



FELVÉTELI PONT OPTIMALIZÁLÓ MÓDSZER IGÉNYALAPÚ ISKOLABUSZ SZOLGÁLTATÁSHOZ

Korompay Márton

*Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
PhD hallgató, korompaymarton@edu.bme.hu*

Dr. Földes Dávid

*Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Tudományos munkatárs, foldes.david@kjk.bme.hu*

Absztrakt

Az iskolabusz-szolgáltatások hatékony és biztonságos működéséhez elengedhetetlen a felvételi pontok jól megtervezett elhelyezése, különösen az olyan sérülékeny felhasználói csoportok esetében, mint a gyermekek. A közösségi közlekedési rendszerekkel szemben az igényalapú iskolabusz-modell lehetőséget kínál arra, hogy a felhasználókhöz közelebb eső, igényeikhez jobban illesztett felvételi pontok révén csökkentse a szükséges gyaloglási távolságot, és ezáltal növelje a szolgáltatás biztonságát és vonzerejét. Kutatásunk célja egy olyan módszertan kidolgozása volt, amely optimalizálja a felvételi pontok elhelyezését a keresleti pontok (diákok lakóhelyei) alapján, figyelembe véve a maximálisan elfogadható gyaloglási távolságot.

A módszer alapja a keresleti pontok klaszterezésén alapuló térbeli csoportosítás, amely során olyan keresleti egységek jönnek létre, amelyekben minden pont szomszédos egymással. A klaszterezési folyamat során távolságmátrixot képeztünk, amely a valós úthálózaton számított keresleti pontok közötti távolságokat tartalmazza. Két pont szomszédos egymással, ha a köztük lévő távolság nem haladja meg az elfogadható gyaloglási távolság kétszeresét. Valamennyi keresleti egységhez egyértelműen hozzárendelhetők a felvételi pontok. A kijelölt felvételi pontok célja a keresleti pontoktól való össztávolság minimalizálása úgy, hogy egyik reláció esetében sem lépje kiugróan túl az előzetesen meghatározott elfogadható gyaloglási távolságot.

A módszert Szentendre városában validáltuk, ahol az önkormányzat által rendelkezésre bocsátott 170 keresleti pont alapján került sor a felvételi pontok kijelölésére. A vizsgálat során 360 méteres elfogadható gyaloglási távolsággal számoltunk, amelynek kétszerese (720 méter) határozta meg a klaszterképzési feltételt. Az eredmények alapján 48 felvételi pont elegendő a teljes kereslet kiszolgálására amellet, hogy az átlagos gyaloglási távolság mindössze 240 méter. Egy-egy felvételi pont átlagosan 3,5 keresleti pontot szolgált ki, ami működési hatékonyság, és ezáltal fenntarthatósági szempontból kedvezőnek tekinthető.

A hagyományos közösségi közlekedési megállók eléréséhez szükséges gyaloglási távolság ebben a térségben átlagosan 425 méter volt. Az általunk javasolt megközelítés tehát nemcsak csökkenti a gyaloglási terheket, hanem egyben lehetőséget ad egy olyan, rugalmasan szervezett iskolabusz-rendszer kialakítására is, amely jobban illeszkedik a helyi igényekhez és hozzájárul az inkluzív, biztonságos közlekedésfejlesztéshez. A modell adaptálható más településekre is, és alapjául szolgálhat jövőbeni hálózattervezési és mobilitásfejlesztési programoknak.

Kulcsszavak: igényalapú közlekedés, kijelölési feladat, felvételi pontok, gyaloglási távolság, klaszteranalízis





1. Bevezetés

A ritkábban lakott kertvárosi, vidéki térségek közlekedésének kiszolgálása napjaink egyik legösszetettebb közlekedésszervezési kihívása. A hagyományos, fix útvonalon és menetrend szerint közlekedő közösségi közlekedési rendszerek gyakran nem képesek alkalmazkodni a szórt keresleti mintákhoz és az alacsony utasszámhoz, így gazdaságtalanul működnek [1], miközben a szolgáltatás minősége és elérhetősége is alacsony [2]. A járatok ritkán követik egymást, korlátozott az üzemidő, és gyakori, hogy a járművek számára nem áll rendelkezésre megfelelő úthálózati infrastruktúra, a szűk, belső utcákkal rendelkező településrészekben a mozgási lehetőségek korlátozottak. Mindez hozzájárul ahhoz, hogy ezekben a térségekben a személygépkocsi-használat válik domináns közlekedési formává – még akkor is, ha ez környezeti, társadalmi vagy családi szinten nem minden esetben indokolt vagy fenntartható.

E kihívásokra válaszul számos európai országban – illeszkedve az EU közlekedéspolitikai céljaihoz – egyre nagyobb teret nyernek az igényalapú közlekedési rendszerek (angol szakirodalomban: demand-responsive transport vagy DRT). Ezek a szolgáltatások kisméretű autóbusszokkal üzemelnek, és rugalmas útvonal- vagy indulási rendszerrel működnek, igazodva az igényekhez [3]. Számos esettanulmány bizonyította, hogy ezek a rendszerek javítják a szolgáltatási színvonalat, csökkentik a környezeti terhelést [4], és egyaránt kedvező hatást gyakorolnak az utasok, a szolgáltatók és a társadalom számára is [5]. Különösen előnyösek lehetnek azokban az esetekben, amikor egy adott célpont (például iskola, kórház, munkahelyi zóna stb.) fix, míg a kiindulási pontok térben szétszórta. Ilyen esetekben a „sokból-egybe” (many-to-one) típusú DRT-rendszerek hatékonyan alkalmazhatók [6], [7].

A sikeres működés egyik kulcseleme a felvételi pontok megfelelő elhelyezése. A felvételi pontok térbeli allokációja meghatározza a járatok gyalogosan elérhető vonzáskörzetét, befolyásolja a szolgáltatás igénybevételeének kényelmét, az utazási időt és a járművek útvonalának hatékonyságát is [8]. A túlságosan ritka elhelyezés hosszú gyaloglási távolságot, így alacsony hozzáférhetőséget eredményez, míg a túlzottan sűrű hálózat megnöveli a járműfutásokat és az üzemeltetési költségeket, ráadásul a menetidő is meghosszabbodhat [9].

A jelenlegi gyakorlatban a felvételi pontokat jellemzően gyakorlati szempontok alapján (például iskolák, orvosi rendelők, főterek közelében) jelölik ki, azonban ezek sokszor nem támaszkodnak valós keresleti adatokra. Az elméleti és gyakorlati kutatásokban egyre nagyobb figyelem irányul a keresletalapú pontelhelyezési módszerekre, különösen ott, ahol a szolgáltatás célja egy szűk felhasználói csoport (pl. diákok) rendszeres kiszolgálása.

Kutatásunk célja felvételi pont elhelyezési módszer kidolgozása volt, amely figyelembe veszi a valós keresleti pontok elhelyezkedését és az elfogadható gyaloglási távolságot. A módszert hálózattervezési szemlélettel alakítottuk ki, különös figyelemmel a „sokból-egybe” típusú, iskolabusz-szolgáltatások igényeire. A módszer hasznosságát és gyakorlati alkalmazhatóságát egy esettanulmány keretében Szentendre városában vizsgáltuk, ahol önkormányzati adatbázis alapján 170 keresleti pont elhelyezkedését elemeztük, és ezek alapján optimalizáltuk a felvételi pontok számát és elhelyezését.

2. Irodalmi áttekintés

A felvételi pontok térbeli elhelyezésének kérdése alapvető jelentőségű a közlekedési szolgáltatások elérhetősége és hatékonysága szempontjából, különösen igényalapú rendszerek esetében. Ennek ellenére a vonatkozó szakirodalomban a problémakör gyakran csak járulékos elemként jelenik meg, leggyakrabban az útvonaltervezés részeként [10]. Korábbi kutatások gyakran rögzített megállóhalmazzal dolgoztak, és erre építve optimalizálták az útvonalakat [11]. Jelen tanulmányban a *gyaloglási távolságra és a keresleti pontok helyzetére* helyezzük a hangsúlyt.





Az 1. táblázat összefoglalja néhány releváns tanulmány főbb jellemzőit abból a szempontból, hogy azok figyelembe vették-e a gyaloglási távolság korlátozását, illetve alkalmaztak-e optimalizáló vagy klaszterező algoritmust a felvételi pontok meghatározására.

1. táblázat – Felvételi pont kijelölési módszerek

Forrás	Szerző(k)	Év	Szolgáltatás típusa	Alkalmazott módszer	Gyaloglási távolság	Keresleti pontok
[12]	Sarubbi et al.	2016	Iskolabusz	Heurisztikus algoritmus	✓	✓
[6]	Ren et al.	2019	Iskolabusz	Iteratív klaszterezés	✓	✓
[7]	Sciortino et al.	2021	Iskolabusz	Legközelebbi szomszéd heurisztika	✓	
[13]	Taplin és Sun	2020	DRT	Genetikus algoritmus	✓	✓
[8]	Zhang et al.	2020	DRT	Dinamikus programozás	✓	
[14]	Liu és Ouyang	2021	DRT	Sztochasztikus modell	✓	✓
[15]	Schlüter et al.	2021	DRT	Szenárióelemzés, esettanulmány		✓
[5]	Sörensen et al.	2021	DRT	Politikai és társadalmi értékelés		✓
[16]	Shu et al.	2013	DRT	Megállósám-érzékenységi modell	✓	
[9]	Jevinger és Svensson	2024	DRT	Komfort- és menetidő-elemzés	✓	

A közösségi közlekedés igénybevétele során számos tanulmány vizsgálta gyaloglási távolság szerepét. Általánosan elfogadott, hogy a hosszúra nyúló gyaloglás jelentősen csökkenti a tömegközlekedés vonzerejét, különösen az idősek vagy mozgásukban korlátozott utasok esetében [17]. Az idősebb felnőttek gyakran már 200-300 méter megtétele után is erőfeszítésként élik meg a gyaloglást, és a távolságot hajlamosak eltúlzottan érzékelni [18]. Általánosságban a nemzetközi gyakorlatban 400-500 métert szoktak az elfogadható gyaloglás felső határának tekinteni egy átlagos városi autóbusz-megálló esetében [19]. Természetesen ez a helyi domborzati, infrastrukturális és biztonsági tényezőktől is függ: Norvégiában egy felmérés rámutatott, hogy a kisebb városokban az emberek kevésbé hajlandók hosszabb távolságokat gyalogolni a megállókhoz, mint a nagyvárosokban [20]. Az olyan speciális csoportoknál, mint a gyermekek, a biztonság és a felügyelet igénye miatt általában még kisebb maximális gyaloglási távolságot indokolt meghatározni (például 300-400 métert) [10].

Számos kutatás tárgyalja a megállók optimális elhelyezésének módszereit. Már az 1970-es években felvetették a lefedettségi modellek alkalmazását az autóbusz-megállók kiválasztására [21]. Azóta a problémát többféle modellezési és algoritmikus megközelítéssel vizsgálták. A közelmúltban több kutatás is heurisztikus, metaheurisztikus algoritmusokat javasolt az autóbusz-megállók vagy felszállópontok, illetve az útvonalak optimalizálására az igényvezérelt rendszerekben.

- Genetikus algoritmussal keresték egy lakóövezet kiszolgáló ráhordó autóbuszjárat optimális megállóhelyeit és útvonalát [13].
- Dinamikus programozási modellel dolgoztak ki az igényalapú autóbusz-megállók optimális távolságának meghatározására [8].





- Sztochasztikus modellt vezettek fel, amely egyszerre hangolja össze a hagyományos gerinchálózatot és az arra ráhordó DRT-szolgáltatást, meghatározva ez utóbbi optimális megállóit is [14].

Az iskolabusz-problémában is születtek célzott megoldások.

- Heurisztikus klaszterezéssel csoportosították a tanulókat, minimalizálva a szükséges megállók számát [12].
- Kétlépcsős, iteratív klaszterezési algoritmussal egyidejűleg optimalizálták a megállóhelyeket és útvonalakat a gyaloglási korlát figyelembevételével [6].
- Legközelebbi szomszéd alapú heurisztika alkalmazásával a lehetséges megállóhelyek közül választották ki az útvonalakba illeszthető megállókat [7].

Ugyanakkor léteznek olyan megközelítések is, amelyek nem konkrét algoritmussal tervezik a megállókat, hanem forgatókönyv-elemzéssel vagy szakpolitikai értékeléssel vizsgálják az igényvezérelt rendszereket. Német vidéki térségben szimulációs változatok alapján elemezték egy autonóm járművekkel megvalósított DRT-rendszer lehetséges hatásait [15], továbbá skandináv esettanulmányokban értékelték a vidéki igényalapú mobilitási szolgáltatások társadalmi hasznosságát [5].

A szakirodalmi kutatás egyértelműen alátámasztja, hogy a gyaloglási távolság kulcsszerepet játszik a szolgáltatás használatának valószínűségében, különösen idősebb vagy mozgásukban korlátozott felhasználók esetében [18]. Emellett több kutatás kiemeli, hogy a felvételi pontok számának túlzott növelése nem eredményez arányos szolgáltatásjavulást, sőt, megnövekedett menetidőt és üzemeltetési költségeket vonhat maga után [9]. A megfelelő sűrűségű, de jól elhelyezett felvételi pontok kijelölése tehát kulcsfontosságú az optimális működés, ugyanakkor vonzó szolgáltatás eléréséhez.

A korábbi kutatások megerősítik, hogy a gyaloglási távolság minimalizálása kulcsfontosságú az utasok megnyerése szempontjából, de önmagában nem garantálja a rendszer hatékonyságát. Integrált megközelítésre van szükség, amely a felhasználók térbeli eloszlását és a szolgáltatás működési paramétereit egyaránt figyelembe veszi. Kutatások foglalkoznak az új mobilitási technológiák (például önvezető járművek) által igényelt fel- és leszállóhelyek optimális elhelyezésével is. A paraméteralapú lokalizációs módszer során figyelembe vették a gyaloglási hajlandóságon kívül a jármű-kihasználtságot az infrastruktúra állapotát és elérhetőségét [22]. Az inkluzív és fenntartható mobilitás tervezésében a gyalogos megközelíthetőség javítása alapvető fontosságú [23], és a rugalmas rendszerek a társadalmi esélyegyenlőség szempontjából is ígéretesek. Bizonyos kutatások megállapították, hogy az igényalapú szolgáltatások a munkalehetőségek elérését is javíthatják [24].

A teljesebb kép érdekében nem csupán az igényalapú közlekedési rendszerekhez kapcsolódó szakirodalmat tekintettük át, hanem más megosztott mobilitási formák (autómegosztás, kerékpármegosztás, e-roller szolgáltatások) releváns kutatásait is. Számos tanulmány alkalmaz helykeresési és lefedettségi modelleket a megosztott rendszerek tervezésére. Kiemelt cél a potenciális kereslet minél jobb lefedésének elérése egy megadott gyaloglási küszöbtávolságon belül. Például a kerékpármegosztó állomások elhelyezését gyakran GIS-alapú térbeli elemzéssel optimalizálják, figyelembe véve a lakóhelyek és munkahelyek elhelyezkedését [25], vagy maximális lefedettségi modellekkel határozzák meg az optimális állomásszámot és helyeket [26]. Az utazásmegosztáson alapuló személyszállítás terén is megjelenik a gyaloglási távolság és az utazási idő kompromisszuma: kutatások kimutatták, hogy ha az utasok hajlandók egy rövid távolságot gyalogolni egy előre egyeztetett találkozási pontig, az jelentősen növelheti az utak hatékonyságát; például a telekocsi rendszerekben az utasok rövid (5 percnél nem hosszabb) sétája egy köztes találkozóhelyre drasztikusan növelheti a megosztható utazások számát és csökkenti a kerülőket [27]. Hasonló optimalizálási szempontok merülnek fel az autómegosztásnál is, ahol a megosztott járművek gyűjtőállomásait a várható igények alapján célszerű meghatározni [28].





Bár a gyaloglási távolság és a keresleti pontok térbeli eloszlása számos tanulmányban megjelenik, ezek együttes és rendszerezett figyelembevétele kevésbé kutatott terület különösen az iskolabusz-szolgáltatások sajátos igényeire szabottan. Jelen tanulmány célja éppen ennek a módszertani hiánynak a pótlása: olyan adatalapú felvételi pont kijelölő eljárás bemutatása, amely a valós keresleti pontokhoz igazodik, miközben a felhasználók gyaloglási távolságát is minimalizálja.

3. Módszertan

A módszer során egy előre megadott keresleti ponthalmaz és az elfogadható gyaloglási távolság alapján jelöltük ki a felszállópontokat. A módszer lépései: távolságmátrix meghatározása, keresleti egységek képzése és végül a felvételi pontok elhelyezése.

3.1. Távolságmátrix meghatározása

A keresleti pontok koordinátái alapján meghatározhatók a valós úthálózaton vett távolságok, illetve egy szimmetrikus távolságmátrixba rendezhetők, ahol a sorfejlécek és oszlopfejlécek a keresleti pontok, a mátrix celláiban pedig a két pont közötti távolság értéke szerepel. Ez a mátrix képezi az összes későbbi csoportosítási és optimalizálási lépés alapját.

3.2. Keresleti egységek képzése

A keresleti pontokat a szomszédossági viszony alapján keresleti csoportokba, majd keresleti egységekbe rendezzük. Két keresleti pont szomszédos, ha a közöttük lévő távolság kisebb, mint az elfogadható gyaloglási távolság ($d_{\text{elfogadható}}$) kétszerese. Ez biztosítja, hogy létezzen olyan elméleti felvételi pont, amely mindkét ponttól legfeljebb $d_{\text{elfogadható}}$ távolságra helyezkedik el. Ezen logika alapján az alábbi fogalmakat vezettük be.

- **Keresleti csoport:** olyan ponthalmaz, ahol mindent pont szomszédos legalább egy másik ponttal a csoporton belül (~összetett gráf).
- **Keresleti egység:** olyan ponthalmaz, ahol minden pont szomszédos minden más ponttal az egységen belül (~teljes gráf).

Algoritmus: keresleti csoportok és keresleti egységek létrehozása	
Bemenet:	Keresleti pontok halmaza $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$
Kimenet:	Keresleti csoportok halmaza $G = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$, ahol minden G_k keresleti egységek halmazát tartalmazza: $E_k = \{E_{k,1}, E_{k,2}, \dots, E_{k,j_k}\}$
1:	$G = \emptyset$; $P = D$
2:	amíg P nem üres:
3:	válassz egy véletlen $d \in P$
4:	hozz létre új keresleti csoportot $G_k = \{d\}$
5:	$P = P \setminus \{d\}$
6:	amíg $\exists d_i \in G_k$ és $d_j \in P$, ahol d_i és d_j szomszédos:
7:	$G_k = G_k \cup \{d_j\}$, $P = P \setminus \{d_j\}$
8:	$G = G \cup \{G_k\}$
9:	minden $G_k \in G$ esetén:
10:	$E_k = \emptyset$; $Q = G_k$
11:	amíg $Q \neq \emptyset$:
12:	válassz $d \in Q$
13:	hozz létre új keresleti egységet $E_{k,i} = \{d\}$
14:	$Q = Q \setminus \{d\}$
15:	amíg $\exists d_j \in Q$, ahol d_j szomszédos minden taggal $E_{k,i}$ -ben:
16:	$E_{k,i} = E_{k,i} \cup \{d_j\}$, $Q = Q \setminus \{d_j\}$
17:	$E_k = E_k \cup \{E_{k,i}\}$



A fenti logika szerint minden keresleti pont pontosan egy keresleti csoporthoz és azon belül egy keresleti egységhez tartozik. A felvételi pontok száma megegyezik az egységek számával.

3.3. lépés: Felvételi pontok elhelyezése

A felvételi pontok kezdeti helyét az egyes keresleti egységek „gravitációs” középpontja alapján határozzuk meg. Ezután a kapott koordináták úthálózatra vetítése következik. A vetítés során két szempontot veszünk figyelembe: (i) a keresleti pontok és a hozzájuk rendelt felvételi pont közötti távolság minimális legyen; illetve (ii) az elfogadható gyaloglási távolság túllépésének minimalizálása. Ezen szempontok biztosítják, hogy a felvételi pontok valóban jól elérhetők legyenek a felhasználók számára, miközben a rendszer működési szempontból is fenntartható és hatékony maradjon.

4. Esettanulmány

A fejlesztett felvételi pont kijelölő módszert Szentendre városában validáltuk azzal a céllal, hogy bemutassuk annak gyakorlati alkalmazhatóságát. Szentendre a tágabban vett Budapesti agglomeráció része, lakossága meghaladja a 25 000 főt, beépített területe mintegy 15 km². A főváros felé irányuló közösségi közlekedést elsősorban a HÉV, másodsorban helyközi autóbuszjáratok biztosítják. A városon belüli közlekedés hagyományosan autóbuszokkal történik, ezek azonban elsősorban a sugárirányú főutak mentén közlekednek, és csak néhány lakótelepet szolgálnak ki megfelelően. A külsőbb területek tömegközlekedési lefedettsége gyengébb, ezek a városrészek jellemzően dombosak, keskeny utcákkal és családi házas beépítettséggel rendelkeznek.

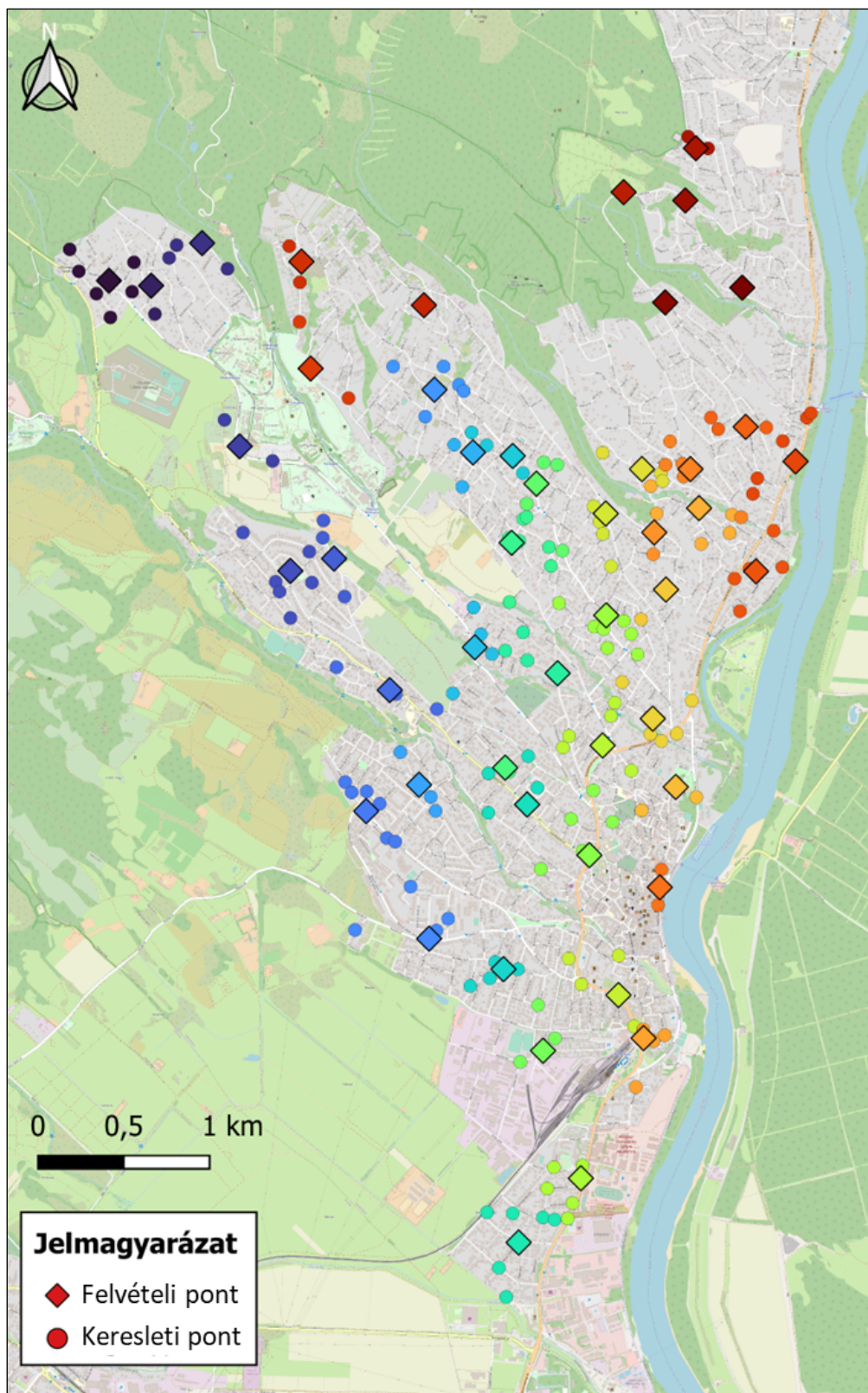
A legtöbb általános iskola a város központi-keleti részén található. Sok gyermek érkezik ide a külsőbb területekről, jellemzően szülői személygépkocsi fuvarral. A keresleti pontokra vonatkozó adatokat az önkormányzat rendelkezésünkre bocsátotta. Az önkormányzat 2022-ben végzett kérdőíves felmérést, amelyben a szülők igényfelmérését célozta egy igényalapú iskolabusz-szolgáltatás bevezetésének lehetőségéről. Bár több iskola is működik a városban, ezek többsége a központban helyezkedik el, ezért az elemzés során a szolgáltatást „sokból-egybe” típusú DRT rendszerként kezeltük, vagyis a járattervezés során több kiindulópontból kvázi egy célállomás felé történik az utazás.

5. Eredmények

A kérdőíves felmérésben megadott valamennyi keresleti ponthoz koordinátákat rendeltünk; összesen 170 pontot azonosítottunk. A távolságmátrixot a *QGIS QNEAT* modul és a *Microsoft Access keresztátlás lekérdezés* eszközeivel generáltuk. Az elfogadható gyaloglási távolság értékét szakirodalmi források és tapasztalati adatok alapján 360 méterben határoztuk meg, aminek eredményeképpen a telepíteni szükséges felvételi pontok száma 48 db lett. A keresleti csoportok és egységek képzéséhez *Python programban* beépített genetikus algoritmust alkalmaztunk. A keresleti pontok helyének meghatározásához a *QGIS K-mean* beépített algoritmusát használtuk fel.

Az eredményül kapott felvételi pontok valamennyi keresleti pontot kiszolgálják. A kijelölt felvételi helyeket az 1. ábrán szemléltettük.



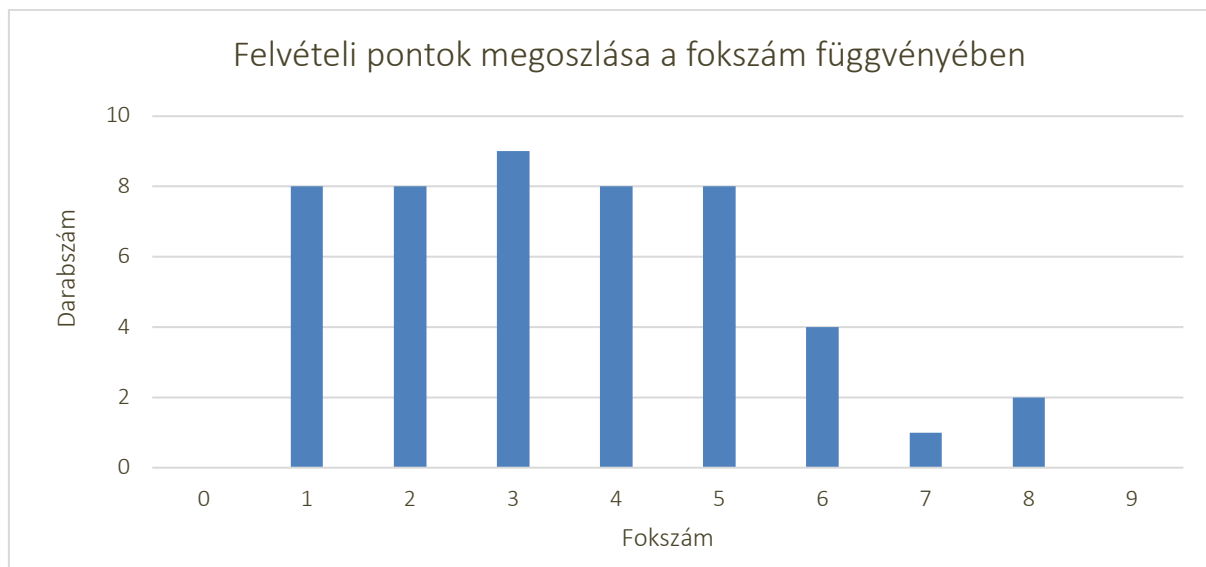


1. ábra: Felvételi pontok és keresleti pontok



Megállapítottuk, hogy a felvételi pontok valóban igazodnak az igényekhez – a felvételi pontok körül koncentráltan helyezkednek el a keresleti pontok.

A felvételi pontok karakterisztikájának feltárása céljából megvizsgáltuk, hogy az egyes felvételi pontokhoz hány keresleti pont tartozik – vagyis, hogy hogyan alakul a felvételi pontok fokszáma (2. ábra).

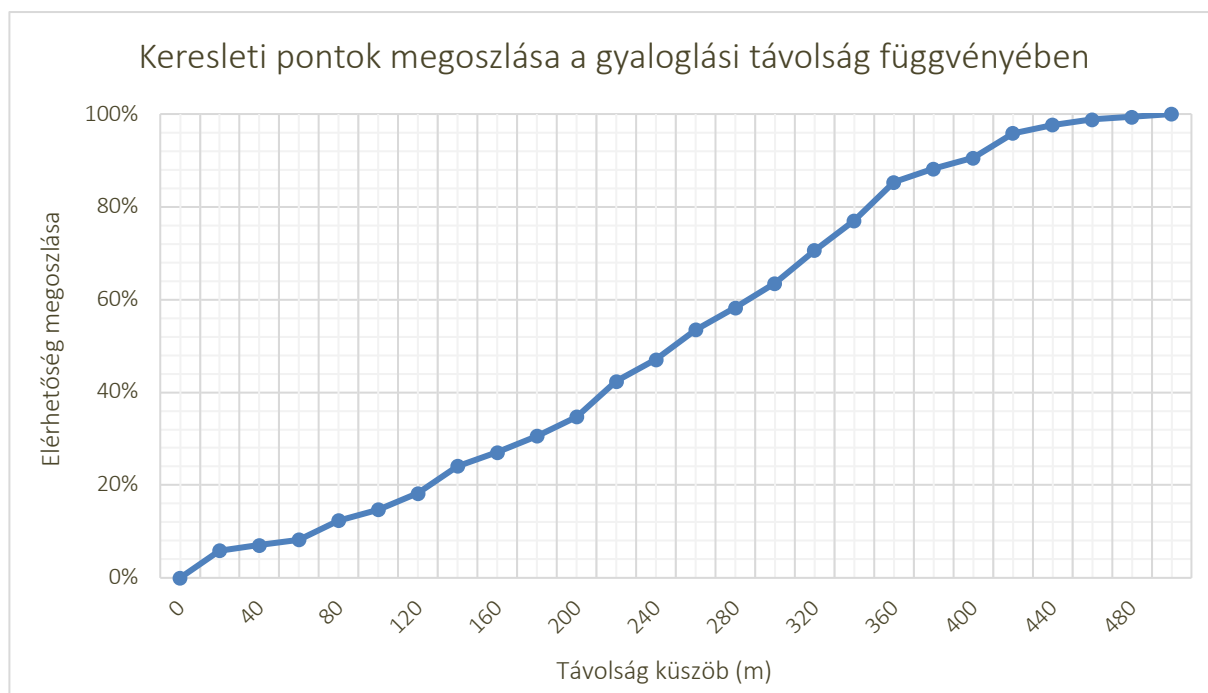


2. ábra: Felvételi pontok fokszáma

Megállapítottuk, hogy valamennyi esetben a felvételi pontokhoz legalább egy keresleti pont tartozik, azonban akadnak olyan esetek, amikor csupán egy keresleti pontot szolgálnak ki, és olyanok is, amikor akár nyolcat. Az átlagos foksám értéke 3,5, vagyis egy felvételi pont átlagosan 3-4 db keresleti pont kiszolgáltatását teszi lehetővé.

Továbbá vizsgáltuk, hogy egy megadott gyaloglási távolság küszöbön belül hány keresleti pont érhető el valamely felvételi pontról (3. ábra).





3. ábra: Keresleti pontok megoszlása a gyaloglási távolság függvényében

Megállapítottuk, hogy a keresleti pontok fele 250 méter gyaloglási távolságon belül elérhető, az előre definiált 360 méteren belül a keresleti pontok 85%-ról érhető el valamelyik felvételi pont (megjegyzés: mivel a vetítési folyamat során az össztávolság minimalizálása is cél volt, így előfordulhatott a 360 méteren felüli gyaloglási távolság is), míg 500 méteren belül valamennyi igény kielégíthető.

A módszer hatékonyságának igazolása érdekében összehasonlítottuk az autóbushálózat megállóinak elérhetőségét a felvételi pontok elérhetőségével, kiemelve az átlagos és a maximális gyalogos távolságot (2. táblázat).

2. táblázat: Átlagos és maximális gyaloglási távolságok

	jelenlegi kínálat	felvételi pontok
Átlag	425 m	240 m
Maximum	2207 m	492 m

A felvételi pontok kiegyenlítették a jelenlegi kínálat nyújtotta kiugró értékeket, és az átlagos gyaloglási távolság is jelentősen csökkent. A 48 felvételi pont biztosításával az átlagos gyaloglási távolság mindössze 240 méter, a maximális pedig kevesebb mint 500 méter.

6. Konklúzió

Felvételi pont kijelölő módszert dolgoztunk ki igényalapú iskolabusz-szolgáltatáshoz. Kutatási célunk, hogy ezen keresleti pontok számára minimális gyaloglási távolság mellett elérhető, jól elhelyezett felvételi pontokat határozzunk meg. A módszer alkalmazásához szükség van egy előzetesen meghatározott keresleti pontok halmazára (diákok lakóhelye vagy azokhoz közeli koordináták) és egy elfogadható gyaloglási távolságra.

Klaszterező algoritmust fejlesztettünk, amely a keresleti pontok közötti valós úthálózati távolságok és szomszédsági viszony alapján keresleti csoportokat, majd keresleti egységeket képez. Ezen keresleti





egységek száma megegyezik a telepítendő felvételi pontok számával, így minden egyes keresleti egységhez egyértelműen hozzárendelhető egy felvételi pont. A kijelölés során gravitációs középpont-alapú megközelítést alkalmaztunk, majd az algoritmus eredményét az úthálózatra vetítettük.

A módszer hasznosságát és gyakorlati alkalmazhatóságát esettanulmánnyal igazoltuk. Az esettanulmányban szentendrei igényalapú iskolabusz szolgáltatáshoz a felvételi pontok elhelyezésére alkalmaztuk a módszert. Az eredmények szerint 48 felvételi pont képes valamennyi igényt kiszolgálni, miközben az átlagos gyaloglási távolság csupán 240 méter, és a maximum érték nem haladta meg az 500 métert. A felvételi pontok átlagosan 3-4 keresleti pontot szolgáltattak ki. Megállapítottuk, hogy a módszer számottevően hatékonyabb hozzáférést biztosít, mint a jelenlegi közösségi közlekedési kínálat, ezáltal lehetővé téve egy fenntartható iskolabusz-rendszer kialakítását.

A módszer más településekre is adaptálható, feltéve, hogy rendelkezésre áll a keresleti pontok pontos térbeli elhelyezkedése, illetve az adott település úthálózati adatai. A módszer a gyaloglási küszöbtávolság megválasztásával paraméterezhető, így a helyi sajátosságokhoz igazítható (pl. domborzati viszonyok), továbbá hozzájárulhat a fenntarthatóbb és adatvezérelt mobilitástervezéshez, különösen a ritkábban lakott külvárosi vagy agglomerációs területeken.

Köszönetnyilvánítás

A 2024-2.1.2-EKÖP-KDP-2024-00005 SZÁMÚ PROJEKT A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM NEMZETI KUTATÁSI FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL NYÚJTOTT TÁMOGATÁSÁVAL, AZ EKÖP_KDP-24-1-BME-12 PÁLYÁZATI PROGRAM FINANSZÍROZÁSÁBAN VALÓSULT MEG.



Irodalomjegyzék

- [1] A. Papanikolaou and S. Basbas, "Analytical models for comparing Demand Responsive Transport with bus services in low demand interurban areas," *Transp. Lett.*, vol. 13, no. 4, pp. 255–262, Apr. 2021, doi: 10.1080/19427867.2020.1716474.
- [2] J. D. Nelson, S. Wright, B. Masson, G. Ambrosino, and A. Naniopoulos, "Recent developments in Flexible Transport Services," *Res. Transp. Econ.*, vol. 29, no. 1, pp. 243–248, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.retrec.2010.07.030.
- [3] P. Vansteenwegen, L. Melis, D. Aktaş, B. D. G. Montenegro, F. Sartori Vieira, and K. Sörensen, "A survey on demand-responsive public bus systems," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 137, p. 103573, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.trc.2022.103573.
- [4] M. Diana, L. Quadrioglio, and C. Pronello, "Emissions of demand responsive services as an alternative to conventional transit systems," *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 12, no. 3, pp. 183–188, May 2007, doi: 10.1016/j.trd.2007.01.009.
- [5] L. Sörensen, A. Bossert, J.-P. Jokinen, and J. Schlüter, "How much flexibility does rural public transport need? – Implications from a fully flexible DRT system," *Transp. Policy*, vol. 100, pp. 5–20, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.tranpol.2020.09.005.
- [6] J. Ren, W. Jin, and W. Wu, "A Two-Stage Algorithm for School Bus Stop Location and Routing Problem With Walking Accessibility and Mixed Load," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 119519–119540, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2936922.
- [7] M. Sciortino, R. Lewis, and J. Thompson, "A Heuristic Algorithm for School Bus Routing with Bus Stop Selection," in *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, C. Zarges and S. Verel, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 202–218. doi: 10.1007/978-3-030-72904-2_13.





- [8] J. Zhang, D. Z. W. Wang, and M. Meng, "Optimization of bus stop spacing for on-demand public bus service," *Transp. Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 329–339, May 2020, doi: 10.1080/19427867.2019.1590677.
- [9] Å. Jevinger and H. Svensson, "Stated opinions and potential travel with DRT – a survey covering three different age groups," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 47, no. 7, pp. 968–995, Oct. 2024, doi: 10.1080/03081060.2024.2337059.
- [10] J. Park and B.-I. Kim, "The school bus routing problem: A review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 202, no. 2, pp. 311–319, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.05.017.
- [11] L. Y. O. Li and Z. Fu, "The School Bus Routing Problem: A Case Study," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 53, no. 5, pp. 552–558, 2002.
- [12] J. F. M. Sarubbi, C. M. R. Mesquita, E. F. Wanner, V. F. Santos, and C. M. Silva, "A strategy for clustering students minimizing the number of bus stops for solving the school bus routing problem," in *NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Apr. 2016, pp. 1175–1180. doi: 10.1109/NOMS.2016.7502983.
- [13] J. H. Taplin and Y. Sun, "Optimizing bus stop locations for walking access: Stops-first design of a feeder route to enhance a residential plan," *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.*, vol. 47, no. 7, pp. 1237–1259, Sept. 2020, doi: 10.1177/2399808318824108.
- [14] Y. Liu and Y. Ouyang, "Mobility service design via joint optimization of transit networks and demand-responsive services," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 151, pp. 22–41, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.trb.2021.06.005.
- [15] J. Schlüter, A. Bossert, P. Rössy, and M. Kersting, "Impact assessment of autonomous demand responsive transport as a link between urban and rural areas," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 39, p. 100613, June 2021, doi: 10.1016/j.rtbm.2020.100613.
- [16] J. Shu, M. C. Chou, Q. Liu, C.-P. Teo, and I.-L. Wang, "Models for Effective Deployment and Redistribution of Bicycles Within Public Bicycle-Sharing Systems," *Oper. Res.*, vol. 61, no. 6, pp. 1346–1359, Dec. 2013, doi: 10.1287/opre.2013.1215.
- [17] M. Soppert, C. Steinhardt, C. Müller, J. Gönsch, and P. M. Bhogale, "Matching functions for free-floating shared mobility system optimization to capture maximum walking distances," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 305, no. 3, pp. 1194–1214, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ejor.2022.06.058.
- [18] D. B. Hess, "Walking to the bus: perceived versus actual walking distance to bus stops for older adults," *Transportation*, vol. 39, no. 2, pp. 247–266, Mar. 2012, doi: 10.1007/s11116-011-9341-1.
- [19] R. Pueboobpaphan, S. Pueboobpaphan, and S. Sukhotra, "Acceptable walking distance to transit stations in Bangkok, Thailand: Application of a stated preference technique," *J. Transp. Geogr.*, vol. 99, p. 103296, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103296.
- [20] A. Tennøy, M. Knapskog, and F. Wolday, "Walking distances to public transport in smaller and larger Norwegian cities," *Transp. Res. Part Transp. Environ.*, vol. 103, p. 103169, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.trd.2022.103169.
- [21] J. M. Gleason, "A set covering approach to bus stop location," *Omega*, vol. 3, no. 5, pp. 605–608, Oct. 1975, doi: 10.1016/0305-0483(75)90033-X.
- [22] D. Silva and C. Csiszár, "Locating Method for Pick-up and Drop-off Spots for Shared Autonomous Vehicle-based Mobility Services," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 1, Art. no. 1, 2024, doi: 10.3311/PPci.22541.
- [23] M. Jabbari *et al.*, "The Pedestrian Network Concept: A Systematic Literature Review," *J. Urban Mobil.*, vol. 3, p. 100051, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.urbmob.2023.100051.
- [24] T. Calvert, F. Crawford, G. Parkhurst, and J. Parkin, "Perceived accessibility of employment sites by jobseekers and the potential relevance of employer-subsidised demand responsive transport to enhance the commute," *Cities*, vol. 130, p. 103872, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.cities.2022.103872.
- [25] A. García-Ferrer, M. Bujosa, A. de Juan, and P. Poncela, "Demand Forecast and Elasticities Estimation of Public Transport," *J. Transp. Econ. Policy JTEP*, vol. 40, no. 1, pp. 45–67, Jan. 2006.
- [26] I. Frade and A. Ribeiro, "Bike-sharing stations: A maximal covering location approach," *Transp. Res. Part Policy Pract.*, vol. 82, pp. 216–227, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.tra.2015.09.014.
- [27] G. Stiglic, S. Kocbek, I. Pernek, and P. Kokol, "Comprehensive Decision Tree Models in Bioinformatics," *PLOS ONE*, vol. 7, no. 3, p. e33812, Mar. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0033812.
- [28] Y. Cheng, X. Chen, X. Ding, and L. Zeng, "Optimizing Location of Car-Sharing Stations Based on Potential Travel Demand and Present Operation Characteristics: The Case of Chengdu," *J. Adv. Transp.*, vol. 2019, no. 1, p. 7546303, 2019, doi: 10.1155/2019/7546303.

Lektorálta: Dr. Csiszár Csaba, egyetemi tanár,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

