

Akkumulátoros elektromos autóbuszok fogyasztásának becslése vonali jellemzők és hőmérséklet figyelembevételével

Az elektromos autóbuszok alkalmazhatósága korlátozott, ezért szükséges olyan módszerek kidolgozása, amelyek alkalmasak az az elektromos autóbuszok útvonalszakaszaira vonatkoztatott energiaigények becsléséhez, segítve a fordatervezést is.

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.1.3>

Szilassy Péter Ákos^{1,2} – Dr. Földes Dávid¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék

²KTI – Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet Nonprofit Kft.

e-mail: szilassy.peter.akos@kjk.bme.hu

1. BEVEZETÉS

Az alternatív hajtáslánc-technológiák, mint például az elektromos meghajtás, bevezetése a közforgalmú közlekedésben kiemelkedően fontos a környezetszennyezés és a zajkibocsátás csökkentése miatt, különösen a városi környezetben [1, 2, 3, 4]. Az elfogadott irányelvek alapján 2025-től számos európai nagyvárosban korlátozzák az új, dízelautóbuszok beszerzését [5]. Az elektromos autóbuszok széles körű terjedését a magas beszerzési költségek és a korlátozott működési tartomány gátolja [6, 7, 8, 9, 10].

A városi autóbuszok üzemét a hosszú napi járatok jellemzik. Csak éjszakai, telephelyi töltést feltételezve, az elektromos járműveknek a dízel meghajtású járművekhez hasonlóan a teljes napi előírt fordátávolságot teljesíteni kell. További energiaigényt jelent a meghajtáshoz szükséges energia mellett, a segédberendezésekhez szükséges energia. Számos veszteség

tovább csökkentheti a hatékonyságot; például az ajtónyitások okozta hőveszteség, az emberi test hőleadása stb. Emiatt számos esetben fosszilis tüzelőanyagot használó berendezéseket (pl. kályha) használnak, így csökkentve az elektromos energiaigényt, de növelve a légszennyezést. Ha egy dízelmotoros jármű nem váltható ki egy az egyben elektromos járművel, akkor a költségek tovább növekednek és többletjármű vásárlása szükséges.

A kutatások többsége az energiafogyasztás optimalizálására összpontosít, valós fogyasztási adatokat elemezve. Mért adatok használatával a megvásárolni kívánt autóbuszok akkumulátor kapacitása könnyebben optimalizálható, a fordatervezés elvégezhető. Az autóbusz valós állapotú tesztelése nélkül azonban nehéz meghatározni a szükséges jellemzőket, ezen adatok pedig többnyire nem állnak rendelkezésre, az adatok becslése szükséges. Ugyanakkor a jelenlegi döntéstámogató módszerek a fogyasztást felületes

módon becsülik, csak bizonyos tényezőkkel számolnak, míg mások figyelembe veszik a megállóközi távolságokat [11, 12, 13], és részben vagy teljes mértékben az utasterheléssel is foglalkoznak [11, 12]. Ezen túlmenően a fűtő, szellőztető és légkondicionáló rendszer (HVAC) és az akkumulátor hőszabályzó rendszer (BTMS) magas fogyasztása miatt több tanulmányban megjelenik a fogyasztás hőmérséklettől való függése [12, 13, 14, 15]. Továbbá egyes tanulmányok a domborzatot veszik figyelembe, mint a fogyasztás bizonytalanságának fő okozóját [14, 16, 17, 18].

Kutatásunk célja számos, a fogyasztásra hatást gyakorló tényező együttes figyelembevételével készült számítási módszer kidolgozása az energiafogyasztás becslésére. A módszer újszerűsége, hogy az autóbusz energiafogyasztása nem a fogyasztási adatok alapján, hanem az aktuális gyorsulási erő és sebesség alapján meghatározott menetdinamikai számítás szerint becsülhető meg. A szakaszokon belül gyorsítási, futási és lassítási fázisokat különböztetünk meg. További újszerűsége a módszernek, hogy a teljes energiafogyasztás pontosabb meghatározása érdekében a járművön lévő egyéb fogyasztók energiafelhasználása is széles körben figyelembe vehető, mint például légkompresszor, szervokormány, rögzítőfék berögzítése és kioldása, ablaktörlő, ajtónyitó motorok, lámpák fogyasztásai, illetve az utastájékoztató rendszer. Fontos befolyásoló tényezők a jármű alapvető dinamikus paraméterei (jármű tömege, kerékátmérője, megengedett sebessége), az autóbusz útvonalának jellemzői (utasterhelés, emelkedési jellemzők, megálló helyzete) és a környezeti hőmérséklet. A kidolgozott módszertan alkalmazásával adathiányos környezetben, egy autóbusz valós idejű tesztelése nélkül is becsülhető a vonal teljesítéséhez szükséges energiaigény.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az akkumulátorok egységnyi térfogatra és tömegre jutó energiasűrűsége jóval kisebb, mint a fosszilis üzemanyagoké, ennek megfelelően lényegesen kevesebb energia szállítható az elektromos autóbuszokkal, mindemellett az akkumulátormodulok össztömege is nagy

terhelést jelent a járművekre [13]. Az energiafelhasználás elsősorban gyorsulási profil elemzésével határozható meg. A gyorsulás mértékének változtatásával az elektromos járművek energiafogyasztása csökkenthető, az akkumulátor élettartama növelhető. A sebességgörbe vizsgálatával a fogyasztás változását okozó gyorsulási tényező meghatározható [18]. A fogyasztásra nézve 50 km/h eléréséhez a kedvező gyorsulási idő 13,6 másodperc, míg a lassítási idő 50 km/h-ról 9,8 s városi környezetben [19]. A rekuperációs hatások a sebesség függvényében határozható meg [17]. A rekuperáció hatékonysága és energiamennyisége nagyobb, ha a jármű kisebb mértékben fékez [19]. Kettős optimalizálási problémával a kilométerenkénti fogyasztás minimalizálható és a megfelelő gyorsulási szint is biztosítható [16].

A szakirodalmi áttekintés során a következő fogyasztást befolyásoló alaptényezőket azonosítottunk: *domborzat (magasságkülönbség), megállóközi távolság, környezeti hőmérséklet és utasterhelés*. Az 1. táblázat összefogó képet ad arról, hogy az áttekintett irodalmak mely szempontokat veszik figyelembe.

2.1. Domborzat

A fogyasztás függ a domborzattól; lejtőn való haladás során energia nyerhető vissza. A fogyasztás egyszerűsített logika alapján a gyorsulás, sebesség és a lejtő/emelkedő meredekségének függvényében meghatározható. Emelkedős és lejtős szakaszokon az elektromos autóbuszok energiafogyasztása kedvezőbb, mint a dízelautóbuszoké. Az elektromos autóbusz energiafogyasztása minden vizsgált útvonalon alacsonyabb, a városi útvonalakon mintegy 70%-kal, a nem városi útvonalakon pedig mintegy 50%-kal [14]. Regeneratív fékezéssel a felhasznált energia 21-24%-a is visszanyerhető, különösen mikor hosszabb úton, nagyobb sebességről lassít a jármű [17, 18].

2.2. Megállóközi távolság

A fogyasztás nagymértékben függ az útvonaltól, nevezetesen a megállóhelyek számától és közöttük lévő távolságtól [11]. A megállóhely-távolság és a kilométeren-

1. táblázat: Tényezők figyelembevétele az áttekintett irodalmakban

Cikk	Kutatási téma	Domborzat	Megálló-távolság	Környezeti hőmérséklet	Utasterhelés
[11]	Fogyasztás modellezése	Nem	Igen	Nem	Részben
[12]	Fogyasztás modellezése	Nem	Igen	Igen	Igen
[13]	Fogyasztás elemzése	Nem	Igen	Igen	Nem
[14]	Fogyasztás modellezése	Igen	Nem	Nem	Nem
[16]	Gyorsulás optimalizálás	Igen	Nem	Nem	Nem
[17]	Regeneratív fékezés	Igen	Részben	Nem	Nem
[18]	Energiatakarékosági stratégia	Igen	Nem	Nem	Nem
[19]	Gyorsulásszabályozás	Nem	Részben	Nem	Nem
[20]	Hűtő-fűtő rendszer fogyasztás elemzése	Nem	Nem	Igen	Nem
[21]	Hűtő-fűtő rendszer költség és fogyasztás elemzése	Nem	Nem	Igen	Igen
[22]	Hűtő-fűtő rendszer szabályozás	Nem	Nem	Igen	Igen
[23]	Fogyasztás modellezése	Nem	Nem	Igen	Részben
[24]	Fogyasztás modellezése	Nem	Részben	Igen	Nem
[25]	Fogyasztás modellezése	Nem	Nem	Nem	Részben
[26]	Termikus szabályozás	Nem	Nem	Igen	Nem
[27]	Személyautó-fogyasztás modellezése	Igen	Nem	Nem	Nem

kénti megállások számának felhasználásával az autóbusz energiaigénye számítható, ami alapján a megfelelő méretű akkumulátor is kiválasztható. A [12] figyelembe vette a megállások számát, de a gyorsulási erőkkel nem számolt. Az autóbuszvezetők habitusa és szokásai alapvetően befolyásolják a gyorsítások karakterisztikáját [13, 18], amelyek gyakorisága a megállóhely-távolsággal összefügg. A megállások számának növekedése növeli az agresszív gyorsítás és fékezés lehetőségét. Lágyabb gyorsítás akár 15-20%-kal alacsonyabb fogyasztást is jelenthet [18].

2.3. Környezeti hőmérséklet

A szélsőségesen alacsony és magas külső hőmérséklet nagy mértékben befolyásolja a fogyasztást; a segédüzemi hőszivattyú teljesítménye megnő [28]. A szükséges akkumulátor

meghatározásánál különösen a HVAC rendszer energiafelhasználásának figyelembevétele szükséges. A legmelegebb időszakokban az éves hűtési fogyasztás 7 és 40 kWh között is ingadozhat [20]. A HVAC rendszer energiaigényének 50%-os csökkentése is indokolt az elektromos autóbuszok hatékonyságának növelése érdekében [21], hiszen a hatótávolságot 45%-kal is csökkentheti a 0 °C-on alkalmazott hűtő-fűtő rendszer energiaigénye miatt [22].

2.4. Utasterhelés

A jármű dinamikus fogyasztását jelentősen befolyásolja a jármű össztömege. Az utasterhelés változásával a jármű tömege az utasok tömegével növekszik [12, 23, 29]. Az utasterhelés fontos szerepet játszik a HVAC rendszer működésében is, így befolyásolja az elektromos autóbusz teljes energiafogyasztását [12, 21].

A használt modellekben a fel- és leszálló utasokat hőforrásként és hőleadó testként modellezzük; az utasok száma a teljes fogyasztás 5-6%-át is jelentheti [22].

Az áttekintett szakirodalmak fő megállapítása, hogy a fogyasztás nagymértékben függ a domborzattól, megállóközi távolságtól, hőmérséklettől és az utasszámtól; ugyanakkor az irodalmak nem egyben, hanem külön-külön mérték ezen tényezők hatását, de a közúti forgalom aktuális nagyságával, illetve egyéb, a fogyasztást is befolyásoló lokális tényezők hatásával (pl. útpálya minősége) nem foglalkoztak.

3. MÓDSZERTAN

3.1. Fogyasztás számításának felosztása és általános korlátozások

A teljes fogyasztás meghatározását az akkumulátoros elektromos autóbusz felépítéséhez hasonlóan két kategóriára osztottuk:

- menetdinamikai energiafogyasztás,
- segédüzemi energiafogyasztás.

3.1.1 Hajtásrendszer

A menetdinamikai energiafogyasztási számítás a jármű mozgásához és haladásához szükséges energia meghatározását jelenti. Az energia alapú számítási megközelítést alkalmazva az összes Newton II. törvénye szerinti erő figyelembevétele szükségtelen. Azonban egyes energiák és az erők közötti analógiák

megadása érdekében az erőre vonatkozó alapvető egyenleteket is értelmeztük.

Az emelkedőn mozgó járműre ható erők légellemenállással és gördülési ellenállással rendelkező környezetben a (1) egyenlet szerint határozható meg.

$$\frac{F_v}{(1+\theta)} - (F_r + F_f + F_s) = m \cdot a \quad (1)$$

ahol F_v a vonóerő; F_r a gördülési ellenálláserő; F_f a légellemenállási; F_s az emelkedési ellenálláserő; míg θ a gyorsítási ellenállási tényező. A gyorsítási ellenállás tényező a jármű forgó részei által kifejtett ellenállását fejezi ki, ami sebességfokozatonként eltér; jellemző értéke 0,2 és 0,5 közötti.

A vonóerő a (2) egyenlet szerint határozható meg.

$$F_v = F_r + F_f + F_s + F_a = m \cdot g \cdot \mu_r + \frac{\rho \cdot c_f \cdot A \cdot v^2}{2} + m \cdot g \cdot \sin \alpha + (1+\theta) \cdot m \cdot a \quad (2)$$

ahol v a jármű pillanatnyi sebessége; μ_r gördülési súrlódási együttható; c_f a légellemenállási tényező; ρ a levegő sűrűsége (közeg); α az emelkedő hajlásszöge, F_a a jármű részeit gyorsító addiktív gyorsító erő

Az erők és energiák közötti analógiákat a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A mechanikai rendszer által felhasznált energia az utasterhelés és a hőmérséklet-ingadozás

2. táblázat: Energiák és erők közötti analógiák

Energia	Jelölés	Képlet	Erő	Jelölés	Képlet
Helyzeti energia	E_{pot}	$m \cdot g \cdot h$	Emelkedési ellenálláserő	F_s	$m \cdot g \cdot \sin \alpha$
Mozgási energia	E_{kin}	$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	Gyorsító erő	F_a	$(1+\theta) \cdot m \cdot a$
Gördülési ellenállási energia	E_{rol}	$\int (m \cdot g \cdot \mu_r) \cdot v \, dt$	Gördülési ellenállási erő	F_r	$m \cdot g \cdot \mu_r$
Légellemenállási energia	E_{air}	$\frac{\rho \cdot c_f \cdot A \cdot v^2}{2}$	Légellemenállási erő	F_f	$\frac{\rho \cdot c_f \cdot A \cdot v^2}{2}$

következményeként változónak tekinthető a domborzaton és a megállótávolságon felül.

A számításokhoz szükséges autóbusz üzemi tömege a (3) egyenlet alapján határozható meg.

$$m = m_0 + \rho_x \cdot m_{pass} \quad (3)$$

ahol ρ_x az utasok száma az x . szakaszon; m_0 az üres jármű saját tömege; m_{pass} az utasok átlagos tömege; a KRESZ 46. § alapján 68 kg [4].

A hőmérsékletfüggést egyrészt a légellenállási energia disszipációja és a kiegészítő fűtési rendszerek (HVAC, BMTS) energiaigénye miatt szükséges figyelembe venni. Emellett a hőmérséklet megváltoztatja a légellenállást, mivel a levegő a hőmérséklet emelkedésével ritkábbá válik. A Nemzetközi Légköri Szabvány (ISA) szerint a hőmérséklet-függőség az (4) egyenlet alapján írható le.

$$\rho_{air}(T) = 0,046T + 1,2978 \quad (4)$$

ahol T a környezeti hőmérséklet °C-ban mérve; ρ_{air} a levegő sűrűsége.

A modellben a következő lehatárolásokkal élünk:

- Általában egyetlen villanymotor felelős a gyorsulásért és a mozgásban tartásért. Ismert nyomatókijelmezővel rendelkező motor használatát vettük figyelembe.
- A gyorsulás mértéke a gyorsítási fázisokban ismert. A kimenő nyomatók esetében bizonyos teljesítményvesztéseket feltételeztünk, figyelembe véve a különböző erőátviteli elemeken, például a kardántengelyen disszipálódott teljesítményt.
- A hajtóerő az az erő, amely közvetlenül a jármű súlypontjára hatva hajtja a járművet. Az autóbusz terjedelmével csak a légellenállás meghatározásakor számoltunk. A jármű hosszirányú dinamikáját csak a számításokhoz szükséges mértékben vettük figyelembe.
- A laterális dinamikát figyelmen kívül hagytuk, ugyan úgy, mint a kanyarok-

dási ellenállást és a jármű jobb és bal oldali átterhelődését.

- Az első és hátsó kerekek közötti erőeloszlást figyelmen kívül hagytuk, a függőleges dinamikát csak a kerékfelfüggesztési rendszer által elnyelt energia esetében vettük figyelembe.
- A fogyasztást járműdinamikai szempontból vizsgáltuk, de nem vizsgáltuk az út egyenlenségeit és a hajtómotor hatásfokának a sebesség [RPM] függvényében történő ingadozását. A jelenlegi legkorszerűbb elektromos hajtások közel állandó hatékonyságot biztosítanak; az alacsonyabb fordulatszám-tartományban is ($n = 0-500$ RPM) 90-92%-os hatásfok érhető el. [30]

3.1.2. Segédüzemi rendszer

Alapesetben hő- és áramlásdinamikai egyenletek használhatók, mivel a fő fogyasztók a fűtéshez és hűtéshez kapcsolódnak. Már az egyszerű hőtechnikai modellek is megkövetelik a végelelemes-modellezést, amit sokszor nehezebb meghatározni és validálni, mint az autóbuszon használt hőtechnikai berendezések fogyasztására vonatkozó adatokat gyűjteni [30]. Ennek megfelelően a korábbi tanulmányok [11, 12, 31, 32] és mérések eredményeit vettük figyelembe. A működési és karbantartási körülmények ismeretében meghatározható a felhasznált villamos energia mennyisége.

3.2. Fizikai modellek

A fizikai modell alkalmazásával írható le egy viszonylat gráf alapú megközelítésben, megkülönböztetve éleket és csúcsokat. A felosztás elméleti, féldinamikus, térbeli adatokon alapul. Például a valós idejű forgalmi akadályok nem kerültek figyelembevételre.

A csúcsok típusai a következők:

- **megálló** ($i=0\dots l$, $i \in \mathbb{N}$): megállók és végállomások, ahol l a viszonylat megállóinak száma.

- **gócpont** ($j=0\dots o, j \in \mathbb{N}$): forgalomirányítással kapcsolatos pont; új sebességkorlátozás érvénybelépésének helye, statikus/dinamikus forgalmi akadályt (jelzőlámpa, vasúti átjáró stb.), vagy irányválttatás kezdetét (jobbra/balra kanyarodás, körforgalom) jelző pont. Egy gócpont egy megállónak van alárendelve, ennek megfelelően a gócpont jelölése i, j .
- **határpont** ($k=0\dots n, k \in \mathbb{N}$): futópont; helye pontosan meghatározható, de nem esik egybe semmilyen fizikai jelzéssel, jelöléssel; az új sebesség elérésének indikátora - a gyorsítás/lassulás végpontja és a sebességtartási fázis kezdőpontja. A határpont egy megállónak és alá tartozó gócpontnak van alárendelve; ennek megfelelően egy határpont jelölése i, j, k .

A csomópontok számozása 0-val kezdődik azzal a kikötéssel, hogy az abszolút nulla pont az indulási végállomás, a 0. gócpont pedig az indulási megálló.

A csúcsok alkalmazásával a viszonylat élekre osztható:

- **menet**: végállomástól végállomásig vett távolság.
- **szakasz** ($x=0\dots l, x \in \mathbb{N}^+$): távolság két egymást követő autóbuszmegálló között. Egy menet több szakaszra osztható.
- **részszakasz** ($y=0\dots o, y \in \mathbb{N}^+$): távolság az autóbuszmegálló és az attól számított első gócpont között, vagy gócpontok között, vagy a következő megálló előtti utolsó gócpont és az autóbuszmegálló között. Két megállóhely között pontonként eltérő forgalmi helyzetekbe érkező autóbussz a gócpontokat érintve. Egy szakasz több részszakaszra osztható.
- **fázis** ($z = \{acc, cruise, dec\}$): távolság egy gócpont és az első határpont között, vagy határpontok között, vagy a követ-

kező gócpont előtti utolsó határpont és a gócpont között. Egy részszakasz különböző fázisokra osztható a jármű mozgási jellemzőinek megfelelően.

Fázistípusok:

- **gyorsítás {acc}**: folyamatos és egyenletes gyorsulás, gyorsítási folyamat,
- **sebességtartás {cruise}**: a jármű állandó sebességgel halad,
- **lassítás {dec}**: folyamatos és egyenletes lassulás, fékezési folyamat.

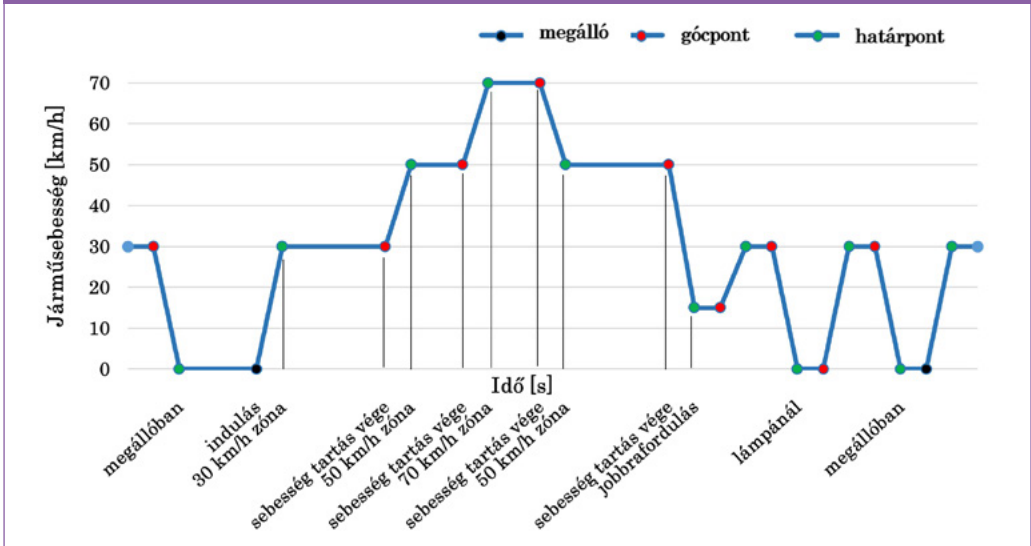
Egy részszakasz legalább egy fázist tartalmaz. Egy részszakaszon legfeljebb egy gyorsítási, egy sebességtartási és egy lassítási fázis határozható meg. Egyenletes gyorsulási fázist követően a jármű haladási sebességre gyorsul, majd tartja ezen sebességet, végül a jármű a megálló/gócpont előtt állóra/lassabb sebességre fékez.

Összefoglalva, a csomópontok és az élek közötti kapcsolatok a következők:

fázis \subset részszakasz \subseteq szakasz \subset menet
határpont $<$ gócpont $<$ megálló

Az 1. ábrán a csomópontokat és az éleket egy példabeli sebességprofilon ábrázoltuk; az y tengely a járműsebességét, míg az x tengely az időt jelöli. A jármű haladva az útján, a menet során közlekedési helyzetekbe kerül, amelyek a referenciasebességét és végül a tényleges sebességét is meghatározzák. Két megálló közötti közlekedési helyzeteket mutatunk be példaként az ábrán. Az autóbussz 30 km/h sebességgel érkezik a megállóba, ahol megáll, utascserre történik. A jármű ezek után 30 km/h-re, 50 km/h-s zónába érve 50-re, majd emelt sebességű úton 70 km/h-ra gyorsít. Innen fokozatosan lassul 50-re, majd 15 km/h-ra, ahol jobbra fordulva 30 km/h-val éri el a következő jelzőlámpát, ahol a piros lámpa várakozásra kényszeríti. Utána 30 km/h-val halad a következő megállóig, előtte lelassít, végül megáll. Ebből a megállóból az autóbussz utascserét követően folytatja útját a következő megállóig.

1. ábra: Sebességprofil mintapélda



Sebességtartó szakaszban disszipáló erők hatnak, és akadályozzák, fékezik a jármű egyenletes mozgását. A lassító jármű a mozgási energiáját egy bizonyos felső határig (kb. 90 kW [11]) képes visszanyerni 4 m/s² alatti lassítással (és megfelelő töltési állapot (SOC) mellett), legalább 3 m/s-os sebességig. Nagyobb reku-perációs teljesítmény nem lehetséges, így az e határérték feletti energia csak üzemi fékkel (disszipáció) vonható el a jármű mozgásából.

A fizikai modellben a következő korlátozó-sokot tettük:

- Egyenletes és folyamatos gyorsulást és lassulást feltételeztünk.

- A jármű mindig eléri a maximális megengedett sebességet.
- A gócpontok közötti lejtő gradiense állandónak tekinthető.
- A légellenállás a sebesség négyzetétől, a gördülési ellenállás a tömegtől és a lejtő/emelkedő meredekségétől függ.

A forgalom nagysága állandó, szabadáramlás feltételezett; a dinamikus forgalmi változásokat (pl. torlódás) nem vettük figyelembe.

3.3. Energiafogyasztás számítása

A becslő módszer lépéseit a 3. táblázatban foglaltuk össze, kiemelve az akkumulátoros elekt-

3. táblázat: A módszer lépései

Lépés	Leírás	
1	Fizikai modell létrehozása	
2	Menetdinamikai fogyasztás	Jármű szükséges motornyomatekának ellenőrzése
3		Egyes részzakaszokban felhasznált energiák meghatározása
4	Segédüzemi fogyasztás	Fogyasztók számbavétele és teljesítményigény meghatározása
5		Menetidőre vonatkozó fogyasztás számítása a külső hőmérséklet és az utasterhelés figyelembevételével
6	A teljes fogyasztás összegzése	

romos autóbusz felépítése alapján meghatározott kategóriát.

1. lépés: Fizikai modell létrehozása. A csúcok és jellemzőinek (megengedett sebesség, magasság), valamint az élek és jellemzőinek (távolság) meghatározása.

2. lépés: Szükséges motornyomaték meghatározása. Annak megállapítása, hogy a jármű le tudja-e küzdeni a ráható ellenállási erőket, és képes-e elérni a szükséges és kielégítő gyorsulást a menet során. Ehhez számítandó a motor által leadható maximális nyomaték a keréksugar függvényében a (5) egyenlet alapján.

$$M_m = \frac{F_t \cdot r_w}{i_{tm} \cdot \eta_{drive}} \quad (5)$$

ahol r_w a kerekek sugara; i_{tm} a teljes erőátviteli rendszer áttétele; η_{drive} a hajtáslánc hatásfoka az akkumulátortól a kerekekig, amelyet a (6) egyenlet szerint lehet meghatározni.

$$\eta_{drive} = \eta_{w\&ch} \cdot \eta_{lm} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_m \cdot \eta_b \quad (6)$$

ahol $\eta_{w\&ch}$ a kerekek és felfüggesztési rendszer hatásfoka; η_{drive} az erőátviteli rendszer hatásfoka; η_{inv} a motorinverter hatásfoka, η_m a villanymotor hatásfoka, η_b pedig az akkumulátor hatásfoka.

3. lépés: Részszakaszonként felhasznált energia meghatározása. A (7) egyenlet leírja a hajtáslánc teljes energiafogyasztását az akku-

mulatórtól a kerékgig egy teljes menetre (részszakaszok összegzése) vonatkozóan.

ahol Δv_{xy} a lehetséges megengedett járműsebességek különbsége egy szakaszon a (8) egyenlet szerint; Δh_{xy} a magasságkülönbség egy szakaszon a (9) egyenlet szerint; $\mu_{r,x}$ a gördülési ellenállás együtthatója egy szakaszon; $s_{xy,acc}$, $s_{xy,cruise}$, $s_{xy,dec}$ a gyorsulási, sebességtartási és lassítási szakaszok távolságai; $\cos\alpha_{xy}$ egy szakasz emelkedési dőlésszögének koszinusza ((10) egyenlet); η_{recup} az energia-visszanyerés hatásfoka ((11) egyenlet);

$$\Delta v_{xy} = v_{xy} - v_{xy-1} \quad (8)$$

$$\Delta h_{xy} = h_{xy} - h_{xy-1} \quad (9)$$

$$\alpha_{xy} \approx \sin \alpha_{xy} = \frac{\Delta h_{xy}}{s_{sv}} \quad (\text{kis szögek esetében}) \quad (10)$$

$$\eta_{recup} = \frac{\eta_{forward}}{\eta_{backward}} = \frac{\eta_{drive}}{\eta_{backward}} \quad (11)$$

$\cos\alpha_{xy}$ kis szögeknél nem mutat szignifikáns eltérést 1-hez képest, de itt a valós érték használható, mivel a normálerő kisebb lejtőn történő mozgásnál. Alfa szög definiálható minden egyes szakasz esetében. A rekuperáció hatékonysága az előre és hátrafelé irányuló energia arányából adódik; mértékét számos tényező befolyásolja (pl. a szabályozás rendszeren belüli helye).

4. lépés: A fogyasztók számbavétele és a teljesítményigény meghatározása. A figurelembé vett

$$\begin{aligned} E_{DRIVE} &= \frac{1}{\eta_{drive}} \sum_{x=1}^i \sum_{y=1}^m \left[\text{[acceleration]}_{xy} + \text{[crusing]}_{xy} + \text{[decleration]}_{xy} \right] = \\ &= \frac{1}{\eta_{drive}} \sum_{x=1}^i \sum_{y=1}^m \left[E_{kin,xy,acc} + E_{air,xy,acc} + E_{roll,xy,acc} \right] + \left[E_{air,xy,cruise} + E_{roll,xy,cruise} \right] + \\ &\quad + \eta_{recup} \cdot \left[E_{kin,xy,dec} + E_{air,xy,dec} + E_{roll,xy,dec} \right] + E_{pot,xy} \quad (7) \\ &= \frac{1}{\eta_{drive}} \sum_{x=1}^i \sum_{y=1}^m \left[\left[\frac{1}{2} m_{v,x} \cdot \Delta v_{v,xy}^2 + \left(m_{v,x} \cdot g \cdot \mu_{r,x} \cdot \cos \alpha_{xy} + \frac{\rho \cdot c_d \cdot A \cdot \Delta v_{v,xy}^2}{2} \right) \cdot s_{xy,acc} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left[\left(m_{v,x} \cdot g \cdot \mu_{r,x} \cdot \cos \alpha_{xy} + \frac{\rho \cdot c_d \cdot A \cdot \Delta v_{v,xy}^2}{2} \right) \cdot s_{xy,cruise} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \eta_{recup} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} m_{v,x} \cdot \Delta v_{v,xy}^2 \right) + \left(m_{v,x} \cdot g \cdot \mu_{r,x} \cdot \cos \alpha_{xy} + \frac{\rho \cdot c_d \cdot A \cdot \Delta v_{v,xy}^2}{2} \right) \cdot s_{xy,dec} \right] + \right. \\ &\quad \left. + m_{v,x} \cdot g \cdot \Delta h_{xy} \right] \end{aligned}$$

4. táblázat: Fogyasztók névleges fogyasztása

Segédüzemi fogyasztók	Teljesítmény [W]	Működés	Hivatkozás
Hűtő-fűtő rendszer	25000	ha szükséges	[12, 24]
Akkumulátor hőszabályzó rendszer	6000	ha szükséges	[12]
Légkompresszor	830	2200 W, 38%-ban	[11, 31]
Szervokormány	500		[30]
Rögzítőfék	560	2 mp megállónként	[12]
Ablaktörlő	110	ha szükséges	[12]
Ajtók	90	6 mp megállónként	[12]
Utastájékoztató, lámpák, jegyautomata	100	ha szükséges	

segédüzemi fogyasztók névleges fogyasztását a 4. táblázat foglalja össze megadva az adatok forrásának helyét. Az utastér hűtéséhez/fűtéséhez és a jármű akkumulátorának temperálásához szükséges energiaigény függ a hőmérséklettől (T) és az időtől (t); a többi energiafogyasztó energiaigénye csak az időtől függ. Emellett a HVAC rendszer fogyasztása függ az utasok számától (p), az elektromos ajtónyitó fogyasztása pedig függ az autóbusszegállók számától (i).

5. lépés: A teljes menetidőre vonatkozó fogyasztás számítása. A jármű üzemidejéből – beleértve a tartózkodási időt is [33, 34] – a segédrendszerek által fogyasztott energia a (12) egyenlet alapján számítható a külső hőmérséklet és az utasterhelés figyelembevételével.

$$E_{AUX} = \frac{P_{AUX}}{\eta_{pc} \cdot t_{trip}} \quad (12)$$

ahol t_{trip} a teljes menetidő; az áramátalakító hatásfoka; $P_{AUX}(t)$ a segédrendszerek teljesítményigénye, amely az egyes fogyasztók teljesítményigényének összegzésével számítható (13) egyenlet.

$$P_{AUX}(t) = P_{HVAC}(t, T, p) + P_{BMTS}(t, T) + P_{EPS}(t) + P_{comp}(t) + P_{doors}(t, i) + P_{wiper}(t) + P_{other}(t) \quad (13)$$

ahol P_{HVAC} a HVAC rendszer, P_{BMTS} a BTMS rendszer, P_{EPS} az elektromos szervokormány,

P_{comp} a légkompresszor, P_{doors} az ajtók, $P_{parking}$ a rögzítőfék, P_{wiper} az ablaktörlő rendszer, P_{other} az egyéb energiafogyasztók teljesítményigénye.

Publikált adatok alapján [12, 31, 32] közelítő függvények segítségével a HVAC és a BTMS hőmérséklet- és utasterhelésszármazékos függése meghatározható. A HVAC hőmérsékletfüggése másodrendű közelítő függvénnyel adható meg, (14) egyenlet; a HVAC utasterhelés-függése lineáris függvénnyel írható le (csak hűtés esetén), (15) egyenlet. A névleges érték 24 főnél található. Fűtés esetén az utasterheléstől való függés nem jelentős és nem mutat valós trendet (5-6% a teljes tartományra nézve).

$$P_{HVAC}(T) = 0,0264T^2 - 1,046T + 11,13 \quad (14)$$

$$P_{HVAC}(p) = 0,064p + 2,49 \quad (15)$$

A BTMS hőmérsékletfüggése két egyenlettel írható le, annak érdekében, hogy a leíró függvény ne egy magasfokszámú polinom illesztési függvényhez illeszkedjen. A BTMS hőmérsékletfüggése -10 °C-tól 20 °C-ig másodrendű közelítő függvénnyel ((16) egyenlet), míg 20 °C-tól 40 °C-ig harmadrendű közelítő függvénnyel adható meg ((17) egyenlet).

$$P_{BMTS}(-10^\circ\text{C} < T < 20^\circ\text{C}) = 0,007T^2 - 0,237T + 1,98 \quad (16)$$

$$P_{BMTS}(20^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}) = 0,0027T^3 - 0,232T^2 - 6,54T + 59,81 \quad (17)$$

6. lépés: A menet során a hajtáslánc által elfogyasztott teljes energia, valamint a kisegítő rendszeren az út során elfogyasztott teljes energia összege ((18) egyenlet).

$$E_{TOTAL} = E_{DRIVE} + E_{AUX} \quad (18)$$

4. ESETTANULMÁNY

A kidolgozott módszer validálása érdekében a számított eredményeket összevetettük a mért adatokkal. A mért adatok egy Ebusco 2.2 típusú autóbusz 2020 őszi végzett tesztfutásból származnak.

4.1. Helyszín

A tesztfutás a nyíregyházi 10-es autóbuszvonalon, Nyírszőlős és Örökösöld között zajlott. A vonal északon indul egy külvárosi területről, majd egy hosszú sugárúton halad a város felé, a városközpont irányába és tovább a vasútállomásra. Ezt követően a városgyűrű mentén a külvárosban végződik. Ellenkező irányba az útvonal azonos, csak a megálló helyei térnek el pár méterrel. Az útvonalon a megálló közötti magasságkülönbség nem jelentős. A jármű 47-55 perc alatt teszi meg a teljes menetet. A menetek teljes távolsága befelé és kifelé 17,6, illetve 17,3 km.

A vizsgált jármű összesen 25 napot teljesített tesztkörülmények között. Örökösöld irányában (befelé) 16, míg Nyírszőlős irányában (kifelé) 8 mérés történt egy hónap alatt. A vizsgált energia adatokat a fedélzeti számítógép rögzítette.

4.2. Számítás során felhasznált adatok

A figyelembe vett jármű főbb alapadatai (5. táblázat): 3 ajtós, 300 kWh akkumulátorral szerelt, 12 méter hosszú autóbusz, üres tömege 13 tonna. Ülőhely-kapacitása 40 fő, maximális kapacitása 90 fő. Az utasok átlagos tömege magyar szabvány szerint 68 kg. [47] A maximális teherbírás 20 tonna, a gyakorlatban ez 19,5 tonnának veendő a túlterhelés elkerülése végett, és ez alapján maximum 6,5 tonna hordozható tömeg megengedett (utasok).

5. táblázat: Ebusco 2.2 jármű alapadatai

Jellemző	Érték
Teljes hossz	12000 mm
Teljes magasság	3200 mm
Teljes szélesség	2500 mm
Tengelytáv	6000 mm
Saját tömeg	13000 kg
Max. megengedett tömeg	19000 kg
Utaskapacitás	90 fő
Ülőhelykapacitás	40 fő
Csúcsteljesítmény	270 kW
Max. leadott nyomaték	18000 Nm

A teljes hajtáslánc hatásfokát az időben állandónak feltételezzük [35]. Azonban jelentős a különbség az autóbusz előre és hátrafelé irányuló energiaáramai között. Ez a különbség leginkább az abroncs általi energiadisszipációban és a rekuperációban mutatkozik meg. Figyelembe vett arányok: előrefelé 70%-os összesített akkumulátor-kerék hatásfok érhető el, míg ellenkező irányban 56%. Így a gyorsuláskor felhasznált energia 80%-a visszanyerhető és újratölthető [17]. A pontos értékeket a 6. táblázat tartalmazza.

Az átlagos gyorsulás értéke 0,6-0,8 m/s² közötti értéket vesz fel [13]. Az egyszerűség kedvéért egy átlagos, 2,5/3,6 m/s²-es folyamatos gyorsulást vettünk figyelembe. A lassulás mértékét -5/3,6 m/s² -ban állapítottuk meg [13]. Az autóbusz gördülési ellenállási tényezője az út-típustól függően változó értéknek tekinthető [28]. A számítás során 0,01-es értéket vettünk figyelembe minden esetben, ami a száraz aszfalt gördülési ellenállási együtthatója.

5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

5.1. Adatok összehasonlítása

A fogyasztás számításánál két szélsőséges esetet vizsgáltunk:

6. táblázat: A hajtáslánc-elemek és az áramátalakító hatásfoka ([16, 35] alapján)

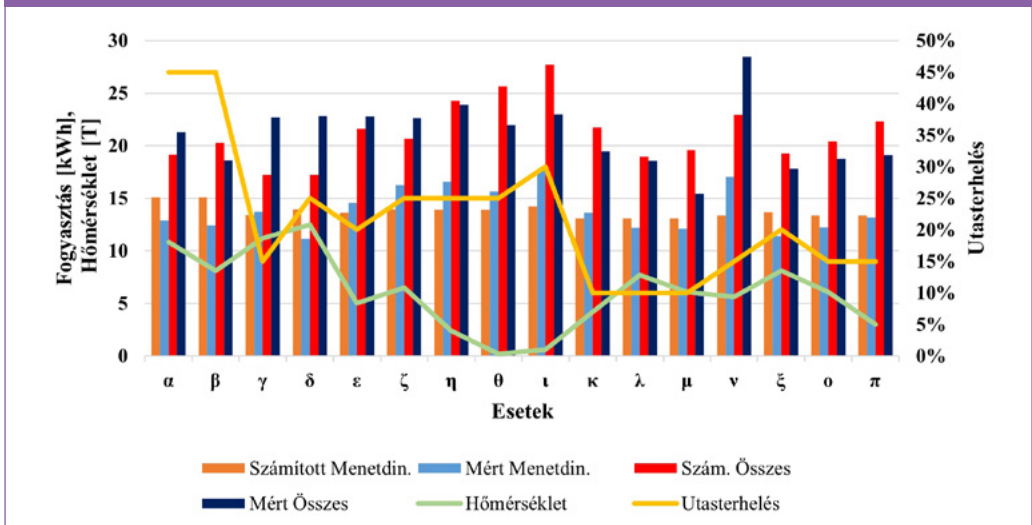
Jelölés	Részegység	Előre	Vissza
η_b	Akkumulátor	99,0%	99,5%
η_m	Motor	90,0%	78,0%
η_{tm}	Tengelykapcsoló	97,0%	97,1%
	Véghajtás (kardán)	98,0%	98,0%
$\eta_{w\acute{e}ch}$	Kerékabroncs	83,0%	76,0%
	Felfüggesztés	91,9%	92,4%
η_{drive}	Teljes hatásfok	70,3%	56,1%
η_{recup}	Rekuperáció hatásfok	—	79,8%
η_{pc}	Áramátalakító	95,0%	—

- a) amikor a jármű minden jelzőlámpánál és akadálnál megáll,
- b) amikor a jármű egyik jelzőlámpánál és egyéb akadálnál sem áll meg.

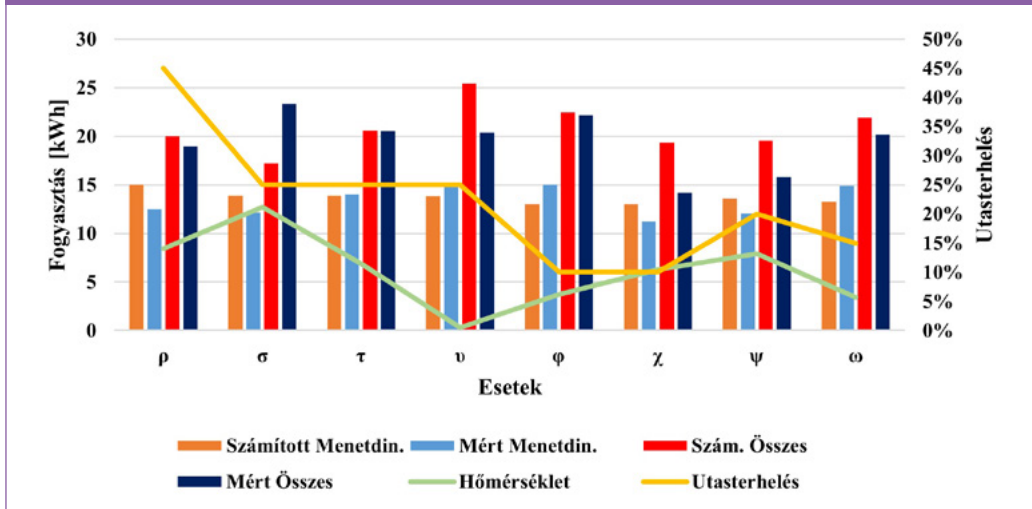
A két irány mért és számított adatait az a) szélsőérték esetében a 2. ábrán (Nyírszőlős-Örökösöld irány) és a 3. ábrán (Örökösöld-Nyírszőlős irány) mutatjuk be a hőmérséklet és az utasterhelés változása alapján különböző

esetekben. Az x tengelyen az eseteket görög betű jelöli; az esetek a hét napjaiban és napszakjaiban térnek el egymástól. Az y tengely a számított és mért fogyasztást mutatja a teljes menetén értelmezve, valamint az esetek közötti külső hőmérsékletet és utasterhelést szemléltetve a fogyasztás függését. A négy oszlop sorrendben a számított és mért menetdinamikai, illetve a számított és mért összes energiafogyasztást ábrázolják.

2. ábra: Fogyasztási trend a környezeti hőmérséklettől és az utasterheléstől függően (Nyírszőlős-Örökösöld irány)



3. ábra: Fogyasztási trend a környezeti hőmérséklettől és az utasterheléstől függően (Örökösföld-Nyírszőlős irány)



Megállapítottuk, hogy a számított és a mért adatok kellően jól korrelálnak egymással. Befelé irányban átlagosan -0,16 kWh különbséget tapasztalunk a számított és a mért értékek között 16-18 kWh átlagos vonali energiafogyasztás mellett, ami mindössze 1%-os hibát jelent. Kifelé irányban 4,5-5%-os hiba jelentkezik a két adatsor között. A szórásértékek 2,16 és 3,44. A teljes energiafogyasztást tekintve egy irányban a két adatsor közötti különbség 0,11 kWh befelé irányban, míg -1,34 kWh kifelé irányban. Ez 1% és 6%-nál kisebb hibát jelent. A szórásértékek 3,44 és 3,64. Mindezeket az adatokat, továbbá a ki-

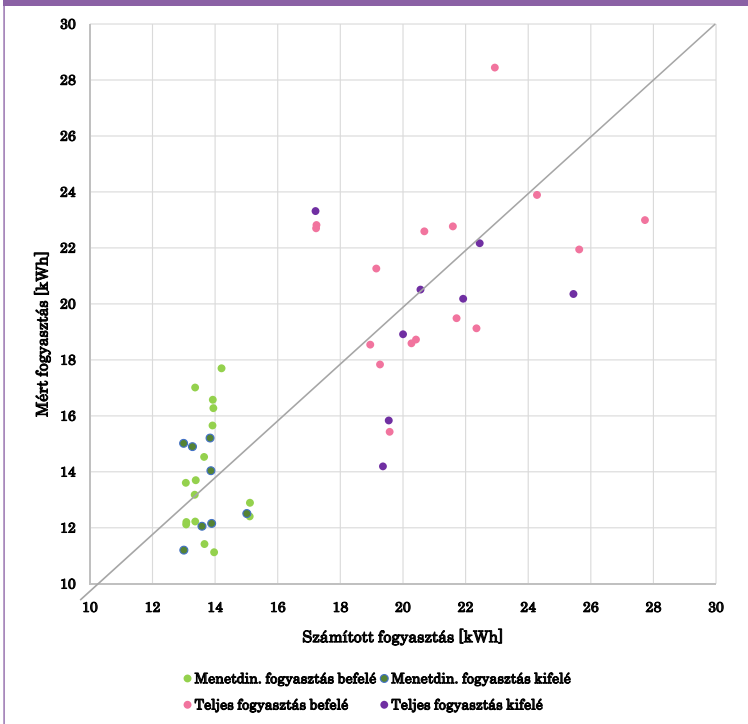
lométerre vetített fajlagos fogyasztást a 7. táblázatban foglaltuk össze. További mérés elvégzésével a modell egyes paraméterei finomíthatók, akár egy adott útvonalra és irányra is illeszthetők (gördülési együttható, kanyarveszteségek).

A menetdinamikai fogyasztás számításánál összesen 5-6% volt az egész útra vetített fogyasztáskülönbség az a) és a b) szélsőérték között, ami a teljes fogyasztásnak mindössze 2-3%-a. A kis eltérés fő oka, hogy bár az a) esetben a jármű sokat gyorsít a megállások miatt, ez a gyorsítás nem okoz jelentős többlet-

7. táblázat: Fogyasztási adatok eltérés-elemzése

Eltérések elemzése					
Irány	Kategória	Mért fogyasztás [kWh]	Mért fajlagos fogyasztás [kWh/km]	Átlag	Szórás
Befelé irány	Hajtás	13,92	0,79	-0,16	2,16
	Összes	21,08	1,20	0,11	3,44
Kifelé irány	Hajtás	13,17	0,76	-0,78	1,73
	Összes	19,33	1,12	-1,34	3,64

4. ábra: A számított és mért fogyasztás összehasonlítása



energiafogyasztást a b) esethez képest, amikor a járműnek egy állandó és magasabb sebességet kell tartania.

A 4. ábrán a számított és mért fogyasztás összefüggéseit mutatjuk be. A vízszintes tengelyen a számított, míg a függőleges tengelyen a pontos, mért fogyasztás olvasható. A világoszöld pontok befelé, míg a sötétzöldek a kifelé irányt mutatják a menetdinamikai fogyasztás esetében. A teljes fogyasztás esetén a világoslila a befelé irányt, míg a sötétlila a kifelé irányuló fogyasztási adatokat jelöli.

Az eltérés az illesztett $y = x$ egyenestől való távolság mértékében adható meg. A pontok szórása esetében a menetdinamikai fogyasztás esetén kisebb, míg a teljes fogyasztás esetében jelentős eltérés tapasztalható. A menetdinamikai fogyasztás számítása pontosabb, mint ahogy ezen értékek szórása is. Ezzel szemben az összefogyasztásban nagyobb a különbség, de ez is átlagosan 5% alá esik.

5.2. Érzékenységvizsgálat

A befolyásoló tényezők, így a környezeti hőmérséklet, a domborzat, a megállóközi távolság és az utasterhelés függetlenségének bizonyítására érzékenységi elemzést végeztünk. Az egyes tényezők érzékenységvizsgálatához eseteket határoztunk meg.

- *A eset, környezeti hőmérséklet:* 20 °C-ot feltételeztünk, amely hőmérsékleten sem fűteni, sem hűteni nem szükséges az utasteret.
- *B eset, domborzat:* teljesen sík területtel számoltunk.

- *C eset, megállótávolság:* autóbusszmegállókat nem vettük figyelembe (expresszjáratot feltételeztünk).
- *D eset, az utasterhelés:* üres járművet tekintettünk.

További esetek az *M* eset a mért fogyasztás leírására és a *0* eset a becsült fogyasztás leírására, ahol az összes befolyásoló tényezőt figyelembe vettük. Az eredményt a 8. táblázat foglalja össze.

A tényezők különböző módon befolyásolják a végeredményt. Az *A* esetben a hajtás fogyasztásában nincs jelentős eltérés, de a teljes energiafelhasználásban jelentős eltérés mutatkozik. Az *D* esetben különbség figyelhető meg a menetdinamikai fogyasztás és a teljes jármű fogyasztásában. Ennek megfelelően a hőmérséklet és az utasterhelés a leginkább befolyásoló tényező. Az *B* esetben a különbség nem jelentős, mivel a magasságkülönbség

8. táblázat: Esetek energiafogyasztása és eltérése a számított energiaigénytől

Eset	Esetleírás (Elemzett befolyásoló tényező)	Fogyasztás - hajtás [kWh]	Fogyasztás - teljes [kWh]	$\Delta_{\text{hajtás}}$	Δ_{teljes}
0	Számított	13,73	21,06	bázisérték	bázisérték
M	Mért	13,74	20,53	0,06%	-2,53%
A	Hőmérséklet: 20°C (környezeti hőmérséklet)	13,87	15,82	1,00%	-24,91%
B	Nincs magasságkülönbség (domborzat)	13,74	21,07	0,052%	0,03%
C	Nincs megálló (megállóhely-távolság)	8,24	13,74	-38,66%	-25,21%
D	Nincs utas a buszon (utasterhelés)	12,57	17,04	-8,49%	-17,02%

a teljes buszvonalon mindössze 12 méter. A C esetben a fogyasztás lényegesen kevesebb, akár 38-40%-kal. Az érzékenységvizsgálat eredménye alapján megállapítottuk, hogy a hajtás fogyasztása a figyelembe vett tényezőktől függetlenül szinte állandó; csak az utasterhelésnek van jelentős befolyása. Emellett megfigyeltük, hogy a segédrendszerek fogyasztását, így a teljes fogyasztást jelentősen befolyásolja a környezeti hőmérséklet és az utasterhelés. Ezért a környezeti hőmérséklet és az utasterhelési tényezők meghatározó független változók. Az enyhe eltérés ellenére a megállóhely-távolság független értéknek tekinthető számos korábbi kutatás alapján (2018) [12, 13, 14]. Az eredmények nem igazolják a domborzat függetlenségét, mivel a vizsgált terület sík, de a fogyasztás domborzati függősége elkerülhetetlen [14, 16, 17, 18].

Végző soron megállapítható, hogy a kidolgozott módszer alkalmazásával a tervezés és a döntéshozatal egyszerűbb és olcsóbb adathiányos környezetben, különösen az elektromos akkumulátoros autóbuszok bevezetésének kezdeti szakaszában.

6. ÖSSZEGZÉS

Kutatásunk fő eredménye az elektromos autóbusz fogyasztását becsülő számítási módszer. A módszer újdonsága, hogy az energiafogyasztás

a teljes járműdinamika és az energiafogyasztók teljesítménye alapján becsüli, valós mért fogyasztási adatok felhasználása nélkül.

A módszert esettanulmány során validáltuk. A számított és mért adatok alapján megállapítottuk, hogy a módszer alkalmazásával a jármű fogyasztása 5-6%-os pontossággal előre jelezhető az adott vonalon, ha ismert az adott időszakra vonatkozó átlagos utasterhelés és a külső hőmérséklet. Ennek megfelelően a módszer adathiányos és tapasztalatlan környezetben is használható a járművásárlási döntések elősegítésére; az adott vonalon közlekedő járművek minimálisan teljesítendő teljesítménymutatói pontosan meghatározhatók, a fordatervezés pontosítható. Az adatok elemzésével megállapítottuk, hogy az alacsony hőmérséklet és a nagyobb megállóhely-távolság jóval nagyobb fogyasztást eredményez, míg az utasterhelés változása ugyan kevésbé, de azért jelentősen befolyásolja a fogyasztást.

A befolyásoló tényezőket általános értelemben, előzetes kalkulációhoz vettük figyelembe. A jövőben célunk a modell továbbfejlesztése a forgalmi torlódások és az utazási sebesség figyelembevételével. Az alkalmazott korlátozások megszüntetésével a modell komplexitása fokozható. Továbbá számításba vehetők a járműdinamika egyenetlenségei, és vizsgálhatók

a vezetési stílusok közötti fogyasztásbeli különbségek. Hasonló számítás végezhető más alternatív meghajtású (pl. hidrogénüzemű) járművekre is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak az Ebusco B.V.-nek az esettanulmány során használt mérési adatok rendelkezésre bocsátásért és felhasználásának engedélyezésért.

RÖVIDÍTÉSEK, JELÖLÉSEK

Jelölés	Jelentés
a	jármű gyorsulása [m/s^2]
acc	gyorsítási fázis
$BTMS$	akkumulátor hőszabályzó rendszere - Battery Thermal Management System
c_f	légellenállás tényező
$cruise$	sebességtartási szakasz
dec	lassítási fázis
$E_{air,xyz}$	légellenállási energia x szakasz y részzszakaszán a z fázisban [J] [kWh]
E_{TOTAL}	teljes menet során elfogyasztott összes energia [J] [kWh]
E_{AUX}	menet során a segédüzem által elfogyasztott összes energia [J] [kWh]
E_{DRIVE}	menet során a hajtáslánc által elfogyasztott összes energia [J] [kWh]
$E_{kin,xyz}$	mozgási energiakülönbség x szakasz y részzszakaszán a z fázisban [J] [kWh]
$E_{pot,xyz}$	helyzeti energiakülönbség x szakasz y részzszakaszán a z fázisban [J] [kWh]
$E_{roll,xyz}$	gördülési ellenállási energia x szakasz y részzszakaszán a z fázisban [J] [kWh]
F_a	gyorsító erő [N]
F_f	légellenállási (fluid) erő [N]
F_r	gördülési ellenálláserő [N]
F_s	emelkedési ellenálláserő (emelkedőn való mozgás során) [N]
F_v	vonóerő [N]
g	nehézségi gyorsulás [m/s^2]

Jelölés	Jelentés
$HVAC$	fűtő, szellőztető és légkondicionáló rendszer - Heating, Ventilation and Air-Conditioning system
i	autóbuszmegálló $i=0\dots l, i \in \mathbb{N}$
i_{im}	az erőátviteli rendszer teljes áttétele
ISA	nemzetközi légköri szabvány - International Standard Atmosphere
j	határpont egy szakaszon belül $j=0\dots o, j \in \mathbb{N}$
k	határoló $k=0\dots n, k \in \mathbb{N}$
l	vonal utolsó megállója (végállomás), utolsó szakasza
o	szakasz utolsó gócpontja, utolsó részzszakasz egy szakaszon belül
m_{pass}	átlagos utastömeg [kg]
m_0	jármű üresjáratú tömege [kg]
m	jármű össztömege [kg]
p	autóbuszon lévő utasok száma
q	egyes energiafogyasztók jelölése
P_{AUX}	segédüzem átlagos teljesítményigénye az autóbuszvonalon [W]
$P_{aux,q}$	q segédüzemi fogyasztó teljesítményigénye [W]
P_{BTMS}	akkumulátor hőszabályzó rendszerének teljesítményigénye [W]
P_{comp}	légkompresszor teljesítményigénye [W]
P_{doors}	ajtók nyitásának/zárásának teljesítményigénye [W]
P_{EPS}	szervokormány teljesítményigénye [W]
P_{HVAC}	fűtő, szellőztető és légkondicionáló rendszer teljesítményigénye [W]
P_{other}	egyéb energiafogyasztók teljesítményigénye [W]
$P_{parking}$	rögzítőfék teljesítményigénye [W]
P_{wiper}	ablaktörlő rendszer teljesítményigénye [W]
r_w	autóbusz kerekeinek sugara [m]
RPM	percenkénti fordulat [1/min]
s_{xyz}	x szakasz y részzszakaszán a z fázisban megtett távolság [m]
t	idő [s]
T	külső hőmérséklet [$^{\circ}C$]
t_{trip}	teljes utazási idő (menetidő) [s]
v	járműsebesség [km/h] [m/s]

Jelölés	Jelentés
x	szakasz ($x=0\dots l, x \in \mathbb{N}$)
y	részszakasz ($y=0\dots m, y \in \mathbb{N}$)
z	fázis ($z=\{\text{acc, cruise, dec}\}$)
α_{xy}	y részszakasz dőlésszöge [°]
$\Delta h_{v,xy}$	y részszakasz magasságkülönbsége [m]
$\Delta V_{v,xy}$	eltérés a lehetséges megengedett járműsebességek között az y részszakaszon [m/s]
η_b	akkumulátor hatásfoka
$\eta_{backward}$	visszaáramló energia hatásfoka a hajtásláncban
η_{drive}	hajtáslánc hatásfoka az akkumulátortól a kerekekig
$\eta_{forward}$	előremenő energia hatásfoka a hajtásláncban
η_{inv}	motor inverter hatásfoka
η_m	elektromos motor hatásfoka
η_{pc}	áramátalakító hatásfoka
η_{recup}	energia-visszanyerés hatásfoka
η_{tm}	átviteli rendszer hatásfoka
$\eta_{w\acute{e}ch}$	kerekek és a felfüggesztési rendszer hatásfoka
θ	gyorsítási ellenállási tényező
μ_r	gördülési ellenállási együtthatója
ρ	levegő sűrűsége [kg/m ³]

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Borén, S., 2019. Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1–16. DOI: <https://doi.org/gh79d5>
- [2] Kang, H., 2007. An analysis of hybrid-electric vehicles as the car of the future, Doktori disszertáció - Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
- [3] Laib, F., Braun, A., & Rid, W., 2019. Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany. *Transportation Research Procedia*, 37, 377–384. DOI: <https://doi.org/gf8zjf>
- [4] Poojitganont, T., Antoshkiv, O., Watjatrakul, B., & Berg, H. P., 2020. Efficiency and emission simulations of hydrogen-fuel city buses. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 886, 012025. DOI: <https://doi.org/jrsm>
- [5] C40 mayors air quality commitment 2016. C40 Mayors Summit in Mexico City
- [6] Lajunen, A., 2014. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses, *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, 38, pp. 1–15. DOI: <https://doi.org/f5sz4r>
- [7] Potkány, M., Hlatká, M., Debnár, M., & Hanzl, J., 2018. Comparison of the lifecycle cost structure of electric and diesel buses. *Nase More*, 65(4), 270–275. DOI: <https://doi.org/jrsn>
- [8] Quarles, N., Kockelman, K. M., & Mohamed, M., 2020. Costs and benefits of electrifying and automating bus transit fleets. *Sustainability*, 12(10), 3977. DOI: <https://doi.org/gpx6fr>
- [9] Sheth, A., & Sarkar, D., 2019a. Life cycle cost analysis for electric vs. Diesel bus transit in an Indian scenario. *International Journal of Technology*, 10(1), 105. DOI: <https://doi.org/gmj3jn>
- [10] Szilassy, P. Á., Jenőfi, B. and Földes, D. 2022. Marginal energy consumption cost factors of battery electric buses, *Smart City Symposium Prague (SCSP) 2022*, DOI: <https://doi.org/jrjsp>
- [11] Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E., & Emadi, A., 2004. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC Press. DOI: <https://doi.org/dkjc8q>
- [12] 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.
- [13] Vepsäläinen, J., Ritari, A., Lajunen, A., Kivekäs, K., & Tammi, K., 2018. Energy uncertainty analysis of electric buses. *Energies*, 11(12), 3267. DOI: <https://doi.org/jrsr>
- [14] Fernandes H., 2018. Electric bus performance evaluation in real world use conditions, Doktori disszertáció, University of Lisbon, link: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043836122/ExtendedAbstract_76209.pdf

- [15] Marshall, G. J., Mahony, C. P., Rhodes, M. J., Daniewicz, S. R., Tsolas, N., & Thompson, S. M., 2019. Thermal management of vehicle cabins, external surfaces, and onboard electronics: An overview. *Engineering* (Beijing, China), 5(5), 954–969. DOI: <https://doi.org/gg3x2f>
- [16] Li, L., & Liu, Q., 2019. Acceleration curve optimization for electric vehicle based on energy consumption and battery life. *Energy* (Oxford, England), 169, 1039–1053. DOI: <https://doi.org/gjp5b5>
- [17] 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. DOI: <https://doi.org/jr3s>
- [18] 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. DOI: <https://doi.org/jrst>
- [19] Kirchner, M., Schubert, P., & Haas, C. T., 2014. Characterisation of real-world bus acceleration and deceleration signals. *Journal of Signal and Information Processing*, 05(01), 8–13. DOI: <https://doi.org/jrsv>
- [20] 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. DOI: <https://doi.org/jrsw>
- [21] 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. DOI: <https://doi.org/gn3767>
- [22] 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. DOI: <https://doi.org/gfdw5f>
- [23] Beckers, C. J. J., Besselink, I. J. M., Frints, J. J. M., & Nijmeijer, H., 2019. Energy consumption prediction for electric city buses. Paper presented at 13th ITS Europe-an Congres, Eindhoven, Netherlands
- [24] Bartłomiejczyk, M., & Kołacz, R., 2020. The reduction of auxiliaries power demand: The challenge for electromobility in public transportation. *Journal of Cleaner Production*, 252(119776), 119776. DOI: <https://doi.org/gmqdp3>
- [25] Csonka, B., 2021. Optimization of Static and Dynamic Charging Infrastructure for Electric Buses. *Energies*, 14(12), 3516. DOI: <https://doi.org/jr3x>
- [26] Lindh, P., Petrov, I., Pyrhonen, J., Niemela, M., Immonen, P., & Scherman, E., 2018. Direct liquid cooling method verified with a permanent-magnet traction motor in a bus. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- [27] Nandi, A. K., Mondal, S., & Khanra, M., 2021. Modelling of electric vehicle drive toward its range prediction and remaining battery SOC after trip completion. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 13(2), 145. DOI: <https://doi.org/jr3z>
- [28] Braess, H.-H., & Seiffert, U., Eds., 2013. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik* (7th ed.). Springer Fachmedien.
- [29] Tretsiak, D., Häberlein, T., & Bäker, B., 2016. Energy efficient control of the air compressor in a serial hybrid bus based on smart data. *IFAC-PapersOnLine*, 49(11), 385–392. DOI: <https://doi.org/jrs2>
- [30] Mio, T., Komatsubara, Y., Ohmi, N., Kimoto, Y., Iizuka, K., Suganuma, T., Maruyama, S., Sugiyama, T., Sato, F., Shinoda, S., Hibino, T., & Nishi, K., 2019. Auxiliary power supply system for electric power steering (EPS) and high-heat-resistant lithium-ion capacitor. *World Electric Vehicle Journal*, 10(2), 27. DOI: <https://doi.org/jrs3>
- [31] Andersson, Ch., 2004. On auxiliary systems in commercial vehicles, Doktori disszertáció, Lund University, link: <https://www.iea.lth.se/publications/theses/lth-iea-1039.pdf>
- [32] Fischer, M., Werber, M., & Schwartz, P. V., 2009. Batteries: Higher energy density than gasoline? *Energy Policy*, 37(7), 2639–2641. DOI: <https://doi.org/fj6m44>
- [33] Boudhrioua, S., & Sipos, T., 2022. Dwell time analysis and priority granting for bus service in Budapest. *Periodica Polytechnica*

- Transportation Engineering. DOI: <https://doi.org/jrs4>
- [34] Hawas, Y., 2013. Simulation-based regression models to estimate bus routes and network travel times. *Journal of Public Transportation*, 16(4), 107–130. DOI: <https://doi.org/jrs5>
- [35] Borén, S., 2019. Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1–16. DOI: <https://doi.org/gh79d5>
- [36] Dirks, N., Schiffer, M. and Walther, G., 2022. "On the integration of battery electric buses into urban bus networks," *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, 139(103628), p. 103628. DOI: <https://doi.org/jrs6>
- [37] Edwardes, W., & Rakha, H., 2015. Modeling diesel and hybrid bus fuel consumption with Virginia Tech comprehensive power-based fuel consumption model: Model enhancements and calibration issues: Model enhancements and calibration issues. *Transportation Research Record*, 2533(1), 100–108. DOI: <https://doi.org/jrs7>
- [38] García, A., Monsalve-Serrano, J., Lago Sari, R., & Tripathi, S., 2022. Life cycle CO₂ footprint reduction comparison of hybrid and electric buses for bus transit networks. *Applied Energy*, 308(118354), 118354. DOI: <https://doi.org/jrs8>
- [39] Kang, H., 2008. An analysis of hybrid-electric vehicles as the car of the future, BSc szakdolgozat, Massachusetts Institute of Technology, link: <http://electric-vehicles.info/library/these/these029.pdf>
- [40] Lee, J., Shon, H., Papakonstantinou, I., & Son, S., 2021. Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 100(103066), DOI: <https://doi.org/jrs9>
- [41] Muratori, M., Alexander, M., Arent, D., Bazilian, M., Cazzola, P., Dede, E. M., Farrell, J., Gearhart, C., Greene, D., Jenn, A., Keyser, M., Lipman, T., Narumanchi, S., Pesaran, A., Sioshansi, R., Suomalainen, E., Tal, G., Walkowicz, K., & Ward, J., 2021. The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. *Progress in Energy*, 3(2), 022002. DOI: <https://doi.org/gpcngz>
- [42] Oliva, J. A., Weihrauch, C., & Bertram, T., 2013. Model-based remaining driving range prediction in electric vehicles by using particle filtering and Markov chains. *World Electric Vehicle Journal*, 6(1), 204–213. DOI: <https://doi.org/jrtb>
- [43] Qiu, Q., Li, J., & Yu, H., 2013. Operational planning of electric bus considering battery state of charge. In *LTLGB 2012* (pp. 243–249). Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/jrtc>
- [44] Sheth, A., & Sarkar, D., 2019a. Life cycle cost analysis for electric vs. Diesel bus transit in an Indian scenario. *International Journal of Technology*, 10(1), 105. DOI: <https://doi.org/gmj3jn>
- [45] Vepsäläinen, J., 2017. Driving style comparison of city buses: Electric vs. Diesel. 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). DOI: <https://doi.org/jrtd>
- [46] ZeEUS, 2017. ZeEus ebus report #2. URL: <https://zeEus.eu/uploads/publications/documents/zeEus-ebus-report-2.pdf>, (Utolsó elérés: 2022. július).
- [47] Közúti Rendelkezések Egységes Szabályozása (KRESZ) - 46. § Személyszállítás



Consumption estimation of battery electric buses considering line characteristics and temperature

The battery electric buses (BEB) have a shorter range than diesel buses, thus they are not always able to perform the all precribed distance during a day. The bus turnaround planning and bus procurement decisions can also be supported by pre-determining the energy demand of the lines. In the course of the research, we developed an energy-based consumption estimation method that also takes into account the uncertainties influencing consumption (ambient temperature, topography, stopping distance, passenger load). The novelty of the method is that instead of the current consumption data, it takes into account the dynamic energy consumption of the vehicle and the performance of other energy consumers (eg cooling-heating system, air compressor). The method was used and validated in a case study. The minimum energy consumption is determined taking into account the largest consumers. We found that the estimated data correlated with the measured data, they show a deviation of 5% from the measured data.



Verbrauchsabschätzung von batterieelektrischen Bussen unter Berücksichtigung von Streckencharakteristik und Temperatur

Die Batterie-Elektrobusse haben eine geringere Reichweite als Dieselbusse, daher können sie nicht immer alle vorgeschriebenen Distanz während eines Tages fahren. Für die Planung des Busfahrplanes und für die Busbeschaffungsentscheidungen können auch durch die Vorabbestimmung des Energiebedarfs der Linien unterstützt werden. Im Zuge der Forschung haben wir ein energiebasiertes Verbrauchsschätzungsverfahren entwickelt, das auch die den Verbrauch beeinflussenden Unsicherheiten (Umgebungstemperatur, Topographie, Entfernung den Stationen, Passagierauslastung) berücksichtigt. Die Neuheit an der Methode ist, dass statt der aktuellen Verbrauchsdaten der dynamische Energieverbrauch des Fahrzeugs und die Leistung anderer Energieverbraucher (z. B. Kühl-Heizsystem, Luftkompressor) berücksichtigt werden. Die Methode wurde in einer Fallstudie angewendet und validiert. Der Mindestenergieverbrauch wird unter Berücksichtigung der größten Verbraucher ermittelt. Wir haben festgestellt, dass die berechnete Daten mit den gemessenen Daten korrelieren, sie zeigen eine Abweichung von 5% von den gemessenen Daten.