Megfelelőségi mutató meghatározásának módszere az útvonalhoz legmegfelelőbb elektromos autóbusz kiválasztásához / Method of determining the compliance indicator for selecting the most suitable electric bus for a given route

Szilassy Péter Ákos[1] – Dr. Földes Dávid[2]

[1]KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet Nonprofit Kft.
[1]szilassy.peter@kti.hu

[2]Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
[2]foldes.david@kjk.bme.hu

Kivonat: A jelenleg elérhető városi akkumulátoros elektromos autóbuszok nem képesek egy az egyben kiváltani a dízel autóbuszokat korlátozott hatótávolságuk miatt; többlet járművekre vagy az üzemeltetési szokások megváltoztatására van szükség. Kutatásunk fő kérdése, hogy egy adott viszonylatot mely akkumulátoros elektromos autóbusz tud kiszolgálni. Az autóbuszok alkalmasságának összehasonlítására megfelelési mutató meghatározási módszert dolgoztunk ki a TOPSIS módszer felhasználásával. A következő jármű- és útvonalspecifikus szempontok kerültek figyelembevételre: járműparaméterek, domborzat, megállótávolság és utasterhelés. A módszert esettanulmányként alkalmaztuk Budapest számos viszonylatára. Megállapítottuk, hogy a jármű tömege és az akkumulátorban tárolt energia a megfelelőséget leginkább befolyásoló szempont; így a midi és a nagy kapacitású szóló autóbuszok használata a leghatékonyabb. A kidolgozott módszerrel támogatható a döntéshozatal; meghatározható, hogy a hagyományos meghajtású autóbuszokra optimalizált útvonalak és menetrend változtatása nélkül melyik útvonalon milyen típusú elektromos autóbusz közlekedhet energiahatékony módon.

Abstract: Currently available urban battery electric buses cannot replace diesel buses one-for-one due to their limited range; additional vehicles or the alteration in operating practices are required. The main question of our research is which battery electric bus can serve a given route. To compare the compliance of buses, a compliance indicator determination method was developed using the TOPSIS method. The following vehicle- and route-specific aspects were taken into account: vehicle parameters, topography, stopping distance and passenger load. We applied the method as a case study in Budapest. We found that the weight of the vehicle and the energy stored in the battery are most influencing aspects; therefore, the use of midi and high-capacity single buses is the most efficient. The developed method can support decision-making; it is possible to determine on which route and which type of electric bus can travel in an energy-efficient manner without changing the routes and timetables optimized for buses with combustion engine.

Kulcsszavak: Akkumulátoros elektromos busz (BEB); Energiahatékony üzemeltetés; Megfelelőségi mutató; Domborzat; Megállótávolság, Járműparaméterek, Utasterhelés, TOPSIS módszer

Keywords: Battery Electric Bus (BEB); Energy efficient operation; Compliance indicator; Topography; Stop distance, Vehicle parameters, Passenger load, TOPSIS method

Bevezetés

A fordaterv teljesítéséhez szükséges hatótáv, a megfelelő töltöttségi szint biztosítása alapvető hiányossága a tisztán elektromos, akkumulátoros autóbuszoknak. A fogyasztás befolyásolásában négy alapvető működési tényező játszik szerepet: a domborzat, a megállóhelytávolság, a környezeti hőmérséklet és az utasterhelés [1], [2], [3]. Különböző sajátosságokkal rendelkező autóbusz viszonylatok, mint például a meredek hegyvidéki; a sok megállóval és szűk utcákkal rendelkező belvárosi; a kevés megállóhellyel és kis utasforgalommal bíró elővárosi vagy külső kerületi viszonylatok, valamint a nagy utasforgalmú gyorsjáratok eltérő tulajdonságú járműveket igényelnek. A gyakorlatban azonban a döntéshozók csak felületes ismeretekkel rendelkeznek az elektromos

autóbuszokról; nem mindig tesztelnek az adott viszonylaton vagy városban, így sokszor nem a megfelelő autóbusz kerül megvásárlásra.

Kutatásunk során korlátozásként a jelenleg legelterjedtebb elektromos autóbusztípus, a nagyobb akkumulátor kapacitással rendelkező, zömében éjszaka, a telephelyen tölthető járműveket vettük figyelembe. A cikk további részében elektromos autóbusz alatt ezen járműveket értjük. Figyelmen kívül hagytuk a közbenső állomásokon gyors tölthető és a menetközben tölthető (pl. trolibusz) járműveket. A kutatási kérdéseink: Hogyan határozható meg egy elektromos autóbusz alkalmazhatósága egy adott útvonalon? Milyen a járműre vonatkozó műszaki és útvonalat jellemző szempontok írják le az elektromos autóbuszok alkalmasságát? Célunk ún. megfelelőségi mutató meghatározása volt, amely egy elektromos autóbusz adott vonalon történő alkalmazásának energiaszempontú hatékonyságát fejezi ki. A járművek és az útvonalparaméterek figyelembevételével több szempontú döntéshozatali módszert dolgoztunk ki.
A gazdasági költségeket (például tőke-, amortizáció-, karbantartási és energiaköltségek) figyelmen kívül hagytuk jelen tanulmányban. A kidolgozott módszer az elektromos autóbuszok vásárlásához vagy napi működésük előzetes tervezéhez nyújt döntéstámogatást. A módszer adathiányos környezetben, katalógusadatok ismeretében is alkalmazható.

A cikk felépítése: az 1. fejezetben a szakirodalmat tekintjük át, majd a 2. fejezetben ismertetjük a kidolgozott módszert. A 3. fejezetben a módszer esettanulmányként történő alkalmazását mutatjuk be. Végezetül a kutatás során levont következtetéseket és a továbbfejlesztés irányait foglaljuk össze.

1. Irodalmi áttekintés

Az elektromos autóbusz fogyasztását számos műszaki- és útvonaljellemző, valamint emberi tényező befolyásolja. A járművezető természete és vezetési stílusa, különösen gyorsításkor, nagy hatással bír a fogyasztásra. [4], [5] Az energiafelhasználás optimalizálásához a fogyasztás minimalizálása szükséges megfelelő gyorsulás és fékezési rekuperáció megvalósításával (pl. emelkedőkön történő lassítás motorfékkel, utazó sebességek fokozatos elérése) [6]. A domborzatot figyelembe véve az emelkedők és a lejtők összfogyasztásra gyakorolt hatását Fernandes elemzi energiaalapú fogyasztásbecsléssel [7]. A jármű fogyasztásának mindössze 82%-át használja fel optimális generátoros üzemmód használatával. A megállók távolsága és a megállók száma szintén fontos szempont energiamodellek alkalmazása esetében. [1], [8]

A fordáktól függően akár 35%-os energiamegtakarítás érhető el. A környezeti hőmérséklet hatását a termikus számítások során több kutatásban használták fel a hűtés-fűtési rendszer (HVAC) fogyasztásának optimalizálására. [9], [10], [11] Az utastér légkondicionáló berendezése van a legnagyobb hatással a fogyasztásra; egy rosszul konfigurált rendszer 40-45%-os hatótávolság-csökkenést jelenthet. [11] Mivel az elektromos autóbuszok HVAC rendszere eltér a dízel járművekétől, a működés modellezése és beállítása nehézkes csupán dízel flották adatai alapján. A megfelelő hőmérséklet biztosításához gyakran az olcsóbb, de kevésbé hatékony pozitív hőmérsékleti együttható technológiájú (PTC) fűtőrendszert építenek be. [10]
Az utasterhelés a jármű fogyasztását és a HVAC rendszer fogyasztását is befolyásolja, a teljes fogyasztás 5-6%-át teszi ki. [11] Ennek megfelelően a változó utasterhelés nagymértékben befolyásolja a fogyasztást [1]; ugyanakkor minél nagyobb az utasterhelés, annál kisebb az egy főre eső szállítás költsége. [2]

Számos módszert alkalmaznak különböző közlekedési megoldások rangsorolására. Ezek közül a legismertebb a többkritériumos elemzés (MCDM), amelyet többek között az elektromos személygépkocsik térbeni elosztására [12], illetve autóbuszok értékeléséhez [13], [14], [15] is alkalmaztak. Bár a módszert számos tudományág alkalmazza, tudományos megalapozottsága megkérdőjelezhető. Az MCDM megfelelő választás 2-3 változó esetén, összetett rendszerekben – például 8-10 feltétel esetén – már nem ajánlott. [16] Hasonlóan kedvelt módszer az AHP módszer, amely már villamosok [17], és CNG-autóbuszok [18] kiválasztására is alkalmazták. A módszerben a súlyok beállítása tetszőleges, így az adott rendszer kiválasztására és elvetése a súlyok értékétől nagyban függ. Ezért önmagában nem ajánlott ennek a rendszernek a használata. A jelen cikkben is felhasznált TOPSIS módszer egy mátrix alapú súlymeghatározási módszer; az ideális megoldáshoz képesti hasonlóság szerinti preferencia sorrend meghatározása. A valós alternatívát jelentő megoldás kiválasztása az előre

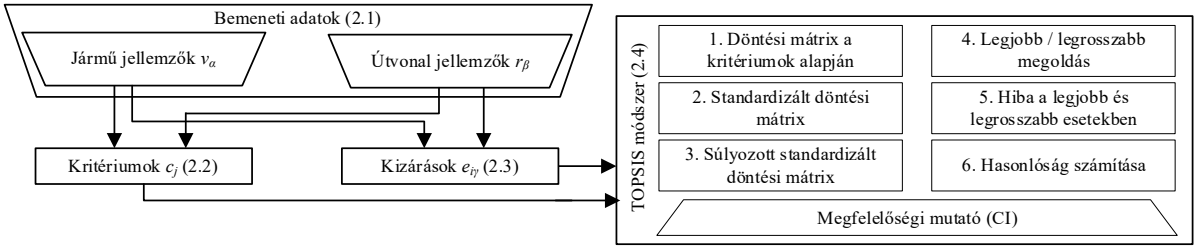
meghatározott szempontok alapján kevésbé önkényes módon lehetséges. Korábban ezt a módszert használták járművek [19], monorail megoldások [20] és már elektromos autóbuszok [16] kiválasztásánál is. Ezen, Dinc, Hamurcu és Eren kutatásában [16] csak a járművek műszaki jellemzőit hasonlították össze. Ezzel szemben a jelen cikkben a jármű megfelelőségét útvonalspecifikus mérőszámokkal is ellenőrizzük.

A szakirodalom alapján számos, az elektromos autóbuszok fogyasztását és így megfelelőségét befolyásoló szempontot azonosítottunk. Olyan módszerre van szükség, amely a szempontokat egy közös döntéshozatali folyamat részeként kezeli; minderre a TOPSIS módszer alkalmazása megfelelő eszköz. A TOPSIS nem az abszolút legjobb opciót határozza meg, hanem a vizsgálatba bevont legjobb járműhöz képest végez rangsorolást.

2. Módszertan

Az elektromos autóbuszok úgynevezett megfelelési mutatójának meghatározásához többszempontú elemzést és TOPSIS módszert alkalmaztunk. Az autóbusz vonali energiafogyasztását a jármű és az útvonal paraméterei alapján határoztuk meg. A legmegfelelőbb autóbusz a vizsgálatba bevont járművek összehasonlításával adható meg. A választandó alternatíva az ideális megoldáshoz a legközelebb és a legrosszabb megoldástól a legtávolabb áll. Az ideális megoldás minimalizálja a költség (hátrányos) kritériumokat és maximalizálja a haszon (előnyös) kritériumokat. Alapvetően a költségkritériumok csökkentendők, míg a haszon kritériumok növelendők. [21]

Figyelembe vett paraméterek: utaskapacitás, hatótáv, maximális motorteljesítmény, töltési idő, útvonal jellemzői (fékezési távolság, magasságkülönbség), környezeti hőmérséklet és utasterhelés. A változók határozzák meg a költség és a haszon kritériumokat. Költségkritériumok a következők: fékezési veszteség, emelkedési veszteség, töltési idő. Haszonkritériumként vesszük figyelembe a kapaszkodási sebességet (emelkedőn), az utaskihasználtságot és egy töltéssel megtett menetek számát. A hőmérsékletet nehéz kategorizálni, mivel a legjobb az, ha sem fűteni sem hűteni nem szükséges; Európa nagy részén a környezeti hőmérséklet költségkritériumnak számít, mivel az éven belüli jelentős hőingadozás miatt fűteni vagy hűteni szükséges. Korlátozásként a forgalom dinamikus jellemzőit (torlódás, elsőbbséget adás) nem vettük figyelembe. Továbbá, az energiafelhasználás becsléséhez átlagos és folyamatos gyorsítást és lassítást feltételeztünk. A megfelelőségi mutató meghatározásának módszerének lépéseit az 1. ábra mutatja be; a dobozokban zárójele közé írt számozás a doboz tartalmát bemutató alfejezetek számozására utal.



1. ábra: A megfelelőségi mutató meghatározási módszerének lépései.

2.1 Bemeneti adatok: jármű és útvonal jellemzők

A v_α autóbuszok műszaki paramétereit és a figyelembe vett r_β útvonalparamétereket az 1. táblázat foglalja össze. Ezen adatokból további jármű- és útvonaljellemzők is származtathatóak, mint például maximális sebesség, hatótávolság, áltagos megállási távolság.

1. táblázat: Jármű- és útvonaljellemzők

α	Jármű jellemző v_α	β	Útvonal jellemző r_β
1	Maximális motorteljesítmény [kW]	1	Szintemelkedés [m]
2	Hajtáslánc hatékonysága [-]	2	Meredekség [°]
3	Átlagos fogyasztás [kWh/km]	3	Hossz [km]
4	Akkumulátorkapacitás [kWh]	4	Megállók száma [-]
5	Töltési teljesítmény [kW]	5	Sebességhatár [m/s]

6	Utaskapacitás [fő]	6	Max. utasterhelés [fő]
7	Járműtömeg [kg]		

Maximális motorteljesítmény (v_1): A motor csúcsteljesítménye, ami az út megtételéhez, például a szintkülönbség leküzdéséhez szükséges. Ennek a maximuma határozza meg, hogy a jármű használható-e hegyi útvonalakon. Meghatározásához a jármű a legmeredekebb szakaszon vizsgálandó. Rövid emelkedőn a csúcsteljesítmény, míg hosszabb emelkedőn állandó nagy teljesítmény biztosítása szükséges túlmelegedés és meghibásodás nélkül. Ha egy jármű folyamatos terhelés mellett halad (az emelkedő hajlásszöge közel állandó), érdemes a villanymotort erre a munkapontra optimalizálni, hogy az energiafogyasztás alacsony maradjon.

Hajtáslánc hatékonysága (v_2): A befektetett energia hasznosulásának aránya a felvett energia alapján. A hatékonyság függ a hajtásrendszer alkatrészeitől, a tengelykapcsolótól, a differenciálműtől, a sebességváltó.

Átlagos fogyasztás (v_3): A jármű átlagos kilométerenkénti energiafogyasztása. A fogyasztási adatok szabványos menetciklusok alapján mérhetők.

Akkumulátorkapacitás (v_4): Következtethető a jármű egy töltéssel megtehető hatótávolsága, önjáróképessége a fogyasztás ismeretében.

Töltési teljesítmény (v_5): A jármű által felvehető energiamennyiség; minél nagyobb az érték a jármű annál gyorsabban tölthető fel; befolyásolja a napi teljesíthető futásmennyiséget.

Utaskapacitás (v_6): Egy autóbusz szállítási kapacitása; általános cél a szállított utasok számának maximalizálása.

Járműtömeg (v_7): A jármű saját tömege. Általános cél a jármű saját tömegének minimalizálása. A nehezebb autóbuszoknak nagyobb lehet a fogyasztása, így a károsanyag-kibocsátása is.

Szintemelkedés (r_1): Az útvonal magasságkülönbsége. Az energiafogyasztás nagy mértékben függ a magassági profiltól.

Meredekség (r_2): Az útvonal legmeredekebb pontjának dőlésszöge.

Hossz (r_3), Megállók száma (r_4): Az átlagos megállási távolság a vonal hosszának (r3) és a megállók számának (r4) hányadosa.

Sebességhatár (r_5): A vonalra jellemző sebességkorlát.

Maximális utasszám (r_6): Csúcsidőben a legforgalmasabb szakasz átlagos utasszáma.

2.2 Kritériumok

A jármű- és útvonaljellemzőkből közös mérőszámok, megfelelősségi és fogyasztási kritériumok képezhetők. A képzett cj kritériumok a TOPSIS módszerrel értékelhetők ki. A 2. táblázat tartalmazza a kritérium fogyasztásának hatását egy főre vetítve, megadva, hogy egy kritérium költség- vagy haszonkritérium a TOPSIS módszerben. Emellett a táblázatban a kritériumok számítási módját is megadtuk. Habár bizonyos jellemzők növelhetik a jármű összfogyasztását, de utasra vetített energiafogyasztásra tekintve csökkentő hatással bírnak (pl. maximális utasszám). Az energiafogyasztás (1-2. kritériumok) a teljes vonalra határozandó meg az átlagos fogyasztásnak, valamint a jármű mozgási és helyzeti energiájának figyelembevételével.

2. táblázat: Kritériumok

j	Kritérium c_j	Fogyasztásra gyakorolt hatás utasra vetítve	Kritérium típusa	Számítás módja	
1	Fékezési veszteség [kWh/km]	-	költség	$c_1 = \frac{r_4 \cdot v_7 \cdot r_5^2}{r_3}$	(1)
2	Emelkedési veszteség [kWh/km]	-	költség	$c_2 = \frac{v_7 \cdot g \cdot r_1}{r_3}$	(2)

3	Kapaszkodási sebesség [km/h]	+	haszon	$c_3 = \frac{v_1}{v_7 \cdot g \cdot \sin r_2 \cdot v_2}$	(3)
4	Utaskihasználtság [-]	+	haszon	$c_4 = \frac{r_6}{v_6}$	(4)
5	Töltési idő [h]	-	költség	$c_5 = \frac{v_4}{v_5}$	(5)
6	Menetek száma [-]	+	haszon	$c_6 = \frac{v_4}{(v_3 + c_1 + c_2) \cdot r_4}$	(6)

Fékezési veszteség (c_1): Kinematikai energia alapján számítandó a megállók számának figyelembe vételével (1). Megjegyzés: a gyakorlatban minden megállási szakasz tartalmaz egy lassítási és gyorsítási fázist.

Emelkedési veszteség (c_2): A magasságkülönbség, mint a terep általános mérőszáma, meghatározza azt a maximális magassági potenciális energiát, amelyet a járműnek le kell győznie. A magasságkülönbség járműspecifikus kritériummá alakítása a *g* gravitációs gyorsulás figyelembevételével a jármű helyzeti energiája alapján számítható (2), ami így tekinthető emelkedési veszteségnek.

Kapaszkodási sebesség (c_3): A jármű mászóképességének meghatározása a legmeredekebb szakasz emelkedőjén (3). Egy emelkedő legmeredekebb szakaszán a járműnek a lehető legkisebb ellenállással kell haladnia, azaz az elégtelen nyomaték mértéke miatti fordulatszám-csökkentésnek, így járműsebesség csökkenésnek a lehető legkisebbnek kell lennie. A lég- és gördülési ellenállást ebben a számításban nem vesszük figyelembe. Meghatározható, hogy a jármű a legmeredekebb szakaszt milyen sebességgel képes teljesíteni.

Utaskihasználtság (c_4): Az utasterhelés befolyásolja a jármű tömegét, így a fogyasztást is. Az átlagos utaskihasználtságot a (4) egyenlet alapján számítjuk és haszonkritériumnak tartjuk, mivel minél kihasználtabb egy jármű, annál kedvezőbb az egy főre jutó energiafelhasználás.

Töltési idő (c_5): A jármű újbóli elérhetősége, azaz a teljes töltési idő befolyásolja a napi üzemeltethetőséget, menetrendtervezését (5).

Menetek száma (c_6): A működtetési hatékonyság kifejezhető a megtehető menetek számával (6).

2.3 Kizárások

Adott *i* autóbuszra $e_{i\gamma}$ kizárási feltételeket határoztunk meg, annak érdekében, hogy csak azon járművek kerüljenek figyelembe vételre, amelyek teljesíteni tudnak egy adott minimális szolgáltatási „színvonalat" (3. táblázat). A táblázatban példákkal szemléltetettük a kizárási feltételeket; az értékeket az esettanulmányban használtuk.

3. táblázat: Kizárások

γ	**Kizárás $e_{i\gamma}$**	**Példa**
1	Minimális kapaszkodási sebesség [km/h]	c_3 > 15km/h
2	Szállítandó utasok száma [fő]	v_6 <Max. pillanatnyi utasok száma
3	Maximális töltési idő [óra]	c_5 <8h
4	Menetek minimális száma [-]	c_6 <2
5	Jármű maximális tömege [t]	v_7 <20 t szóló autóbuszra, c_3 <30 t csuklós autóbuszra

Minimális kapaszkodási sebesség (e_1): A menetrend és a jármű dinamikájának megtartása érdekében.

Max. pillanatnyi utasok száma (e_2): Csúcsórában biztosítandó érték a kereslet kiszolgálása érdekében.

Maximális töltési idő (e_3): A jármű rendelkezésre állásának biztosítása érdekében; minél hosszabb a töltési idő, annál kisebb az esélye, hogy a jármű időben készen áll a következő menetre.

Menetek minimális száma (e_4): Elvárt teljesítendő menetek száma; ha a jármű nem tudja teljesíteni a meneteket, akkor annak alkalmazhatósága alacsony.

Jármű maximális tömege (e_5): Speciális korlátozások betartása érdekében; adott tömegen felül a jármű nem közlekedhet bizonyos utakon

További kizárási feltétel a vonalra jellemző *geometriai kitétel (e_6)*, ami biztosítja a nehezen járható útvonalakon történő alkalmazhatóságot (pl. csuklós autóbusz nem közlekedhet szűk utcákban).

2.4 TOPSIS módszer

A TOPSIS módszer a következő lépésekből áll:

1, Döntési mátrix felírása a rangsoroláshoz és döntéshozatalhoz (7), ahol a döntési mxn -es mátrix m választható járműből (O_i) és n kritériumból (C_j) áll.

$$M = \begin{array}{c} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_1 \\ \vdots \\ O_m \end{array} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{21} & \cdots & c_{2j} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i1} & c_{i1} & \cdots & c_{ij} & \cdots & c_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m1} & \cdots & c_{mj} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \tag{7}$$

2, Normalizált döntési mátrix létrehozása $N(= n_{ij})$ (8).

$$n_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} c_{ij}^2}} \quad i = 1,2,\dots,m\,; j = 1,2,\dots 6 \tag{8}$$

3, Súlyozott normalizált döntési mátrix létrehozása $T(= t_{ij})$ (9), ahol w_j a C_j kritérium súlya, amely minden O_j járműtípusnál azonos

$$t_{ij} = w_j \cdot n_{ij} \quad i = 1,2,\dots,m\,; j = 1,2,\dots 6 \tag{9}$$

4, Az ideális pozitív (O_{best} legjobb opció (10)) és ideális negatív (O_{worst} legrosszabb opció (11)) megoldás meghatározása a jármű és az útvonal paraméterei alapján.

$$O_{best} = \left\{\left\langle \max_i(t_{ij}|i = 1,2,\dots,m)|j \in J_-\right\rangle, \left\langle \min_i(t_{ij}|i = 1,2,\dots,m)|j \in J_+\right\rangle\right\} \equiv \{t_{bj}|j = 1,2,\dots,6\} \tag{10}$$

$$O_{worst} = \left\{\left\langle \min_i(t_{ij}|i = 1,2,\dots,m)|j \in J_-\right\rangle, \left\langle \max_i(t_{ij}|i = 1,2,\dots,m)|j \in J_+\right\rangle\right\} \equiv \{t_{wj}|j = 1,2,\dots,6\} \tag{11}$$

ahol $J_+ = \{j = 1,2,\dots,6|j\}$ a pozitív hatású kritériumok összessége, míg $J_- = \{j = 1,2,\dots,6|j\}$ a negatív hatású kritériumok összessége. A pozitív hatású kritériumokban a legnagyobb értékűt, míg a negatív hatású kritériumokban a legalacsonyabb értékűt kell kiválasztani.

5, A négyzetes hiba módszere alapján a i járműopciók kritériumai és a legjobb opció kritériumai közötti $d_{i,best}$ különbség mértékének meghatározása (12), illetve az i járműopciók kritériumai és a $d_{i,worst}$ legrosszabb opció kritériumai közötti különbség meghatározása (13).

$$d_{i,best} = \sqrt{\sum_j^n \left(t_{ij} - t_{bj}\right)^2} \quad i = 1,2,\dots,m \tag{12}$$

$$d_{i,worst} = \sqrt{\sum_j^n \left(t_{ij} - t_{wj}\right)^2} \quad i = 1,2,\dots,m \tag{13}$$

6, A CI_i megfelelőségi mutató meghatározása i járműre (14), vagyis az i jármű hasonlósága az O_{best} legjobb járműopcióhoz. CI_i=1, ha az i járműopció rendelkezik a legjobb kritériumokkal; CI_i=0, ha a járműopció a legrosszabb kritériumokkal rendelkezik.

$$CI = \frac{d_{i,worst}}{d_{i,worst} + d_{i,best}}, \quad 0 \le CI \le 1, \quad i = 1,2,\dots,m \tag{14}$$

7, Az i járműopciók rangsorolása a legjobb esettel való hasonlóság szerint.

3. Esettanulmány

Esettanulmányként hét eltérő tulajdonsággal rendelkező budapesti autóbuszviszonylatot tekintettünk. A főbb útvonalparamétereket és a jelenleg használt kialakítástípusokat (midi, szóló, csuklós) a 4. táblázat tartalmazza. 13 napjainkban elérhető autóbuszt vettünk figyelembe. A használt járműparaméterek elsődleges forrása az Európai Bizottság ZeEUS programjában készített tanulmány volt. [22] Egyéb kiegészítő adatokat katalógusokból, éves jelentésekből és egyetemi adatbázisokból szereztük be. További felhasználtuk a BKK Budapesti Közlekedési Központ által rendelkezésünkre bocsátott utasszám adatokat.

4. táblázat: Útvonal paraméterek

Viszonylat	Útvonal leírása	Kialakítás	r_1 [m]	r_2 [°]	r_3 [km]	r_4 [-]	r_3/r_4 [km]
221	hosszú, hegyvidéki	szóló	341	7,6	11	22	0,71
27	rövid, hegyvidéki	midi	78	7,2	4,2	11	0,38
16	rövid, hegyvidéki	midi	50	3,0	4,7	9	0,52
133E	hosszú, zsúfolt	csuklós	28	<1,0	31,1	38	0,82
46	hosszú, ritka	csuklós	26	<1,0	28	56	0,50
100E	hosszú, expressz	csuklós	22	<1,0	25,6	2	12,80
181	rövid, ritka	szóló	4	<1,0	3,1	9	0,34

A megfelelőségi mutatót minden útvonalra, az összes autóbuszt figyelembe véve határoztuk meg. Az elemzés során változatokat képeztünk, a súlyok eltérő megválasztásával. Jelen cikkben az alábbi súlyokkal végzett számítás eredményét mutatjuk be részletesen: $w_1=w_2=w_5=1/10$, $w_3=w_4=2/10$ és $w_6=3/10$; a változatban fontos kritérium a minél több teljesített menet (c_6), illetve a rövid töltési idő (c_5) és magas utaskihasználtság (c_4). Az akkumulátortól a kerekekig tartó hajtáslánc hatékonyság esetében feltételezzük, hogy minden járműnél állandó (v_2=0.7 [8]).

Az 5. táblázat tartalmazza a kritériumokat (c_1-c_6, 1. lépés), a különbség mértékeket (d_{iw}, d_{ib}, 5. lépés), a megfelelőségi mutatót (*CI*, 6. lépés), valamint a buszok rangsorát (7. lépés) a 221 viszonylat esetében. Csak a midi és a szóló autóbuszokat vizsgáltuk a viszonylat geometriai korlátjára (e_6) tekintettel.

Az elemzett adatok alapján: A fékveszteség (c_1) közel azonos, főként a járművek tömegétől függ 0,2-0,4 kWh/km. A magassági veszteség (c_2) 1,0 és 1,5 kWh/km között változik. Megjegyzés: ezen értékek magasabbak, ha a viszonylat hosszú hegyvidéki. A motor tényleges csúcsteljesítményét kifejező kapaszkodási sebesség (c_3) a legmeredekebb szakaszon 15-28 km/h között változik. Az utasterhelésnél (c_4) az eltéréseket (30-42%) a buszon megengedett maximális utaslétszám okozza. A töltési idő (c_5) között jelentős különbségek adódtak az akkumulátor kapacitásától és a töltési infrastruktúrától függően. 9 perc és több mint 4 óra töltési idő szükséges a szélső esetekben. Az utazások száma (c_6) 2,5 és 10 menet között változik. Ennek meghatározásában a fogyasztási ráta játssza a legnagyobb szerepet. Bár a Volvo busztípus könnyű, de az Ebusco négyszer több energiát tárol. Minden szempontot figyelembe véve az összehasonlított szóló és midibuszok közül a Solaris Urbino 12 a legalkalmasabb autóbusztípus a budapesti 221 viszonylat kiszolgálására.

5. táblázat: Kritériumok és rangsor – kivonat a 221 viszonylat számításából

Típus	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	d_{iw}	d_{ib}	CI	Rangsor
Sileo S12	0,35	1,52	26,0	41,4	2:18	7,61	0,0419	0,0682	0,6198	4
Ebusco 2.1/2.2	0,37	1,61	27,7	36,3	4:08	10,02	0,0494	0,0927	0,6525	2
HUNAN CRRC	0,37	1,61	15,4	34,4	1:13	5,23	0,0660	0,0462	0,4119	6
Irizar 12m	0,39	1,69	17,6	40,9	3:45	9,56	0,0483	0,0869	0,6428	3
Linkker 12+	0,31	1,35	22,0	40,9	0:09	2,59	0,0921	0,0488	0,3461	9
SKODA Perun	0,36	1,57	16,8	39,9	2:18	6,28	0,0568	0,0516	0,4761	5
Solaris Urbino 12	0,37	1,61	25,7	36,3	0:32	7,60	0,0373	0,0748	0,6671	1
Ursus Ekovolt	0,35	1,52	18,4	40,4	0:48	3,84	0,0789	0,0432	0,3535	8
Volvo 7900	0,23	1,01	25,2	31,2	0:15	3,33	0,0836	0,0514	0,3807	7

A 6. táblázatban összefoglaltuk a vizsgált viszonylatokra leginkább alkalmas járműtípus főbb paramétereit.

6. táblázat: A vizsgált viszonylatokon legalkalmasabb járműtípus és paraméterei

Viszonylat	Típus	Kialakítás	v1 [kW]	v3 [kWh/km]	v4 [kWh]	v5 [kW]	v6 [fő]	v7 [kg]
21/133E/ 100E	Solaris Urbino 12	szóló	250	0,9	240	450	90	19000
21A	Temsa MD9	midi	200	1,1	200	120	65	14000
27/27A/16/ 16A/181	Evopro C68	midi	160	0,62	144	60	55	10350
46	Optare Solo	szóló	150	0,51	138	42	55	11300

Főbb megállapításaink:

- Ugyanazok az autóbuszok bizonyultak a legjobbnak több, hasonló útvonaljellemzővel bíró viszonylaton is, így nem szükséges a változatos flottát üzemeltetni. Elegendő néhány specifikus modell használata.
- A hegyvidéki kis- és a nagy utasforgalmú viszonylatokon az erősebb motorral szerelt járművek bizonyultak a legjobbnak (Volvo, Ebusco, Sileo, Solaris).
- Hosszú hegyi (meredeken felfelé közlekedő) viszonylatokon tömegük miatt rövidebb autóbuszok a legalkalmasabbak (pl. Evopro C68).
- A jelenlegi menetrend megtartásával számos autóbusz helyettesíthető kisebb, de nagyobb kihasználtságú autóbuszokkal.

Konklúzió

A kutatás legfontosabb eredménye az a rangsorolási módszer, amely által egy adott útvonalon egy adott elektromos autóbusz megfelelőségi mutatója határozható meg. A kidolgozott módszer az útvonal és a jármű paraméterei alapján a legjobb autóbuszt határozza meg a vizsgált járművek között. A módszer különböző akkumulátoros elektromos autóbuszok több szempontú értékelésénél és a járműbeszerzési döntéshozatalok támogatására alkalmazható.

A módszert esettanulmány által validáltuk budapesti viszonylatokra alkalmazva. Megállapítottuk, hogy a hasonló útvonaljellemzőkkel bíró viszonylatok kiszolgálásra azonos jármű a legjobb, így viszonylatonként nem szükséges változatos flottát üzemeltetni. Jelentős a jármű tömegének és a tárolt energia tömegének szerepe a, ezáltal a midi és a nagy kapacitású szólóbuszok a leginkább használhatók a viszonylatokon.

A hegyvidéki és a nagy kapacitású viszonylatokon az erősebb motorral szerelt járművek (pl. Solaris Urbino 12), míg a rövid viszonylatokon a midi és szóló buszok a legalkalmasabbak (pl. Evopro C68).

Levonható tanulság, hogy kizáró feltételek alkalmazása elengedhetetlen. Ennek hiányában az elemzésben résztvevő autóbuszok torzíthatják az eredményt (pl. a geometria miatt a jármű nem közlekedhet az adott útvonalon). Továbbá előfordulhat, hogy a módszer által legjobbnak minősített opció nem a legjobb egy adott város számára (pl. eltérő elfogadható utaskihasználtság alkalmazása városonként).

A módszer számos irányba továbbfejleszthető; például egyéb szervezési, meglévő üzemeltetési tapasztalatok és karbantartási szempontok, valamint különböző töltési technológiák beépítése. Továbbá tervezzük a módszertan dinamikus forgalmi jellemzőkkel (napon belüli átlagsebesség változása) történő kiegészítését is. Annak meghatározásához, hogy az elektromos autóbuszok működtetése valóban kifizetődő, a módszertanba megtérülési számítások beépítése is terveink között szerepel.

Köszönetnyilvánítás: A szerzők köszönetüket fejezik ki a BKK Budapesti Közlekedési Központnak az utasforgalmi adatok rendelkezésünkre bocsátásáért.

Irodalomjegyzék

[1] Basma, H., Mansour, C., Haddad, M., Nemer, M., & Stabat, P. (2020). Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. Energy (Oxford, England), 207(118241), 118241.

[2] https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241

[3] Vepsäläenen, J. (2017). Driving style comparison of city buses: Electric vs. Diesel. 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC).

[4] Szilassy, P. Á., Jenőfi, B. and Földes, D. (2022) "Marginal energy consumption cost factors of battery electric buses," in 2022 Smart City Symposium Prague (SCSP). IEEE. https://doi.org/10.1109/SCSP54748.2022.9792553

[5] Zhang, Y., Yuan, W., Fu, R., & Wang, C. (2019). Design of an energy-saving driving strategy for electric buses. IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions, 7, 157693–157706. https://doi.org/10.1109/access.2019.2950390

[6] Li, L., & Liu, Q. (2019). Acceleration curve optimization for electric vehicle based on energy consumption and battery life. Energy (Oxford, England), 169, 1039–1053. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.065

[7] Perrotta, D., Ribeiro, B., Rossetti, R. J. F., & Afonso, J. L. (2012). On the potential of regenerative braking of electric buses as a function of their itinerary. Procedia, Social and Behavioral Sciences, 54, 1156–1167. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.830

[8] Fernandes H. (2018). Electric bus performance evaluation in real world use conditions

[9] Anttila, J. (2016). Uncertainty in electric bus driving cycles (Master thesis)

[10] He, H., Yan, M., Sun, C., Peng, J., Li, M., & Jia, H. (2018). Predictive air-conditioner control for electric buses with passenger amount variation forecast☆. Applied Energy, 227, 249–261. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.181

[11] Corazza, M., Conti, V., Genovese, A., Ortenzi, F., & Valentini, M. P. (2021). A procedure to estimate air conditioning consumption of urban buses related to climate and main operational characteristics. World Electric Vehicle Journal, 12(1), 29. https://doi.org/10.3390/wevj12010029

[12] Göhlich, D., Ly, T.-A., Kunith, A., & Jefferies, D. (2015). Economic assessment of different air-conditioning and heating systems for Electric City buses based on comprehensive energetic simulations. World Electric Vehicle Journal, 7(3), 398–406. https://doi.org/10.3390/wevj7030398

[13] Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O., & Zheng, Q. P. (2016). Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. Journal of Cleaner Production, 112, 291–307. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.021

[14] Vahdani, B., Zandieh, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011). Two novel FMCDM methods for alternative-fuel buses selection. Applied Mathematical Modelling, 35(3), 1396–1412. https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.09.018

[15] Patil, A., Herder, P., & Brown, K. (2010). Investment decision making for alternative fuel public transport buses: The case of Brisbane transport. Journal of Public Transportation, 13(2), 115–133. https://doi.org/10.5038/2375-0901.13.2.6

[16] Mukherjee, S. (2017). Selection of alternative fuels for sustainable urban transportation under multi-criteria intuitionistic fuzzy environment. Fuzzy Information and Engineering, 9(1), 117–135. https://doi.org/10.1016/j.fiae.2017.03.006

[17] Hamurcu, Mustafa, & Eren, T. (2020). Electric bus selection with multi-criteria decision analysis for green transportation. Sustainability, 12(7), 2777.

[18] Dinç, S., Hamurcu, M., & Eren, T. (2018). Multicriteria Selection of Alternative Tramway Vehicles for Urban Transportation. Gazi J. Eng. Sci, 4, 124–135.

[19] Yedla, S., & Shrestha, R. M. (2003). Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi. Transportation Research. Part A, Policy and Practice, 37(8), 717–729. https://doi.org/10.1016/s0965-8564(03)00027-2

[20] Hamurcu, M., & Eren, T. (2020). Applications of the MOORA and TOPSIS Method for Decision of Electric Vehicle in Public Transportation Technology.

[21] Hamurcu, M., & Eren, T. (2017). Selection of Monorail Technology by Using Multicriteria Decision Making. Sigma J. Eng. Nat. Sci, 8, 303–314.

[22] Szilassy, Péter, Földes, Dávid (2023) What route an electric bus should run? Compliance Indicator determination method to match electric buses with routes, Transport Research Arena 2022 Proposal – Lisbon conference (under publication)
[23] UITP.: 'Zeeus ebus report', (2017). Available at http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-report2017-2018-final.pdf (2023) (2023.03.15.)