

Városi autóbusz-hálózat elektrifikációja

Beküldve: 2023.03.29.
Elfogadva: 2023.09.24.
Online közzététel: 2023.12.18.



- id SZILASSY PÉTER ÁKOS** szakmai tanácsadó, tudományos segédmunkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Közlekedési Adatipari Iroda, szilassy.peter@kti.hu, doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, szilassy.peter.akos@kjk.bme.hu
- id DR. FÖLDES DÁVID** tudományos munkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, foldes.david@kjk.bme.hu
- id DR. CSONKA BÁLINT** tudományos munkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, csonka.balint@kjk.bme.hu

Kivonat: Számos városban cél az elektromos autóbuszok részarányának növelése. Jelenleg azonban ezen autóbuszok drágábbak, mint a dízelüzemű járművek, valamint használatuk újszerű tervezési és üzemeltetési eljárások használatát követeli meg (pl. töltésütemezés, önjáró kapacitás). Ezek ellenére az elektrifikációt nem előzi meg hálózat-szintű tervezés. Kutatásunk célja a töltési infrastruktúra tervezésére, az elektromos autóbusz-típus kiválasztására és az elektrifikáció költségbecslésére vonatkozó módszertan kidolgozása volt. A kidolgozott módszer újszerűsége a töltési infrastruktúra viszonylatcsoport-szerinti optimalizálása a hálózat (viszonylatok, menetrend stb.), a jármű és a töltési infrastruktúra jellemzőinek figyelembevételével. A módszert Budapestre alkalmaztuk közös végállomással rendelkező vagy közös szakaszon közlekedő viszonylatok esetében statikus végállomási és dinamikus felsővezetékes töltést figyelembe véve. A jelentős közös szakasszal rendelkező viszonylatcsoportok esetében a fonódó szakaszon felsővezeték telepítése a kedvezőbb költségű, szemben a végállomási töltők alkalmazásával. A közös végállomással, de minimális fonódó szakasszal rendelkező 47 vizsgált viszonylat esetében a végállomási töltés miatti csúcsidei többletjármű-igény csupán +4%. Az eredmények segíthetik a városi autóbusz-hálózat elektrifikációjának tervezését.

Kulcsszavak: autóbusz-hálózat; elektrifikáció; akkumulátoros elektromos autóbusz; trolibusz; statikus töltés; dinamikus töltés; felsővezeték-hálózat

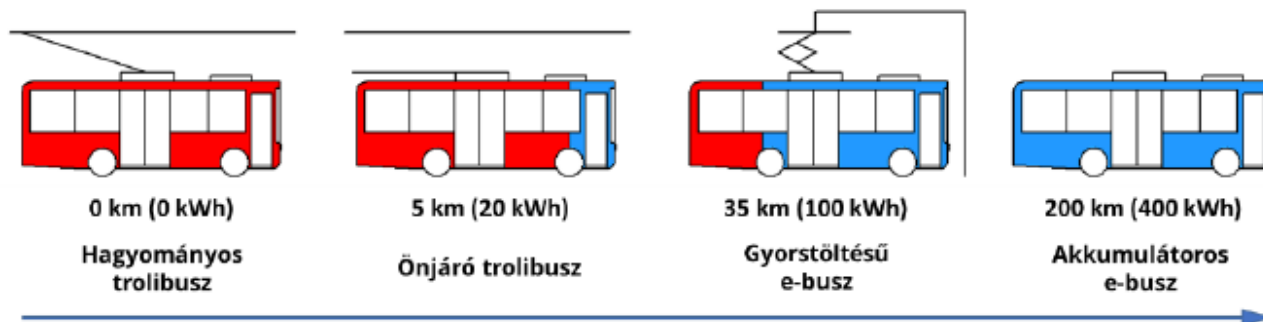
Urban bus network electrification

Abstract: In many cities, there is an important to increase the share of electric buses. Currently, these buses are more expensive than diesel vehicles, and their use requires the use of novel planning and operating procedures (e.g. charging scheduling, authority of bus). Despite these issues, electrification is not preceded by grid-level planning. The aim of our research was to develop a methodology for the design of the charging infrastructure, the selection of the electric bus type and the cost estimation of electrification. The novelty of the developed method is the optimization of charging infrastructure at the bus line group level, considering the characteristics of the network (bus lines, schedule, etc.), the vehicle and the charging infrastructure. The method was applied to Budapest in the case of connections with a common end station or running on a common section, considering terminal static and dynamic overhead line charging. In the case of bus line groups with a significant common section, the installation of an overhead line on the overlapping section is more cost-effective than the use of terminal chargers. In the case of the 47 investigated routes with a common terminus but a minimal overlapping section, the additional peak-time vehicle demand due to terminal charging is only +4%. The results can help the planning of the electrification of the urban bus network.

Keywords: bus network; electrification; battery electric bus; trolleybus; static charging; dynamic charging; catenary network

Bevezetés

Az elektromos autóbuszok hozzájárulnak a lokális lég- és zajszennyezés csökkentéséhez, különösen a városokban (Borén, 2019; Laib et al., 2019). Számos elektromos autóbustípus különböztethető meg a nagy akkumulátorkapacitású járműtől az önjárásra képtelen trolibuszig. Minél nagyobb a használt akkumulátor kapacitása, annál nagyobb az önjáró üzemben megtehető távolság (1. ábra). A technológiai fejlődésnek köszönhetően, melyből az akkumulátoripari fejlődés a legjelentősebb, a nagy hatótávolságú akkumulátoros elektromos autóbuszok rendelkezésre állása és a hatótávja növekszik. Napjainkban több mint 100 000 akkumulátoros elektromos autóbusz közlekedik a világon, főleg Kínában. A piac mérete gyorsan növekszik, a várakozások szerint 2027 végére csaknem 700 000 akkumulátoros elektromos autóbusz fog az utakon közlekedni (Electric Bus Market, 2022).



1. ábra Elektromos autóbuszok önjáróképessége (és jellemző akkumulátorkapacitása)

Forrás: Saját ábra

Statikus töltést jellemzően a telephelyen, végállomáson és megállóban, míg a dinamikus, mozgás közbeni töltési megoldásokat a közös szakaszokon alkalmazzák. Jelenleg a legelterjedtebb dinamikus töltési megoldás a felsővezeték, azonban tesztjelleggel működnek vezeték nélküli megoldások is. A telephelyi töltés kizárólagos használata esetén a járműnek a napi energiaigényét szükséges eltárolnia, ami miatt nagy akkumulátorkapacitásra van szükség. A nagy akkumulátorkapacitás költséges, és jelentősen növeli a jármű tömegét. Továbbá minden autóbushoz külön töltőegység szükséges a telephelyen, ami egy nagy flotta esetén nem hatékony. Kiseb kapacitás esetén üzemidő alatt is szükséges tölteni a járművet a telephelyen, megnövelve a rezsimenetet, ami csökkenti a jármű rendelkezésre állását. Ezért az akkumulátorkapacitás csökkentése érdekében az autóbuszok töltése napközben statikus töltőkkel történhet közös végállomásokon (2/a. ábra), vagy dinamikus töltőkkel a közös szakasz mentén. (2/b. ábra)



a

2. ábra Autóbusz-hálózat típusai: közös végállomás (a), közös szakasz (b)

b

Forrás: Saját ábra

A gyakorlatban ugyanakkor a városi hálózat összetettebb, a hálózatot számos közös végállomás és közös szakasz alkothatja. Továbbá, az elektrifikációt befolyásolja a járművek száma és akkumulátorkapacitásuk, valamint az üzemeltetésükhöz szükséges töltőberendezések száma és teljesítménye. Ezek alapján kutatási kérdéseink a következők: mekkora akkumulátorkapacitás, mekkora töltési teljesítmény, hány darab statikus töltőberendezés és milyen hosszú felsővezetékes szakasz szükséges?

Olyan módszertant dolgoztunk ki, ami a töltési infrastruktúra és az elektromos járműpark összetételét határozza meg a beruházás teljes költségének minimalizálása mellett. A módszer újdonsága, hogy az optimalizálás a viszonylatcsoportokra és nem csak egy viszonylatra történik. Így a tervezés az azonos végponton vagy a közös szakasszal, szakaszokkal rendelkező viszonylatokra végezhető el.

A cikk felépítése: a következő fejezetben a szakirodalmat tekintjük át, majd az elektrifikáció módszertanát ismertetjük. A módszer budapesti esettanulmányban való alkalmazását az ezt követő fejezetben foglaltuk össze. A cikk utolsó fejezetében a kutatás során levont főbb következtetéseket, valamint a további kutatási irányokat foglaljuk össze.

Irodalmi áttekintés

Számos kutató foglalkozik elektromos autóbuszokkal; infrastruktúra tervezési módszerek fejlesztésével vagy olyan üzemeltetési módszerek kidolgozásával, amelyek az elektromos autóbuszok hátrányainak (alacsony hatótáv, hosszú töltési idő stb.) kiküszöbölésére irányulnak. Az akkumulátoros elektromos autóbuszokat a korlátozott hatótávolság miatt leginkább városi környezetben érdemes üzemeltetni (Wu et al., 2021). Helyközi és távolsági közlekedésben 26-60 perces töltési szünet alkalmazása szükséges, ami jelentősen meghosszabbíthatja a teljes utazási időt (Uslu - Kaya, 2021).

A trolibuszok felsővezeték-rendszerének optimális kialakítása (minimális hosszúságú felsővezetékes szakasz) a járművek energiaigényének és a futásteljesítmények figyelembevételével lehetséges (Baumeister et al., 2021). A felsővezeték-hálózat tápellátása adat alapú megközelítéssel is vizsgálható a vontatási állomások áram- és teljesítményadatainak felhasználásával; a módszerrel egy adott szakaszon az energiafogyasztás 7%-os hibával becsülhető (Paternost et al., 2019).

A statikus töltés esetében a két leginkább vizsgált terület a töltőberendezések helyszínének kijelölése, valamint a töltési kapacitások meghatározása. Ehhez a közlekedési és az energiahálózatok közötti kapcsolat értékelése és illesztése is szükséges. Az üzemeltetési költségek idő- és térbeli minimalizálása érdekében a töltőinfrastruktúra kiépítése az elektromos hálózat adottságai szerint optimalizálandó (Lin et al., 2019; Wu et al., 2021). A járművek szükséges akkumulátorkapacitását a statikus töltésen keresztül felvehető energiamennyiség is befolyásolja (Wang X. et al., 2017). Pantográfos villámtöltés mellett csökkenthető az akkumulátor kapacitása. Villámtöltéssel akár 13%-os költségcsökkentés érhető el a lassú töltéshez képest (Wang Y. et al., 2022).

Az akkumulátorok töltöttségi állapota és használati módja nagymértékben befolyásolja a járművek rendelkezésre állását. A töltésütemezés (Liu – Ceder, 2020) és a menetrendek újratervezése (Sebastiani et al., 2016; Tesar et al., 2020) széles körben elfogadott megközelítés. Jól ütemezett végállomási töltéssel az elektromos járművek elérhetősége a dízel autóbuszokéhoz hasonló (He et al., 2019). A kötött útvonalnak és a kiszámítható utasforgalomnak köszönhetően a tömegközlekedési járművek töltéstervezése egyszerűbb, a töltési igény könnyebben becsülhető, mint a személygépkocsik esetében. A töltési stratégiák készítésénél a költségek minimalizálása a cél, ehhez a jármű energiafogyasztását és az elektromos áram átváltozását szükséges figyelembe venni (Wang Y. et al., 2017). A töltési időszakok csúcsidőn kívüli időszakokra való áthelyezésével további költségcsökkentés érhető el, ez azonban a fordák újratervezésével járhat (Leou - Hung, 2017). A töltés okozta pontszerű nagy hálózati terhelés kezelésére helyhez kötött energiatároló rendszer telepíthető. Vezérlési stratégiával és beépített energiatárolóval felszerelt töltőberendezések esetében az elektromos hálózat pillanatnyi energiaigénye akár 70%-kal is csökkenthető (Ojer et al., 2020).

Az irodalomkutatás alapján akkumulátoros elektromos autóbuszok üzemeltetése során a menetrend-újratervezés egy gyakran alkalmazott megközelítés, amely azonban ronthatja a szolgáltatás minőségét. Továbbá a kutatások általában egy típusú töltési infrastruktúrát (statikus vagy dinamikus) vizsgálnak anélkül, hogy ezek vegyes használatát figyelembe vennék. Jelen cikkben korábbi kutatási eredményeinkre is építünk. A statikus és dinamikus töltők elemzésével megállapítottuk, hogy egy egyensúlyi pontot követően vagy statikus vagy a dinamikus töltőket érdemes alkalmazni (Csonka, 2021). Ugyanakkor egy menet megtételéhez szükséges energiafogyasztás és a jármű fordaterve csupán hozzávetőleges becsléssel került figyelembevételre. Jelen cikkben az energiafogyasztás számítását a (Szilassy és Földes, 2022) alapján javítottuk, hogy pontosabb és átfogóbb eredményeket kapjunk.

Módszertan

A járatokat és menetrendet kötöttséggként vettük figyelembe. Statikus végállomási töltést és a dinamikus felsővezetékes töltést elemeztük. Célunk a minimális telepítési költség biztosítása, figyelembe véve a töltés teljesítményét, a kiépítendő statikus berendezések számát és a dinamikus felsővezetékes szakaszok hosszát, valamint a járművek akkumulátorkapacitását, önjáró képességét. A telephelyen történő statikus töltést csak kiegészítő töltésként tekintettük. A közbelső megállóknál lévő statikus töltés lehetőségét figyelmen kívül hagytuk, mivel használatuk az utazási idő jelentős növekedését jelentheti. A jármű tömegének minimalizálása érdekében kisebb akkumulátorkapacitással rendelkező járműveket vizsgáltunk, amelyeket naponta többször is szükséges tölteni.

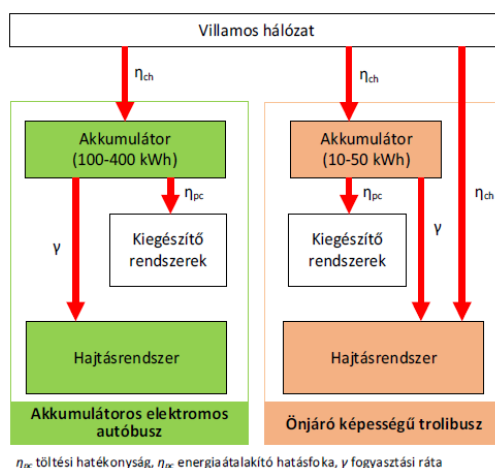
A számítási lépések statikus és dinamikus töltőinfrastruktúra esetében megegyezik, ugyanakkor a számítási mód eltérő lehet. A lépések a következők:

1. Modellezés (hálózati és energia modell)
2. Energiafogyasztás számítása
3. Potenciális töltési idő meghatározása
4. Tölthető energia becslése
5. Energiamérleg számítása
6. Szükséges járművek számának számítása
7. Egyidejűleg töltő járművek számának meghatározása
8. Töltőberendezések meghatározása
9. Beszerzési költség becslése

1. Modellezés (hálózati- és energiamodell)

Minden megálló ($i, j \in 1 \dots n$, ahol n a megállók száma) csúcs, a megállók között irányított szakaszok (élek) értelmezhetők. Egy szakaszt a kezdő és végponti csúcs jelöli (ij szakasz). A legkisebb szakasz két megálló között; a legnagyobb szakasz két végállomás között értelmezhető. Minél részletesebb a szakaszfelosztás, annál pontosabb a becslés.

Az energiahálózattól a hajtásláncig figyelembe vett energiaveszteségeket a 3. ábrán bemutatott energiamodell foglalja össze. Az energiaveszteségeket hatásfok arányokkal fejeztük ki, amelyek a töltés közbeni energiaveszteség és a segédüzemi rendszerek működtetéséhez szükséges energiaátalakítás során keletkeznek. Továbbá az akkumulátor és a hajtáslánc veszteségét az ún. fogyasztási ráta fejezi ki.



η_{ch} töltési hatékonyság, η_{pc} energiaátalakító hatásfoka, γ fogyasztási ráta

3. ábra Energiamodell

Forrás: Saját ábra

2. Energiafogyasztás számítása

Az $E_{\text{DEMAND},ij}$ energiafogyasztás az akkumulátoros elektromos autóbusz alkalmazása esetén végállomások között, trolibuszok alkalmazása esetén két megálló között értelmezendő. Egy szakasz megtételéhez szükséges energiafelhasználás becsléséhez az útvonalon a gyorsulási erőt és a sebességet figyelembe véve a menetdinamikai,

valamint a segédüzemi rendszerek fogyasztásának számítása szükséges (Szilassy – Földes, 2022). A két energia-kategória - E_{DRIVE} menetdinamikai energiafogyasztás és E_{AUX} segédüzemi energiafogyasztás - alapján minden ij szakaszra meghatározható az E_{DEMAND} teljes energiaigény kWh-ban. (1)

$$E_{\text{DEMAND},ij} = E_{\text{DRIVE},ij} + E_{\text{AUX},ij} \quad (1)$$

A korábbi eredményünkhöz (Szilassy – Földes, 2022) képest egyszerűsítésekkel éltünk, mivel részletes trajektória adatok nem álltak rendelkezésre. Általános fogyasztási rátát vezettünk be a különböző gyorsítási, sebeségtartási és lassítási fázisok kifejezésére. A fogyasztási rátát a megállóhelyek miatti fékezéseket és az emelkedők leküzdését leíró fékezési és emelkedési veszteséggel finomítottuk.

Az E_{DRIVE} menetdinamikai fogyasztás a (2) egyenlet alapján határozható meg.

$$E_{\text{DRIVE},ij} = (\gamma + b_{ij} + e_{ij}) \cdot l_{ij} \quad (2)$$

ahol γ a fogyasztási ráta [kWh/km]; amely a hajtáslánc (η_{drive}), és az energia-visszanyerés hatékonyságától (η_{recup}) függ; b a fékezési veszteség [kWh/km]; e az emelkedési veszteség [kWh/km]; l az ij szakasz hossza [km].

A b_{ij} fékezési veszteség a kinetikus energiából számítható, figyelembe véve az ij szakasz megállóinak számát. (3)

$$b_{ij} = \frac{s_{ij} \cdot m_{ij} \cdot v_{\text{max},ij}^2}{2 \cdot l_{ij}} \quad (3)$$

ahol s_{ij} a megállások száma a szakaszon, m_{ij} a jármű tömege egy szakaszon, amely az utasterhelés miatt ingadozhat, v_{max} a szakaszon elérhető legnagyobb sebesség.

Az e_{ij} emelkedési veszteség egy szakaszon a potenciális energiából számítható. (4)

$$e_{ij} = \frac{m_{ij} \cdot g \cdot \Delta h_{ij}}{l_{ij}} \quad (4)$$

ahol g a nehézségi gyorsulás m/s^2 , Δh_{ij} a szakasz magasságkülönbsége [m].

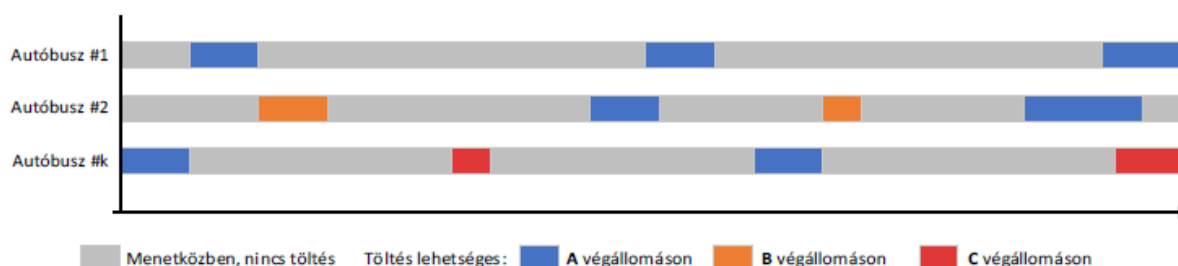
Az E_{AUX} segédüzemi energiafogyasztás a berendezések teljesítménye és használati idejük alapján az (5) egyenlet alapján számítható ((Szilassy és Földes, 2022)). Az alábbi fogyasztókat vettük figyelembe: HVAC (fűtési-, szellőztetési és légkondicionáló rendszer), BTMS (akkumulátor hőmérsékletszabályozó rendszere), elektromos szervokormány, légkompresszor, ajtómozgató motorok, rögzítőfék, ablaktörlő rendszer. Az utastér hűtéséhez/fűtéséhez és a jármű akkumulátorának temperálásához szükséges teljesítményt a hőmérséklet nagyban befolyásolja.

$$E_{\text{AUX}} = P_{\text{AUX}} \cdot t_{ij} \cdot \eta_{pc} \quad (5)$$

ahol t_{ij} az utazási idő egy szakaszon; η_{pc} az energiaátalakító hatásfoka; P_{AUX} a segédüzemi rendszerek teljesítménye; amely a segédrendszerek teljesítményigényének összegzésével határozható meg.

3. Potenciális töltési idő meghatározása

Statikus töltés esetén: Azon időszakok meghatározása, amikor a jármű két menet között a végállomáson tartózkodik. Nem szükséges az egész napot elemezni; a csúcsforgalom jó becslést adhat, mivel a töltési igény várhatóan ebben az időszakban a legmagasabb. Minél hosszabb a figyelembe vett időszak, annál nagyobb a módszer megbízhatósága. A 4. ábra a különböző viszonylatokon közlekedő autóbuszok futási és potenciális töltési idejeit szemlélteti. Az "A" végállomás közös, ahol minden jármű tud tölteni. Autóbusz #1 csak az "A" végállomáson tud tölteni, míg autóbusz #2 a "B", autóbusz #k a "C" végállomáson is tölthet.



4. ábra Az akkumulátoros elektromos autóbuszok potenciális töltési időszakai

Forrás: Saját ábra

Dinamikus töltés esetén: A menetrend szerint egy adott szakaszon eltöltött időszakok meghatározása.

4. Tölthető energia becslése

Egy adott töltőberendezésből felvehető energia a (6) egyenlettel határozható meg figyelembe véve a töltési veszteséget.

$$E_{CHARGED} = t_{ch} \cdot P \cdot \eta_{ch} \quad (6)$$

ahol t_{ch} a jármű töltési ideje egy pontban (végállomáson) vagy szakaszon, P a névleges töltési teljesítmény, és η_{ch} a töltési hatékonyság, ami az akkumulátor töltéséből származó összes veszteséget fejezi ki. A töltési idő meghatározásánál figyelembe veendő a töltés technikai ideje (pl. töltőállomás megközelítése, csatlakozási idő), így a tényleges töltési idő rövidebb, mint a potenciális töltési idő. Az akkumulátorokat nem lehet túltölteni (7).

$$\frac{E_{CHARGED}}{B} \leq 1 - SoC \quad (7)$$

ahol SoC az akkumulátor aktuális töltési szintje; B az akkumulátor kapacitása kWh-ban.

5. Energiamérleg számítása

A jármű ε_{ij} energiamérlege egy szakaszon a szükséges és a töltött energia aránya (8).

$$\varepsilon_{ij} = \frac{E_{DEMAND,ij}}{E_{CHARGED}} \quad (8)$$

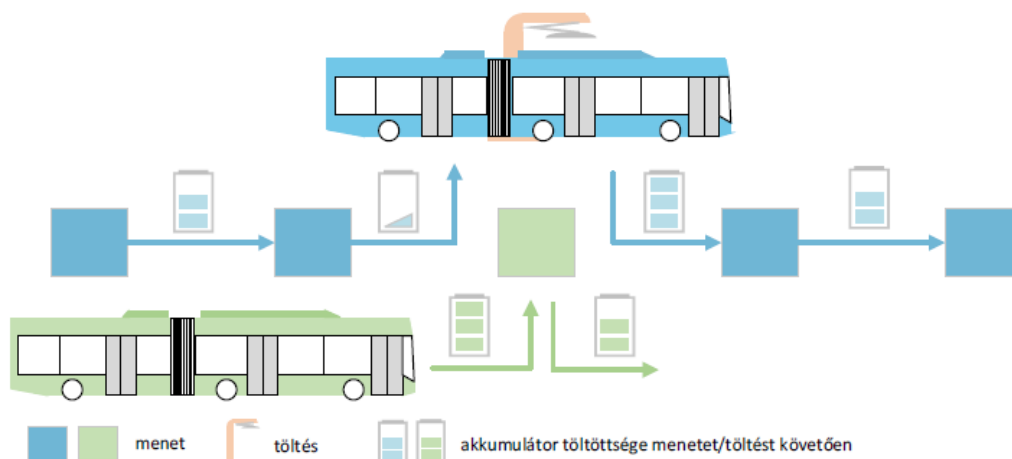
Statikus töltés esetén: ε_{ij} egyenlő vagy kisebb, mint 1, annak érdekében, hogy a töltendő energia elegendő legyen a töltőállomások közötti szakasz (menet) energiaigényének fedezésére. Amennyiben ez nem teljesül, további töltési időre van szükség; mivel a menetrend rögzített, az autóbuszra úgynevezett n_{ts} menetugrás alkalmazandó.

Ha az n_{ts} menetugrás 1, a k autóbusz egy indulást kihagy. Ha az így, a követési idővel megnövelt idő sem elegendő a $\varepsilon_{ij} \leq 1$ teljesüléséhez, újabb menetugrás szükséges. Minden menetugrás egy újabb jármű beállítását jelenti. A t_{ch} módosított töltési idő a nominális töltési idő és a menetugrások miatti időnövekmény összegzésével adható meg, így a felvehető energia számítása (6) módosul (9).

$$E_{CHARGED} = (n_{ts} \cdot t_{hw} + t_{ch}) \cdot P_i \cdot \eta_{ch} \quad (9)$$

ahol t_{hw} a jellemző követési idő adott viszonylaton.

Az 5. ábra olyan esetet mutat be, amikor a menetugrás 1; a kék színű jelzett járműnek tölteni szükséges két menet megtételét követően, ugyanakkor az akkumulátorát nem tudná feltölteni a következő menet kezdetéig, így új autóbusz beállítása szükséges a zöld menet teljesítéséhez.



5. ábra Menetugrás

Forrás: Saját ábra

Dinamikus töltés esetén: A teljes viszonylatra értelmezett energiamérleg (szakaszonkénti energiamérleg összesítése) szükséges, hogy kisebb, vagy egyenlő legyen, mint 1. Ameddig ez nem teljesül, újabb felsővezetékes szakasz kijelölése szükséges.

Mind statikus, mind dinamikus töltés esetén, ha a B akkumulátorkapacitás nagyobb, mint az E_{DEMAND} , akkor a jármű alkalmazható. Az autóbussz aktuális töltöttségi szintje nem lehet alacsonyabb egy minimális szintnél (pl. SoC=20%). Az akkumulátor töltöttségének alsó korlátjára vonatkozó feltételt a (10) egyenlet írja le.

$$B \cdot \eta_{batt} \geq E_{DEMAND,ij} \quad (10)$$

ahol η_{batt} az akkumulátor kapacitáskihasználtsága (ha a szükséges minimum SoC 20%, $\eta_{batt}=0,8$).

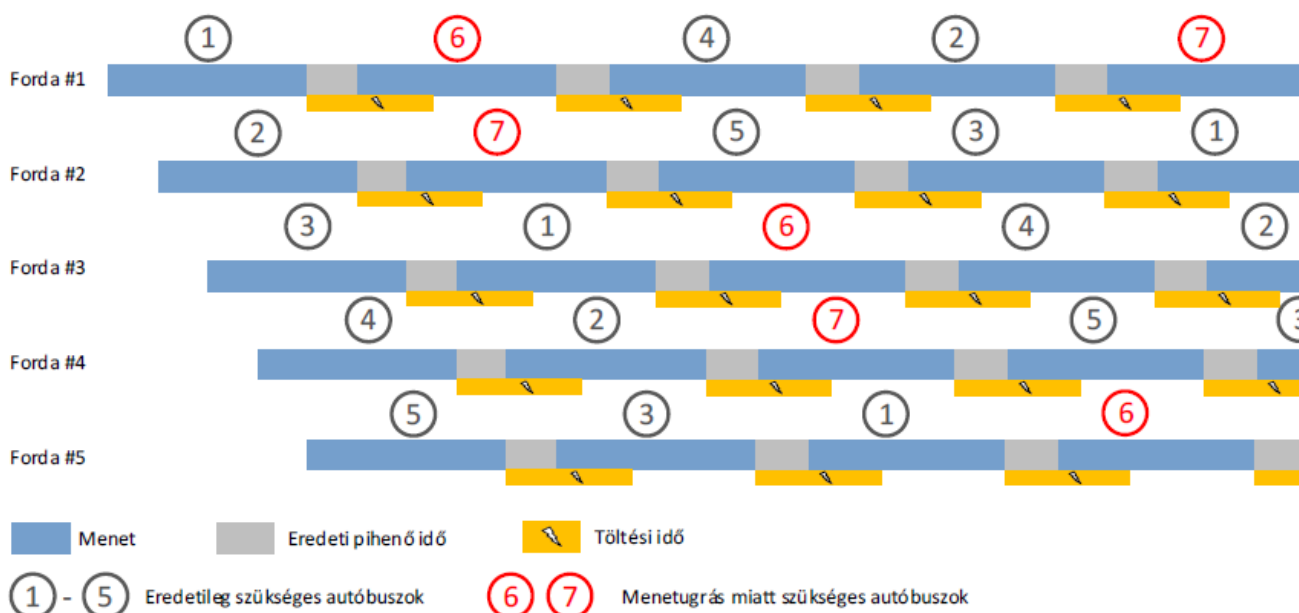
6. Szükséges járművek számának számítása

Statikus töltés esetén: Adott viszonylaton szükséges akkumulátoros elektromos autóbusszok száma a jelenleg szükséges hagyományos meghajtású autóbusszok és a menetugrások számának összege. (11)

$$n_{ebus} = n_{bus} + \sum n_{ts} \quad (11)$$

ahol n_{bus} a jelenleg szükséges autóbusszok száma.

A 6. ábra a menetugrást és a menetugrás miatti extra elektromos autóbussz igényt szemlélteti egy példa viszonylat esetében. Az elektrifikációt megelőzően dízel autóbusszokkal a viszonylat öt fordával, vagyis öt dízel autóbusszal szolgálható ki (sorok). Elektrifikációt követően, a végállomási töltési időszükséglet miatt +2 jármű, azaz összesen 7 akkumulátoros elektromos autóbussz szükséges. Minden autóbussznak egy menetet (kék sáv) követően tölteni szükséges. Az eredetileg rendelkezésre álló menetek közötti pihenő idő (szürke sáv) nem elegendő a töltésre (sárga sáv). Például: autóbussz 1 nem tudja az eredeti 2. menetet teljesíteni, menetugrás alkalmazása szükséges és extra autóbussz beállítása (autóbussz 6). Azonban autóbussz 1 töltése az eredeti 2. fordá 2. menetének kezdetére sem fejeződik be, így újabb menetugrás alkalmazása, ezáltal újabb extra autóbussz beállítása (autóbussz 7) szükséges. Ekkor autóbussz 2 is már tölt. Tehát autóbussz 1 a töltését követően az eredeti 3. fordá 2. menetét tudja elkezdni. Az eredeti fordák megváltoznak, a töltési szükséglet miatt a fordák eltolása szükséges az ábrán látható módon. A példában a végállomáson egyidejűleg három autóbussz is tölt.



6. ábra Fordaváltozás a menetugrás következtében

Forrás: Saját ábra

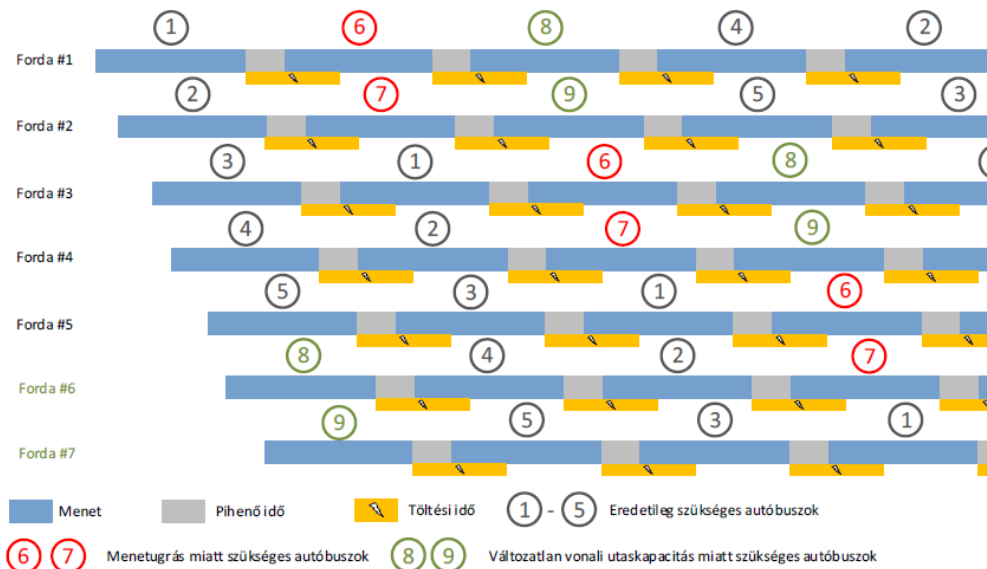
Általánosságban a nagyobb akkumulátorkapacitással rendelkező járművek utasbefogadóképessége kisebb. Mivel az össztömeg nem változik, de az akkumulátorok tömege nagyobb, a szállítható személyek száma csökken. Amennyiben a cél a változatlan utaskapacitás biztosítása a viszonylaton, úgy többletjárművek beállításra és az

indulási időpontok változtatására (sűrítésre) van szükség. A menetugrás miatt beállított járművek nem nyújtanak többletkapacitást, csupán a töltési időszükségletre jelentenek megoldást. A szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok számának meghatározásához a (11) egyenlet kiegészítése szükséges (12):

$$n_{ebus} = (1 - \Delta q) \cdot n_{bus} + \sum n_{ts} \quad (12)$$

ahol Δq az utaskapacitásváltozás.

Feltételezzük, hogy az előbbi példa viszonylat esetében a vonali utaskapacitás változatlan tartása miatt további két jármű beállítása szükséges. Ennek következtében az indítási időköz csökken. A 7. ábra a kialakított új fordatervet szemlélteti.



7. ábra Fordaváltozás a változatlan vonali utaskapacitás biztosítása érdekében

Forrás: Saját ábra

Dinamikus töltés esetén: A szükséges trolibuszok n_{tbus} száma nem változik. A felsővezetékes szakaszokat úgy szükséges kialakítani, hogy a viszonylat azonos számú járművel kiszolgálható legyen. Változatlan vonali utaskapacitás biztosítása mellett a járműszám változhat (13).

$$n_{tbus} = (1 - \Delta q) \cdot n_{tbus} \quad (13)$$

7. Egyidejűleg töltő járművek számának meghatározása

Statikus töltés esetén: A végállomáson töltő járművek $n_{ch(t)}$ száma a t időszakban a végállomáson tartózkodó autóbuszok száma alapján határozható meg. (14)

$$n_{ch}(t) = \sum p(t) \quad (14)$$

ahol p a töltés valószínűsége. A végállomáson minden autóbushoz rendelhető egy töltési valószínűség. A valószínűségi érték meghatározása az energiamérleg szerint történik. Az értékek egy lehetséges kategorizálását az 1. táblázat mutatja be. Elérhető szabad töltőberendezés valószínűsége növelhető a p és $\max(E)$ közötti különbség növelésével, mivel így több töltőberendezés telepítése válik szükségessé. Ez azonban csökkenti egy töltő átlagos kihasználtságát.

1. táblázat A töltés valószínűsége

ε	0-0,29	0,3-0,39	0,4-0,54	0,55-0,74	0,75-0,79	0,8-1,0
p	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0

Forrás: Saját értékmegadás

Dinamikus töltés esetén: Csatlakoztatott és töltő trolibuszok $n_{ch}(t)$ számának meghatározása t időintervallumban (13). A p valószínűség bevezetésével kifejezhető annak valószínűsége, hogy a jármű a t időszakban tölt.

$$n_{ch}(t) = n_{tbus,ij}(t) \cdot p \quad (15)$$

ahol $n_{tbus}(t)$ a trolibuszok száma a szakaszon a t időintervallumban. A figyelembe vett t időtartamnak megfelelően kicsinek kell lennie (maximum 1 perc), mivel a szükséges töltési teljesítményt a jármű gyorsítási karakterisztikája befolyásolja. A csúcsteljesítmény akkor adódik, ha a szakaszon lévő összes jármű gyorsít.

8. Töltőberendezések meghatározása

A végállomási statikus töltőberendezések számának, és azon szakaszok meghatározása, ahol felsővezeték kiépítése szükséges.

Statikus töltés esetén: A maximális töltési igény kielégítéséhez szükséges n_d végállomási töltőberendezés száma a (14) egyenlet alapján számítható.

$$n_d = \lceil \max(\sum n_{ch}(t)) \rceil + 1 \quad (16)$$

Dinamikus töltés esetén: Mohó telepítési stratégia alkalmazandó. Az a szakasz jelölendő ki felsővezeték telepítésre, ahol a járatok száma a teljes vizsgált hálózaton a legnagyobb. Ha a vételezett energia nem elegendő a további szakasz(ok) megtételéhez önjáró üzemben $\sum E_{CHARGED,ij} \geq \sum E_{DEMAND,ij}$, további felsővezeték szakasz(ok) kijelölése szükséges.

- VAGY a meglévő felsővezetékes szakasz kiterjesztése egy szomszédos szakasz kiválasztásával a fajlagos telepítési költségek minimalizálásával,
- VAGY egy teljesen különálló szakasz (szomszédos felsővezetékes szakasz nélkül) választása; például ott, ahol magas az egyidejűleg töltő járművek száma; a telepítési költség magasabb lehet, mivel további villamos hálózati beruházások szükségesek.

A telepítési költségek minimalizálásához kétirányú felsővezetékes szakaszok építése javasolt.

9. Beszerzési költség becslése

A becsült beszerzési költség a (15) egyenlettel adható meg az akkumulátoros elektromos autóbuszok vásárlására és a statikus töltők kiépítésére C_{ebus} , valamint a (16) egyenlettel trolibuszok vásárlására és a felsővezeték-hálózat kiépítésére C_{tbus} vonatkozóan.

$$C_{ebus} = n_{ebus} \cdot c_{ebus} + n_{ch} \cdot c_{ch} \quad (17)$$

$$C_{tbus} = n_{tbus} \cdot c_{tbus} + l_{ch} \cdot c_{cat} \quad (18)$$

ahol c_{ch} a statikus töltőberendezés névleges költsége, c_{cat} a töltéshez szükséges felsővezeték névleges költsége, c_{ebus} az akkumulátoros elektromos autóbusz beszerzési ára, c_{tbus} a trolibusz beszerzési ára.

A c_{grid} hálózatfejlesztési költségére közelítő becslés adható a végponton vagy egy szakaszon lévő összesített csúcsteljesítmény alapján (17).

$$C_{grid} = P_{peak} \cdot c_{grid} \quad (19)$$

ahol c_{grid} a hálózatfejlesztés nominális költsége, beleértve az erőművi kapacitásbővítést és az átviteli és elosztó hálózat fejlesztését. A P_{peak} a (18) egyenlet szerint számított csúcsteljesítmény.

$$P_{peak} = n_{ch}(t) \cdot P \quad (20)$$

Minél részletesebb költségadatok állnak rendelkezésre, annál kevésbé lesznek az eredmények közelítő jellegűek.

Megjegyzés: a további infrastrukturális elemek, például a telephelyen lévő töltőberendezések, a telepített eszközök karbantartása és javítása nem tartozik jelen kutatástanulmány hatókörébe.

Esettanulmány

A kidolgozott módszert a kiterjedt tömegközlekedési hálózattal rendelkező Budapestre alkalmaztuk. A metró és a villamosvonalak mellett közelítőleg 250 autóbusz-viszonylat közel 3000 km hosszúságú hálózaton és 15 trolibusz-viszonylat közel 100 km hosszúságú hálózaton nyújt szolgáltatást. A Budapesti Közlekedési Központ adatai¹ alapján egy átlagos hétköznap 3,1 millió utazás történik, amelyek közel 50%-a autóbusszal vagy trolibusszal történik.

A teljes vizsgálat során összesen nyolc autóbusz-végállomást (43 viszonylattal) és hét viszonylatcsoportot (47 viszonylattal), összesen 85 viszonylatot elemeztünk a reggeli csúcs időszakban, 6-9 óra között. A vizsgált viszonylatokon a reggeli csúcsidőben a forgalomba kiadott járművek közel 43%-a közlekedik. A hét viszonylatcsoport esetében vizsgáltuk, hogy önjáró trolibuszokkal, vagy akkumulátoros elektromos autóbusszokkal előnyösebb az elektrifikáció, míg a végállomások vizsgálatánál csak az akkumulátoros elektromos autóbusszos elektrifikációt tekintettük.

Változók értékmegadása és egyszerűsítések

A tanítási időszakban, hétköznap reggel 6 és 9 óra között érvényes menetrendet és fordatervet vettük alapul.

A γ fogyasztási rátát a (Vepsäläinen et al., 2018) tanulmányban megadott általános fogyasztás alapján becsültük meg. Szóló jármű esetén a fogyasztás mértéke $\gamma = 0,9$ kWh/km, csuklós jármű esetén $\gamma = 1,3$ kWh/km.

A $v_{\max}$ maximális sebességet egy adott szakaszon elérhető átlagos sebesség alapján határoztuk meg.

- ha $v_{\text{ave}} \leq 25$ km/h, akkor $v_{\max} = 30$ km/h,
- ha $25 \text{ km/h} < v_{\text{ave}} \leq 30$ km/h, akkor $v_{\max} = 40$ km/h,
- ha $v_{\text{ave}} > 30$ km/h, akkor $v_{\max} = 50$ km/h.

Segédüzemi fogyasztóként az alábbi fogyasztókat vettük figyelembe (Szilassy és Földes, 2022): HVAC, BMTS, légkompresszor, szervokormány, rögzítőfék, ablaktörlő, ajtó, lámpa, automata, utastájékoztató kijelző. Az egyszerűsítés érdekében ugyanazokat az értékeket alkalmaztuk szóló és csuklós járművek esetében.

A HVAC és BMTS rendszerek hőmérsékletfüggése jelentős összefüggést mutat (Basma et al., 2020; Vepsäläinen et al., 2018). Annak meghatározásához, hogy melyik hőmérsékletértékre érdemes tervezni, elemeztük a 2008 és 2019 közötti téli napi minimum és nyári maximum hőmérsékletértékeket előfordulási gyakoriságát. A téli napokon 16% az esélye annak, hogy a napi hőmérséklet alacsonyabb, mint -5°C . A legalacsonyabb fok az elmúlt időszakban -16°C volt. Nyári napokon 4,2% az esély, hogy a napi hőmérséklet 35°C fölé emelkedjen. A legmagasabb hőmérséklet 39°C volt. A 3. lépést a 44-es (csuklós) és a 144-es (szóló) viszonylatokra alkalmaztuk. A becsült energiafogyasztást különböző hőmérsékleteken a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat Becsült energiafogyasztás különböző hőmérsékleteken (példa)

Viszonylat	Külső hőmérséklet [$^\circ\text{C}$]										
	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
44	26,69	25,59	22,15	19,35	17,19	15,69	14,83	14,61	15,04	16,12	17,85
144	20,23	17,25	14,74	12,71	11,14	10,04	9,42	9,26	9,58	10,36	11,62

Forrás: Saját számított adatok

Az energiafogyasztás értéke hidegben nagyobb, mint melegben. Számítások során a -5°C -hoz tartozó energiafogyasztást vettük figyelembe. Ennek megfelelően egy év alatt maximum 4% az esélye annak, hogy a számítottnál magasabb az energiafogyasztás. Ez mindösszesen 15 nap egy évben, kizárólag a téli időszakban. Ekkor a járművek utasterének alacsonyabb hőmérsékletre történő fűtésével a fogyasztás csökkenthető.

A felsővezetékes szakaszok figyelembe vett P névleges teljesítménye 100 kW. Statikus töltők esetében hat különböző névleges teljesítményt vettünk figyelembe a tervváltozatok kialakítása során; $P_t = [100, 200, 300, 350, 400, 450]$ kW. Egyszerűsítésképp egy adott végállomáson az összes töltő azonos névleges teljesítményű. A töltési hatékonyság a transzformátor veszteségből, a kábelvesztéséből, az akkumulátorfigyelő rendszer (BMS) veszteségből, az akkumulátorkomponens ellenállásából és a különböző elektromos alkatrészek feszültségeséséből származik. A figyelembe vett η_{ch} töltési hatékonyság 0,85 akkumulátoros elektromos autóbusszoknál és 0,7 az önjáró trolibuszoknál.

¹ <https://bkk.hu/magunkrol/rolunk/a-bkk-szamokban/>

Két-két különböző akkumulátorkapacitású (B) járművet tekintettünk a vizsgálat során. Azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a hasznos akkumulátorkapacitás fele a névlegesnek. Ez egy maximális, kisebb ráhagyással számított érték (worst case), amely feltételezi a 80%-os akkumulátorhatékonyságot és az optimális 20-80%-os tartományban üzemeltetett akkumulátorokat. A figyelembe vett akkumulátorkapacitást és egy jármű beszerzési árát a 3. táblázat foglalja össze. Változatlan járműtömeggel számoltunk; a járműtömeg (m) szóló járműveknél 17 tonnának, csuklós járműveknél 29 tonnának választottuk. Azonban a nagyobb akkumulátorkapacitás a szállítható személyek számának csökkenését jelentheti. A piacon elérhető járművek összehasonlításával meghatároztuk a szállítható személyekben bekövetkező változást a jelenlegi dízel és pár kilométeres önjárásra képes trolibuszokat véve referencia értéknek (100%).

A töltőinfrastruktúra figyelembe vett beszerzési költségét gyakorlati és piacelemzésből származó adatok alapján becsültük meg. Egy felsővezeték ccat névleges költsége 750 000 EUR/km. Megkülönböztettük, hogy egy szakasz hány viszonylatot szolgál ki. Így a forgalomtól függő villamosenergia-hálózati terhelés miatt a felsővezeték költsége 1-2 viszonylat kiszolgálása esetén 750 000 EUR/km, 3-5 viszonylat kiszolgálása esetén 1 000 000 EUR/km, 5-nél több viszonylat kiszolgálása esetén 1 500 000 EUR/km. Hegyvidéki szakasz esetén – a bonyolultabb terepviszonyok miatt – az eggyel magasabb kategóriát vettük számításba. Egy statikus töltő c_{cn} költsége a 100, 300 és 450 kW névleges teljesítmény szerint 50 000, 200 000 és 450 000 EUR. A villamos hálózatfejlesztés névleges cgrid költségét 600.000 EUR/MW-nak választottuk.

3. táblázat Figyelembe vett akkumulátorkapacitás és beszerzési költség

		Akkumulátor-kapacitás [kWh]		Beszerzési költség [EUR]	Útas-kapacitás [fő]	Rel. Kapacitás [%]
		névleges*	hasznos			
akkumulátoros elektromos autóbusz	szóló, kis kapacitással	200	100	562 500	78	100
	szóló, nagy kapacitással	250	125	600 000	56	72
	csuklós, kis kapacitással	300	150	750 000	120	100
	csuklós, nagy kapacitással	400	200	850 000	90	75
önjáró trolibusz	szóló, kis kapacitással	50	25	500 000	78	100
	szóló, nagy kapacitással	100	50	537 500	56	72
	csuklós, kis kapacitással	50	25	587 500	120	100
	csuklós, nagy kapacitással	100	50	625 000	98	82

Forrás: Saját értékmegadás piacon elérhető járművek adatainak figyelembevételével

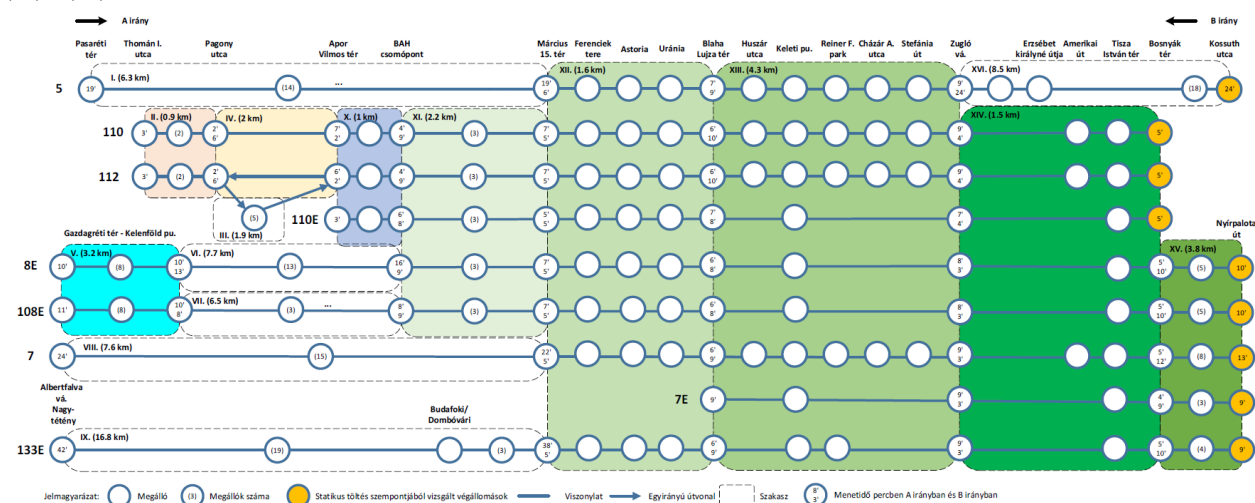
A katalógus adatokból a Mercedes és a Solaris releváns járműveit vettük figyelembe. A relatív kapacitás a jelenleg forgalomban lévő dízelüzemű autóbuszok kapacitásaihoz képest értendő.

Eredmények és megjegyzések

A módszer alkalmazását részletesen egy, a városközponton áthaladó, a város délnyugati és északkeleti részét összekötő viszonylatcsoporton ismertetjük. A Rákóczi úti viszonylatcsoport, 2022. júniusi állapot alapján az alábbi viszonylatokból állt: 5, 7, 7E, 8E, 108E, 110, 110E, 112, 133E (aláhúzással a szóló autóbuszokkal kiszolgált viszonylatokat jelöltük). Az „E” jelek a gyors, expressz viszonylatokat jelölik, amelyek nem minden megállót szolgálnak ki.

1. lépés - Modellézés: A hálózati modellt a 7. ábra mutatja be. A viszonylatok jelentős közös szakaszokkal rendelkeznek. Több viszonylat esetén a végállomások is megegyeznek. A közös hálózati elemeket tekintve három végállomást és 16 szakaszt határoztunk meg. Viszonylatonként a két irányt külön kezeltük, irányonként eltérő energiaigényt megkülönböztetve. A XIII. szakaszon egy rövid, 400 m-es hosszban egyirányú felsővezeték is található

(79-es viszonylat), ezt a szakaszt a vizsgálat során figyelmen kívül hagytuk. A szakaszhatárok a közös szakaszok kezdőpontjától a végpontjáig tartanak. A következő szakaszok hegyvidéki szakaszok jelentős emelkedőkkel: I, II, III, IV, V, VI, X, XI.



8. ábra Hálózati ábra

Forrás: Saját ábra

Az adott szakasz hosszát online térkép segítségével mértük le; az egyes szakaszokon a menetidőt a statikus menetrend alapján képeztük. Egy szakaszon egyidőben egyszerre tartózkodó járművek számát szintén a menetrend alapján határoztuk meg.

Statikus végállomási töltés vizsgálatánál a végállomáson elérhető töltési teljesítmény alapján tervváltozatokat határoztunk meg; a figyelembe vett hat különböző névleges teljesítményű töltőpont szerint. Feltételeztük, hogy az optimalizálás során legjobbnak ítélt töltési teljesítmény nyújtható is, az adott végállomáson.

Dinamikus, felsővezetékes töltésnél a Mohó-algoritmust követve a XIII. szakaszt jelöltük ki elsőnek (legtöbb járat), majd további szomszédos szakaszokat adtunk hozzá.

2. lépés – Energiafogyasztás számítása: A szakaszonként fogyasztott energiaértéket viszonylatonként határoztuk meg (4. táblázat). Az egyes szakaszokon a megállások száma befolyásolja a fékezési veszteség miatt fogyasztott energiát. A hegyvidéki szakaszon lejtőn mérve a emelkedési veszteség akár negatív is lehet, mivel az akkumulátorba energia táplálható vissza. A fogyasztott energia ugyanazon a szakaszon különbözhet annak függvényében, hogy szóló vagy csuklós autóbusz közlekedik.

4. táblázat Energiafogyasztás egy szakaszon viszonylatonként (kivonat)

Fogyasztás	Irány	...	VI. (8E)	VII. (108E)	...	X. (110, 112)	XI. 110, 112	XI. (8E, 108E)	...
b_{ij} [kWh/km]	A	...	0,51	0,36	...	0,49	0,3	0,51	...
	B	...	0,47	0,6	...	0,58	0,3	0,51	...
e_{ij} [kWh/km]	A	...	-0,67	0,02	...	-1,48	-0,22	-0,37	...
	B	...	0,84	-0,02	...	1,85	0,27	0,47	...
$E_{DEMAND,ij}$ [kWh]	A	...	8,74	10,94	...	-0,09	2,15	3,16	...
	B	...	20,13	12,21	...	3,34	3,24	5,01	...
$E_{AUX,ij}$ [kWh]	A	...	6,16	3,08	...	1,54	2,7	2,7	...
	B	...	5	3,08	...	0,77	3,46	3,46	...
$E_{DEMAND,ij}$ [kWh]	A	...	14,9	14,02	...	1,45	4,85	5,85	...
	B	...	25,13	15,29	...	4,11	6,7	8,47	...

Forrás: Saját számított adatok

A teljes vonali energiafogyasztás az egyes szakaszokra meghatározott értékek összegzésével számítható (5. táblázat). Mivel vonalanként csak egy végállomást vettünk figyelembe potenciális töltési helynek, ezért mindkét irányt egy töltéssel szükséges lefedni.

5. táblázat Teljes energiafogyasztás viszonylatonként és irányonként [kWh]

<i>Irány</i>	<i>5</i>	<i>7</i>	<i>7E</i>	<i>8E</i>	<i>108E</i>	<i>110</i>	<i>110E</i>	<i>112</i>	<i>133E</i>
<i>A</i>	61,17	59,47	25,41	67,58	57,03	26,61	22,76	25,97	75,87
<i>B</i>	66,02	56,09	23,75	68,04	67,87	42,21	25,73	42,21	69,74
<i>Összesen</i>	127,2	113,6	49,2	135,6	124,6	68,6	48,5	68,2	145,6

Forrás: Saját számított adatok

Ennek megfelelően elegendő kisebb akkumulátorkapacitácú (200 kWh névleges) szóló elektromos autóbusz a 110, 110E, 112 viszonylatra, és kisebb akkumulátorkapacitású (300 kWh névleges) csuklós a 7, 7E viszonylatokra.

3. lépés – Lehetséges töltési idő meghatározása: A jelenlegi fordatervek alapján meghatároztuk, hogy egy autóbusz mennyi időt tölt a végállomáson. Mivel Budapesten a műszak során egy járművezető egy autóbuszt vezet, a sofőrök pihenő idejét is figyelembe vettük, mint lehetséges töltési idő. Trolibuszok esetében a lehetséges töltési időt az i és j megállóhelyek közötti statikus menetrend adja meg. A 6. ábrán tüntettük fel az utazási időket. Az „A” irány időértékét a felső szám jelzi, míg a „B” irány időértékét az alsó szám mutatja.

4. lépés – Tölthető energia becslése: Statikus töltőn leadott percenkénti energia rendre 1,42; 2,83; 4,25; 4,96; 5,67 és 6,38 kWh 100, 200, 300, 350, 400, 450 kW töltési teljesítmény és a figyelembe vett töltési hatékonyság mellett. Például: dinamikus, felsővezetékes töltés esetén a XI. szakaszon: „A” irányban 5,83 kWh (ha az utazási idő: 5 perc) vagy 8,16 kWh (ha az utazási idő: 7 perc), „B” irányban 9,33 kWh (ha az utazási idő: 8 perc) vagy 10,5 kWh (ha az utazási idő: 9 perc).

5. és 6. lépés – Energiamérleg és a szükséges járművek számának számítása: Az energiamérleg alapján vannak olyan autóbuszok, amelyeket nem lehet teljesen feltölteni a végállomáson, ezért menetugrás és további járműbeállítás szükséges. Statikus végállomási töltés esetén a töltési teljesítmény alapján szükséges járművek számát végállomásonként és viszonylatonként a 6. táblázat tartalmazza. Jelenleg a 110, 110E és 112 viszonylatokat ugyanazok az autóbuszok szolgálják ki. A flotta növekedés 50% feletti, ha a töltési teljesítmény 100 kW, és 11%, ha a töltési teljesítmény 450 kW. A 7E és 108E kivételével minden viszonylaton legalább egy további akkumulátoros elektromos autóbuszra szükség van. Ugyanennyi akkumulátoros elektromos autóbusz elegendő a 7E viszonylat kiszolgálásához minimum 350 kW töltőteljesítmény, és 108E viszonylat kiszolgálásához minimum 200 kW töltőteljesítmény biztosításával.

6. táblázat Szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok száma töltési teljesítmény szerint

	<i>Viszonylat</i>	<i>Jelenlegi</i>	<i>Tervváltozatok (Töltési teljesítmény alapján [kW])</i>					
			<i>100</i>	<i>200</i>	<i>300</i>	<i>350</i>	<i>400</i>	<i>450</i>
<i>Buszok száma</i>	<i>5</i>	<i>20</i>	30	25	23	23	23	22
	<i>7</i>	<i>16</i>	24	20	18	18	18	17
	<i>7E</i>	<i>18</i>	24	20	19	18	18	18
	<i>8E</i>	<i>19</i>	29	24	22	22	21	21
	<i>108E</i>	<i>3</i>	4	3	3	3	3	3
	<i>110/110E/112</i>	<i>27</i>	36	32	30	30	30	30
	<i>133E</i>	<i>19</i>	30	24	22	22	21	21

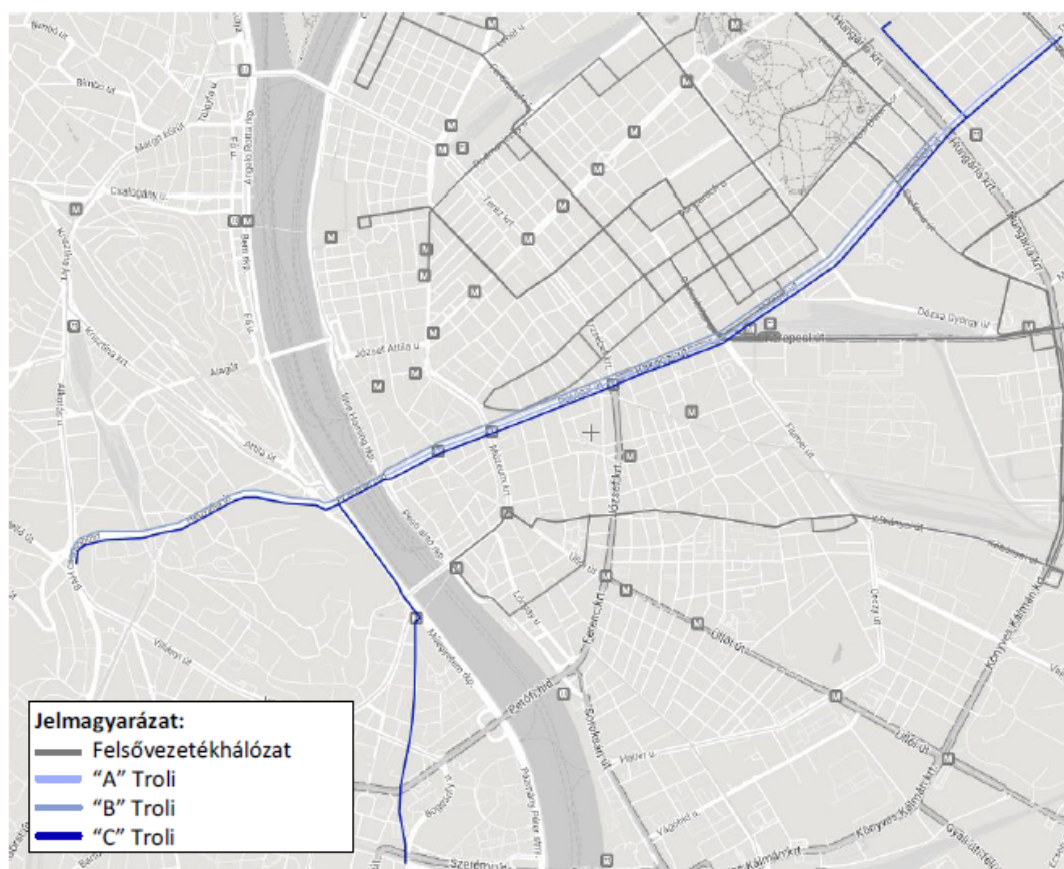
Forrás: Saját számított adatok

Önjáró trolibuszok alkalmazásával és felsővezetés-szakaszok kiépítésével elektrifikálható viszonylatokat a 7. táblázat foglalja össze a trolibuszok névleges akkumulátorkapacitásának feltüntetése mellett változatonként. Az „A” tervváltozatban a XII., XIII. és XIV. szakaszon kiépítendő felsővezeték-hálózat nem tud elegendő energiát biztosítani az önálló szakaszok teljesítéséhez az 5-ös, 8E és 108E viszonylatok esetében. A „B” tervváltozatban a XI., XII. és XIII. szakaszon kiépített felsővezeték-hálózat esetén csak az 5-ös és a 133E viszonylatok elektrifikációja nem lehetséges. A „B” változat kiegészítésével képezhető a „C” tervváltozat; a IX. szakaszon a Budafoki út/Dombóvári útig (további 4,8 km) és a XVI. szakaszon az Erzsébet királyné útig (további 1 km) javasolt a felsővezetékes szakasz meghosszabbítása. Ezen kiegészítéssel a 133E és az 5-ös viszonylatok is kiszolgálhatók önjáró trolibuszokkal. A trolibuszok száma minden tervváltozatban megegyezik a dízel autóbuszok jelenlegi számával. A trolibusz tervváltozatokat térképes nézetben a 8. ábra foglalja össze.

7. táblázat A viszonylatokon alkalmazandó trolibuszok minimális névleges kapacitása változatonként

Viszonylat	Trolibusz tervváltozat		
	A	B	C
5	nem kiszolgált	nem kiszolgált	100 kWh
7	100 kWh	100 kWh	100 kWh
7E	50 kWh	50 kWh	50 kWh
8E	nem kiszolgált	100 kWh	100 kWh
108E	nem kiszolgált	100 kWh	100 kWh
110	50 kWh	50 kWh	50 kWh
110E	50 kWh	50 kWh	50 kWh
112	50 kWh	50 kWh	50 kWh
133E	nem kiszolgált	nem kiszolgált	100 kWh

Forrás: Saját számított adatok



9. ábra Trolibusz tervváltozatok

Forrás: Saját ábra OSM térképen

7. és 8. lépés – Egyidejűleg töltő járművek számának és töltőberendezések meghatározása: A szükséges statikus töltőberendezések száma egy végállomáson megegyezik az egyidejűleg a végállomáson töltőjárművek számával. A 8. táblázat a statikus töltőkészülékek számát foglalja össze a töltési teljesítmény szerint a vizsgált végállomásokon. A dinamikus töltők hossza megegyezik a szakaszok hosszával: „A” tervváltozat: 7,4 km; „B” tervváltozat: 8,1 km; „C” tervváltozat: 13,9 km.

8. táblázat Statikus töltőberendezések száma a végállomásokon

Végállomás	Kiszolgált viszonylat	Tervváltozatok (Töltési teljesítmény alapján [kW])					
		100	200	300	350	400	450
Kossuth utca	5	11	6	4	4	3	3
Bosnyák tér	110/110E/112	10	6	4	4	3	3
Nyírpalota út	7, 7E, 8E, 108E, 133E	39	20	14	12	14	12

Forrás: Saját számított adatok

9. lépés – Beszerzési költség becslése: A hat tervváltozatból három akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozat beszerzési költségét végállomásonként a 9. táblázat foglalja össze. A táblázat tartalmazza a végállomási csúcsteljesítmény értékeket. Minden végállomás esetén a 450kW teljesítményű töltőberendezések alkalmazása a leginkább költséghatékony.

Végállomás	Kiszolgált viszonylat	Tervváltozatok (Töltési teljesítmény alapján [kW])					
		100	200	300	350	400	450
Kossuth utca	5	11	6	4	4	3	3
Bosnyák tér	110/110E/112	10	6	4	4	3	3
Nyírpalota út	7, 7E, 8E, 108E, 133E	39	20	14	12	14	12

9. táblázat Akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozatok beszerzési költsége végállomások szerint (kivonat)

Forrás: Saját számított adatok

Vannak olyan viszonylatok, amelyek kisebb teljesítménnyel is kiszolgálhatók a járművek számának növelése nélkül, ugyanakkor célunk végállomásonként egységes töltési teljesítmény nyújtása volt, annak érdekében, hogy a járművekhez ne kelljen dedikált töltőt kijelölni. A csak akkumulátoros elektromos autóbuszokkal történő elektrifikáláshoz összesen 18 db 450 kW teljesítményű statikus termináltöltőre és 129 db járműre van szükség.

A trolibusz tervváltozatok és a leg gazdaságosabb, csak akkumulátoros elektromos autóbuszokat és végállomási statikus töltőket tartalmazó változat főbb jellemzőit a 10. táblázatban foglaltuk össze. Az eltérő megállóhely-kiosztás miatt kitérők beépítése szükséges lehet a trolibuszváltozatok esetében, ami növelheti a költségeket. Két esetet különböztettünk meg:

1. eset: az akkumulátor tömege miatti utaskapacitás-csökkenést figyelmen kívül hagytuk.
2. eset: a jelenleg biztosított viszonylatonkénti utaskapacitás változatlanul tartása; többlet járművek számának meghatározása az akkumulátor tömege miatti utaskapacitás-csökkenést kompenzálандó

10. táblázat Trolibusztervváltozatok és a legkedvezőbb akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozat beszerzési költsége

Végállomás	Kossuth utca			Bosnyák tér			Nyírpalota út		
Töltési teljesítmény [kW]	100	300	450	100	300	450	100	300	450
Töltőberendezések száma	11	4	3	10	4	3	39	14	12
Csúcsteljesítmény [kW]	1100	1200	1350	1000	1200	1350	3900	4200	5400
Töltőberendezések költsége [Mill. EUR]	0,55	0,8	0,9	0,5	0,8	0,9	0,195	0,28	0,36
Villamos hálózati költség [Mill. EUR]	0,66	0,72	0,81	0,6	0,72	0,81	2,34	2,52	3,24
Járművek száma	30	23	22	36	30	30	107	81	77
Járművek költsége [Mill. EUR]	22,5	17,3	16,5	86,2	65,2	62,0	89,6	67,7	64,5
Összköltség [Mill. EUR]	23,7	18,8	18,2	87,3	66,7	63,7	90,8	73,0	71,3

1. eset: utaskapacitásváltozás figyelmen kívül hagyása, 2. eset: jelenlegi utaskapacitás változatlanul tartása

Forrás: Saját számított adatok

Azzal a feltételezéssel élünk, hogy a végső cél az összes jármű cseréje. Ennek megfelelően, ha egy viszonylaton közlekedő hagyományos meghajtású járművek nem válthatók ki önjáró trolibuszokkal, akkor akkumulátoros elektromos autóbuszok alkalmazását javasoljuk. Az „A” változatban további 61 akkumulátoros elektromos autóbusz beszerzése szükséges, Rákospalota, Kossuth utcánál 3 db, Újpalota, Nyírpalota útnál 6 db statikus töltő létesítése mellett az 5, 8E, 108E és 133E viszonylatok elektrifikációjához. A „B” változatban már csak 43 akkumulátoros elektromos autóbusz, valamint 3-3 statikus töltő szükséges az 5 és a 133E viszonylatok kiszolgálására. A „C” változatban minden viszonylat kiszolgálható önjáró trolibuszokkal. A legalacsonyabb költsége a „C” trolibusz tervváltozatnak van, amelyben a leghosszabb a felsővezetékes szakasz, de nincs szükség akkumulátoros elektromos autóbuszokra és statikus végállomási töltőkre. A „C” tervváltozat összköltsége mindkét esetben alacsonyabb a tisztán akkumulátoros elektromos autóbuszokat alkalmazó tervváltozat összköltségéhez képest. Ennek fő oka, hogy a megnőtt flottaméret és az akkumulátoros elektromos autóbuszok trolibuszhoz viszonyított magasabb beszerzési ára növeli a költséget. Ennek megfelelően ezen viszonylatcsoport elektrifikációjára a legjobb megoldás önjáró képességgel rendelkező trolibuszok alkalmazása, a fonódó szakaszon dinamikus, felsővezetékes töltés használatával.

Összegzés

A teljes vizsgálatot tekintve (összes végállomás és összes vizsgált viszonylatcsoport esetében), a statikus végállomási töltéssel elektrifikálandó viszonylatoknál, mind a nyolc elemzett végállomást figyelembe véve a szükséges végállomási töltőberendezések száma 53 (32 db 300 kWh névleges akkumulátorkapacitással és 21 db 450 kWh névleges akkumulátorkapacitással). A töltők költsége 12 780 000 EUR, a hálózatfejlesztés költsége 11 430 000 EUR. A csúcsgény 19 050 kW. Az összes vonalat ki lehet szolgálni kisebb névleges akkumulátorkapacitású csuklós járművekkel. A szükséges 249 akkumulátoros elektromos autóbusz becsült beszerzési költsége 144 562 500 EUR (155 250 000* EUR). A járművek alapvető paraméterei a következők:

- 168 db szóló autóbusz 200 kWh névleges akkumulátorkapacitással,
- 81 db csuklós autóbusz 300 kWh névleges akkumulátorkapacitással.

Jelenleg 233 hagyományos autóbusz közlekedik a vizsgált viszonylatokon. A flottanövekedés 16 jármű (+6,9%). Minden viszonylat kiszolgálására elegendő a kisebb névleges akkumulátorkapacitású jármű. A dízel autóbuszokhoz képest a szállítható személyek számában ezen autóbuszok esetében a különbség minimális, így a viszonylatok utaskapacitása változatlanul tekinthető.

A hét vizsgált viszonylatcsoport esetében a legtöbb viszonylat elektrifikációja önjáró trolibusszal a kedvezőbb. Vannak azonban olyan viszonylatok, amelyeket nem lehet hatékonyan kiszolgálni önjáró trolibuszokkal (67, 122,

169E), mivel az önálló szakaszok hosszúak. Összesen 40 km új kétirányú felsővezeték-hálózat építése szükséges, amelynek becsült költsége 59 750 000 EUR.

A szükséges trolibuszok számát a két esetben (utaskapacitás-csökkenés figyelmen kívül hagyása, vagy változatlan össz-utaskapacitást feltételezve) a 11. táblázatban foglaltuk össze. Az 1. esetben mivel változatlan járműtömeggel, de növekvő akkumulátorkapacitással számoltunk, a szállítható személyek száma csökken. A kialakítás miatt a szóló trolibuszok esetében, a számítás alapján nincs férőhelycsökkenés sem az 50 kWh, sem a 100 kWh névleges akkumulátorkapacitású jármű esetében, míg a kapacitásváltozás a csuklós járművek esetén -18% (50 kWh) illetve -28% (100 kWh).

11. táblázat Szükséges trolibuszok száma

Jellemzők/Tervváltozatok	Trolibusz tervváltozatok			Akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozat
	A	B	C	
Felsővezeték hossza [km]	7,4	9,6	13,9	-
Csúcsteljesítmény [kW]	74 075	154 310	239 400	-
Statikus töltők száma (450 kW)	9	6	-	18
Trolibuszok száma	61 (65*)	83 (94*)	128 (145*)	
Akkumulátoros elektromos autóbuszok száma	67 (89*)	43 (53*)	-	136 (161*)
Felsővezeték költsége (hálózati költséggel) [ezer EUR]	7 400	14 400	20 850	-
Statikus töltők költsége	2 700	1 800	-	5 400
Hálózati költségek a végállomásoknál [ezer EUR]	2 430	1 620	-	4 860
Trolibuszok beszerzéseinek költsége [ezer EUR]	34 075 (36 575*)	47 825 (54 700*)	72 200 (86 575*)	-
Akkumulátoros elektromos autóbuszok beszerzéseinek költsége [ezer EUR]	54 750 (73 450*)	34 350 (42 850*)	-	99 575 (124 225*)
Teljes költség [ezer EUR]	101 355 (122 555*)	99 995 (115 370*)	93 050 (107 425*)	109 835 (134 485*)

1. eset: utaskapacitásváltozás figyelmen kívül hagyása, 2. eset: jelenlegi utaskapacitás változatlanul tartása

Forrás: Saját számított adatok

A trolibusszal nem kiszolgálható viszonylatok elektrifikációjához minden viszonylat esetében egy további jármű szükséges a dízel üzemi járművek kiváltásához (plusz töltési idő miatt), így összesen 28 (18 937 500 EUR), változatlan utaskapacitás biztosítása mellett pedig további három, összesen 31 (20 812 500* EUR) akkumulátoros elektromos autóbusz és hét végállomáson statikus töltőállomás fejlesztése szükséges (4 600 000 EUR)

Így a becsült teljes elektrifikációs költség változatlan utaskapacitás biztosítása mellett 453 310 000 EUR, a töltőegységek beszerzésével, hálózatfejlesztéssel, felsővezeték kiépítésével míg az utaskapacitás csökkenésének figyelmen kívül hagyásával 418 372 500 EUR. További költség jelentkezik a telephelyi kiegészítő infrastruktúra fejlesztésénél, valamint a tartalékjárművek vásárlása miatt.

A 3. táblázatban megadott adatokkal a trolibuszviszonylattá alakítandó autóbusz-viszonylatokat tekintve a legnagyobb utaskapacitáscsökkenés a 20E; a 8E; a 133E; valamint az 5-ös és 7-es autóbuszviszonylatcsoportok esetében történik rendre 23,6%; 23,5%; 23,1%; 21,7% és 17,9% értékben. A szolgáltatás színvonalának fenntartása érdekében a kieső utaskapacitást megfelelő számú plusz jármű vonalba állításával pótolni szükséges. A trolibuszokkal vizsgált

viszonylatokon összességében a kapacitáscsökkenés 5,3%. Az utaskapacitás-csökkenés elkerülése érdekében többlett járművek beszerzése szükséges, ami a menetrend változtatását is jelenti.

Konklúzió

A cikk a városi autóbusz-hálózat elektrifikációjára használható komplex tervezési módszert mutatott be. A módszer a jármű, a töltési infrastruktúra és a viszonylatok (útvonal, menetrend stb.) jellemzőit figyelembe véve a viszonylatcsoportos optimalizálást támogatja. Az optimalizálás során különböző akkumulátoros elektromos autóbuszokat és önjáró képességgel rendelkező trolibuszokat, valamint statikus végállomási és dinamikus felsővezetékű töltést vizsgáltunk.

A módszert budapesti esettanulmányban alkalmaztuk és validáltuk. Nyolc autóbusz-végállomást és hét viszonylatcsoportot, összesen 85 viszonylatot elemeztünk, vizsgálva a leghatékonyabb elektrifikációs lehetőségeket. Az esettanulmány főbb megállapítása, hogy a közös végállomással, de minimális fonódó szakasszal rendelkező 47 vizsgált viszonylat esetében 6,9%-kal több akkumulátoros elektromos autóbuszra van szükség az indulási időpontok megváltoztatása nélkül. Megállapítottuk továbbá, hogy a hét, jelentős közös szakasszal rendelkező viszonylatcsoport esetében a fonódó szakaszon felsővezeték telepítése a kedvezőbb költségű, szemben a végállomási töltők alkalmazásával.

Ugyanakkor megállapítható, hogy a nagyobb akkumulátorkapacitás miatt, a szállítható személyek számában jelentős csökkenés tapasztalható több viszonylatcsoport esetében (pl. 20; 8E, 133E); a szolgáltatási színvonal megtartása érdekében többlettjárművek beállítása szükséges, ami az elektrifikációs költség növekedését eredményezi.

A módszer továbbfejlesztése során tervezzük az ütemezés korlátjainak feloldását és a becsült változók pontosítását, így például a villamosenergia-hálózati költségek és a rendelkezésre álló hálózati kapacitás pontosabb felmérését. További célunk egy töltésütemezési módszer kidolgozása, amely tovább pontosíthatja a szükséges töltőberendezések és járművek számát.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a BKK - Budapesti Közlekedési Központnak az autóbuszjáratokkal kapcsolatos adatszolgáltatásért.

Jelölésjegyzék

B	akkumulátor kapacitás
b_{ij}	fékezési veszteség
c_{cat}	felsővezeték névleges költsége
c_{ch}	töltőberendezés névleges költsége
c_{grid}	hálózatfejlesztés névleges költsége
E_{AUX}	segédüzemi energiafogyasztás
E_{DEMAND}	teljes energiaigény
E_{DRIVE}	menetdinamikai energiafogyasztás
e_{ij}	emelkedési veszteség
i	autóbusz-megálló sorszáma
l_{ch}	felsővezetékű szakaszok teljes hossza
l_{ij}	szakasz hossza
n_{bus}	jelenleg szükséges járművek száma
n_{ebus}	szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok száma
n_{ch}	szükséges statikus töltőberendezések száma
n_{tbus}	szükséges trolibuszok száma
n_{ts}	menetugrás (a következő menet teljesítése szükséges csak)
$n_{ch}(t)$	töltő járművek száma a t intervallumban
$n_{tbus,ij}(t)$	trolibuszok száma egy szakaszon egy adott intervallumban
p	töltés valószínűsége

P_{AUX}	segédüzemi rendszerek teljesítményigénye
P_{peak}	villamos hálózat csúcsteljesítménye
SoC	akkumulátor töltöttségi állapota
t_{ch}	töltési idő
t_{hw}	követési időköz
t_{ij}	utazási idő a szakaszon
γ	fogyasztási ráta
ϵ_{ij}	energiamérleg
η_{batt}	akkumulátor kapacitáskihasználása
η_{ch}	töltési hatékonyság
η_{PC}	energiaátalakító hatékonysága

Felhasznált irodalom

- Basma, Hussein et al. (2020): Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. Energy (Oxford, England), 207(118241), 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>
- Baumeister, Dirk et al. (2021). Optimal Catenary Planning of Trolleybus Systems. ETG Congress.
- Borén, Sven (2019): Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. International Journal of Sustainable Transportation, 1–16. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>
- Csonka Bálint (2021): Optimization of static and dynamic charging infrastructure for electric buses. Energies, 14(12), 3516. <https://doi.org/10.3390/en14123516>
- Electric Bus Market. MarketsandMarkets. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electric-bus-market-38730372.html> (2023. március 29.)
- He, Yi – Song, Ziqi – Liu, Zhaoai (2019): Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. Sustainable Cities and Society, 48(101530), 101530. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101530>
- Laib, Felix – Braun, Andreas – Rid, Wolfgang (2019): Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany. Transportation Research Procedia, 37, 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.206>
- Leou, Rong-Ceng – Hung, Jeng-Jiun(2017): Optimal charging schedule planning and economic analysis for electric bus charging stations. Energies, 10(4), 483. <https://doi.org/10.3390/en10040483>
- Lin, Yuping et al. (2019): Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. Transportation Research. Part C, Emerging Technologies, 107, 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>
- Liu, Tao – (Avi) Ceder, Avishai (2020): Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers. Transportation Research. Part C, Emerging Technologies, 114, 118–139. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.009>
- Ojer, Ihaki et al. (2020). Development of energy management strategies for the sizing of a fast charging station for electric buses. 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe).
- Paternost, Rudolf Francesco et al. (2022): Catenary-powered electric traction network modeling: A data-driven analysis for trolleybus system simulation. World Electric Vehicle Journal, 13(9), 169. <https://doi.org/10.3390/wevj13090169>
- Sebastiani, Mariana Teixeira – Luders, Ricardo – Fonseca, Keiko Verônica Ono (2016): Evaluating electric bus operation for a real-world BRT public transportation using simulation optimization. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: A Publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council, 17(10), 2777–2786. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2525800>
- Szilassy Péter Ákos – Földes Dávid (2022): Consumption estimation method for battery-electric buses using general line characteristics and temperature. Energy (Oxford, England), 261(125080), 125080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125080>
- Uslu, Tugce – Kaya, Onur (2021): Location and capacity decisions for electric bus charging stations considering waiting times. Transportation Research. Part D, Transport and Environment, 90(102645), 102645. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102645>
- Vepsäläinen, Jari et al. (2018): Energy uncertainty analysis of electric buses. Energies, 11(12), 3267. <https://doi.org/10.3390/en11123267>
- Wang, Xiumin et al. (2017): Electric vehicle charging station placement for urban public bus systems. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: A Publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council, 18(1), 128–139. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2563166>
- Wang, Yongxing – Liao, Feixiong – Lu, Chaoru (2022): Integrated optimization of charger deployment and fleet scheduling for battery electric buses. Transportation Research. Part D, Transport and Environment, 109(103382), 103382. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103382>
- Wang, Yusheng et al. (2017): Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 100, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- Wu, Xiaomei et al. (2021): A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system. Energy (Oxford, England), 224(120106), 120106. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120106>
- Zeus.Eu. <http://zeus.eu/uploads/publications/documents/zeus-report2017-2018-final.pdf> (2023. március 29.)