and the decision-making model for the relevant entities in the transport logistics process in an innovative operation model and for the optimal design of a bus fleet. I have analysed the decision-making models and then applied life cycle cost analysis to determine the full life cycle costs for electric, diesel, CNG and hybrid propulsion bus categories. Finally, I have determined a decision-making model to arrive at the optimal vehicle mix for a company operating a bus fleet. Based on this model, the optimal vehicle mix for a bus fleet operator with different operating modes can be determined by analysing and comparing the life cycle costs, carbon footprint and customer satisfaction of various bus fleets (electric, diesel, CNG and hybrid).

I have analysed and highlighted the shortcomings that have made it difficult to operate the green transition in an economically viable way. I have created a general mathematical model to help bus operators determine their optimal bus fleet. In presenting this thesis, I have described the variables that influence the bus procurement process. In building the decision-making model, I have taken into account total cost of ownership, carbon footprint and

customer satisfaction, which I have standardized. I have called the model “general” because in assigning weights to these three variables operators can use their own discretion, according to their own needs. I tested the mathematical model through a practical example using data obtained from my own measurements. I checked the results obtained from my own data collection against that reported in the international literature. This comparison has shown no significant discrepancies ([P/7], [P/8]).

Thesis 3: I have explored the factors that influence the environmental and economic aspects of electric vehicle traction batteries in the innovative operating model. The design of the second life cycle of battery packs and the application of reverse logistics solutions will improve the total cost of ownership of electric buses.

The circular economy has a very important role to play in the decision-making model developed in Thesis 1. In Thesis 3 I have presented a logistics model for the recycling of batteries for electric buses. I have also presented a chart for the determination of optimal battery use. This method can enable an operator to determine the optimal charge–discharge cycle, and the secondary use of a battery that is still economically viable. I have shown that for a bus, a battery can not only be used as an energy source, but that at a certain point in its degradation it should be removed from the bus and operated as an energy storage unit, after which it should be broken down into its components and recycled as waste. This logistical model will make electric buses competitive for operators, thus providing a green transition which is economically viable in the long term ([P/8], [P/9], [P/10]).

8. Summary

In the introduction to this dissertation I described the topicality of this subject, and the difficulties and scientific challenges inherent in it. I have shown how the science of logistics and information technology can contribute to the climate policy objectives described in the dissertation, which are also legal obligations. In the first parts of the paper, I have described the relevant international literature, which comprises more than 100 works and 93 references. I have described the scientific methodologies used to support my theses. Over a period of more than a year, I collected more than 100 sets of technical data relating to 100 electric buses and nearly 50 electric chargers. I carried out independent measurements on used batteries and compared the results with data from the international literature. Finally, I verified the theses presented in each instance with a case study, thus confirming the practical applicability of the theoretical models.

The theses formulated in the paper provide a systemic and innovative response to the challenging problems of electrification and decarbonization in the field of transport logistics. The significance of Thesis 1 is that it takes a complex model approach to the elements and entities of a highly complex system and the emerging ecosystem. The model can help bus operating companies achieve locally zero emissions so that the long-term operation of the company in question will be sustainable not only in environmental terms, but also in economic terms. The model presented in Thesis 1 was validated through a case study which demonstrated the model's practical applicability. In this case study I have examined two different scenarios. In the first scenario, the electric bus accumulates the necessary energy during the night. In the second scenario I have described a complex system, in which a solar panel is installed on the premises and the company also acts as an electricity trader, selling the unused electricity it has generated on the electricity market. The results of both case studies confirm the usefulness of the theoretical model, i.e. it can become economically sustainable for the company to operate in the long term under certain parameters, thus contributing to the green transition.

Thesis 2 proposes an innovative approach to an element in the complex system, which is designed to operate a green transport logistics system which is sustainable in the long term and adapted to changing sources of energy supply. Based on the mathematical model developed in Thesis 2, operators can determine the optimal fleet composition. Following a detailed analysis of the literature, I found that several essential components in the selection process for an ideal fleet have been ignored, and their omission may even lead to incorrect decision making. These factors include consideration of the secondary life cycle of batteries, sustainability and logistics. In the development of Thesis 2, a general and innovative decision-making method was identified to address these shortcomings in the selection of the appropriate fleet type. I have presented this method based on data from Volánbusz Zrt. and an international study, which showed that electric buses provide the best operational value across the board.

Thesis 3 is about the integration of traction batteries – a critical factor for the zero-emission operation of electric vehicles – into the logistics cycle, with the integration into the complex system of reverse logistics and the second life cycle of batteries. The applicability of the model developed in this case is also demonstrated through the presentation of a case study. I have shown that the maximum number of cycles can be achieved for the batteries if I can determine the optimal battery size for the operation of electric buses and the optimal charge–discharge interval based on the model described in Thesis 3. This will ensure optimization of batteries’ second life cycle from a technical and economic point of view, which will improve the total cost of ownership of electric buses.

The proposed complex system must be able to address the risks arising during the routine operation of increasingly widespread renewable energy-based transport logistics systems, and the methods for managing those risks. A series of analyses highlights the challenges that the transition from fossil energy poses to users wishing to switch to renewable energy sources ([101], [102]).

With bus fleets there are also some cautionary examples of the serious difficulties – and even transport chaos – that can arise without optimal diversification of the mix. Causes for this include extreme changes in climatic conditions – for example in the Netherlands and Germany in recent years, and more recently in Oslo. In the latter case concessions for local transport were awarded to services exclusively using electric buses, but winter temperatures as low as -16°C took their toll on the vehicles [103].

The importance of recycling used batteries is signified by an agreement among seven Japanese companies to introduce a “battery passport” by 2027. This will show the extent of battery degradation and residual power, and will facilitate the application of reverse logistics in this area [104].

It is worth further exploring the links between IT, energy, and the circular economy’s logistics network. The question is how Industry 4.0 can contribute to environmentally and economically sustainable transport, and how the rapidly developing artificial intelligence within Industry 4.0 will support real-time, data-driven business decisions to more effectively achieve the two most important objectives: environmental protection and economic efficiency. The research results I co-authored and published [P/11] support the prominence of data-driven decision-making in the management of complex systems at transportation companies, as well as the role of monitoring processes supported by modern IT systems.

9. Irodalomjegyzék, 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.: 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. (2023): *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.