

Városi elektromos töltőállomások helyszínét kijelölő módszer

A tisztán elektromos járművek csökkentik a lokális lég- és zajszennyezést, hozzájárulnak a fenntartható közlekedéshez. Térnyerésüket korlátozza a hosszú töltési idő, valamint a töltésükhöz szükséges infrastruktúra hiánya. Utóbbi problémával foglalkozik a cikk, amelyben megtalálható egy a szerzők által kidolgozott multikritériumos módszer, ami két lépésben értékelve a területi egységeket, mohó algoritmust alkalmazva jelöli ki a városi töltőállomás-hálózat lehetséges helyszíneit. A módszer újdonsága, hogy szemben a korábbiakkal, a töltési keresletet a jövedelem, az elektromos járművek száma, a turisztikai attrakciók, a lakosság szám, lakóterület jellemzők és forgalomvonzó létesítmények figyelembevételével becsüli. A módszer alkalmazhatóságát Budapest XI. kerületének példáján mutatják be.

DOI 10.24228/KTSZ.2019.3.1

Dr. Csiszár Csaba

egyetemi docens
csiszar.csaba@mail.bme.hu

Csonka Bálint

tudományos segédmunkatárs
csonka.balint@mail.bme.hu

Földes Dávid

tudományos segédmunkatárs
foldes.david@mail.bme.hu

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és
Járműmérnöki Kar, Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszék

Dr. Wirth Ervin

egyetemi adjunktus
wirth.ervin@epito.bme.hu

Dr. Lovas Tamás

egyetemi docens
tlovas@mail.bme.hu

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

1. BEVEZETÉS

A közúti közlekedésnek az éghajlatváltozásra és a levegő minőségére gyakorolt hatása jelentős, napjaink egyik leginkább sürgetően megoldandó problémája. A környezetterhelés mérséklésének szándéka a tisztább és az energiatakarékos technológiák, elsősorban az elektromos meghajtás fejlesztéséhez vezetett. A hibrid, de különösen a tisztán elektromos

járművek használata számos európai országban csökkentette a károsanyag-kibocsátást [1], [2]. Az elektromos járműveknek kiemelkedő előnyei vannak, azonban a hátrányaik gátolják a széles körű elterjedést [3]. A magas beszerzési költségen túl a legjelentősebb hátrányt a töltőhálózat hiánya jelenti. A nyilvános elektromos töltőállomások telepítése jelentősen befolyásolja az elektromos személygépjárművek terjedését, különösen a jelenlegi kezdeti fázisban.

Az egyéni személygépjárműves utazások során két különböző töltési igényt különböztetünk meg attól függően, hogy hol és mikor jelentkeznek:

- inter-city töltési igény: hosszútávú, jellemzően távolsági utazások közben,
- intra-city töltési igény: rövid, jellemzően városi (városkörnyéki) utazások végén.

A távolsági utazások során jellemzően meg kell szakítani az utazást a jármű feltöltéséhez. A rövid, városi utazások során azonban elegendő a járműveket az utazás végén tölteni; így a töltés a parkolási folyamat része. A töltőállomások helyszíneit kijelölő módszert tehát a töltési igények jellemzőihez kell igazítani.

Ebben a cikkben az intra-city igények kiszolgálására alkalmas töltőinfrastruktúra helyezettük a hangsúlyt, figyelembe véve a területhasználat sajátosságait (szolgáltatások, lakosság, lakóterület jellemzők, stb.) [4]. Ennek megfelelően kidolgoztunk egy olyan töltőállomás kijelölő módszert, aminek az alkalmazásával megszüntethetők a felesleges városi töltés-motivált utazások. A kutatás során az alábbi kérdésekre kerestük a választ:

- A területi egységek mely jellemzői befolyásolják az intra-city töltési keresletet?
- Mely változók befolyásolják a nappali és melyek az éjszakai töltési keresletet?
- Hogyan lehet adott N számú töltőállomást szétosztani a területi egységek között?
- Hogyan lehet meghatározni a javasolt töltőállomás helyszíneket a területi egységen belül?

A 2. fejezetben áttekintjük a kapcsolódó szakirodalmat. A 3. fejezetben részletezzük a kidolgozott módszert; ismertetjük az értékelést befolyásoló változókat. A 4. fejezetben esettanulmányként bemutatjuk a módszer alkalmazását Magyarországon, amihez egy térinformatikai szoftvert használtunk. Budapest XI. kerületére vonatkozóan a mikroértékelést részletesen ismertetjük. Végezetül a kutatás során levont következtetéseket és a továbbfejlesztés irányait foglaljuk össze.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Számos tanulmány vizsgálja a városi töltőállomások telepítésének szempontjait. Töltőhálózat-tervezéskor legtöbbször vagy a töltési szokásokat, vagy a villamosenergia hozzáférhetőségét veszik alapul, azonban léteznek összetett megközelítések is [5].

A legtöbb tanulmány a töltési igények becslésével kezdődik. Lokowska és szerzőtársai [6] Monte Carlo szimulációt dolgoztak ki az otthoni töltés modellezéséhez. A töltési kereslet időbeli változását vizsgálták, a töltés kezdő és befejező időpontja alapján, valamint tekintettel az utazások átlagos hosszára is. Liang és szerzőtársai [7] a töltési keresletet meghatározó modelljükben a járműjellemzőket és a villamosenergia árát is figyelembe vették. Számos tanulmányban a „Big Data” technológiát alkalmazva becsülik meg a töltési keresletet historikus forgalmi és időjárási adatok alapján [8], [9]. Arias és szerzőtársai [10] meglévő töltőállomásokhoz dolgoztak ki keresleti modellt, amelyben a jármű és a töltő jellemzőit is figyelembe vették. Megállapították, hogy a nagyobb teljesítményű (rövidebb töltési idejű) állomások vonzóbbak. A töltési kereslet és a terület használati jellemzők (térbeliség) közötti összefüggéseket azonban nem vizsgálták.

Összefoglalva elmondható, hogy a töltőállomás helyszínek a töltési igények szerint jelölendők ki (különösen sok jármű esetén). A helyszíneknek a következő elvárásoknak kell megfelelniük:

- az utazói szokások térbeli jellemzőiből levezetett töltési igények, valamint
- a rendelkezésre álló villamoshálózati kapacitás vagy annak gazdaságos bővítési lehetősége.

Ennek megfelelően közlekedési, illetve villamoshálózat alapú megközelítések léteznek.

Liu és szerzőtársai [11] a villamoshálózat jellemzői alapján azonosították az optimális töltőállomás helyszíneket. Awasthi és szerzőtársai [12] egy hibrid optimalizációs módszert fejlesztettek ki elsősorban a villamoshálózat

jellemzőire és a telepítési költségekre fókuszálva, miközben az utazói szokásokat elhanyagolták. A közlekedési vonatkozású szempontok figyelmen kívül hagyásának következtében esetükben a javasolt állomások a főbb utaktól, csomópontoktól és forgalomvonzó létesítményektől gyakran távolabb helyezkednek el.

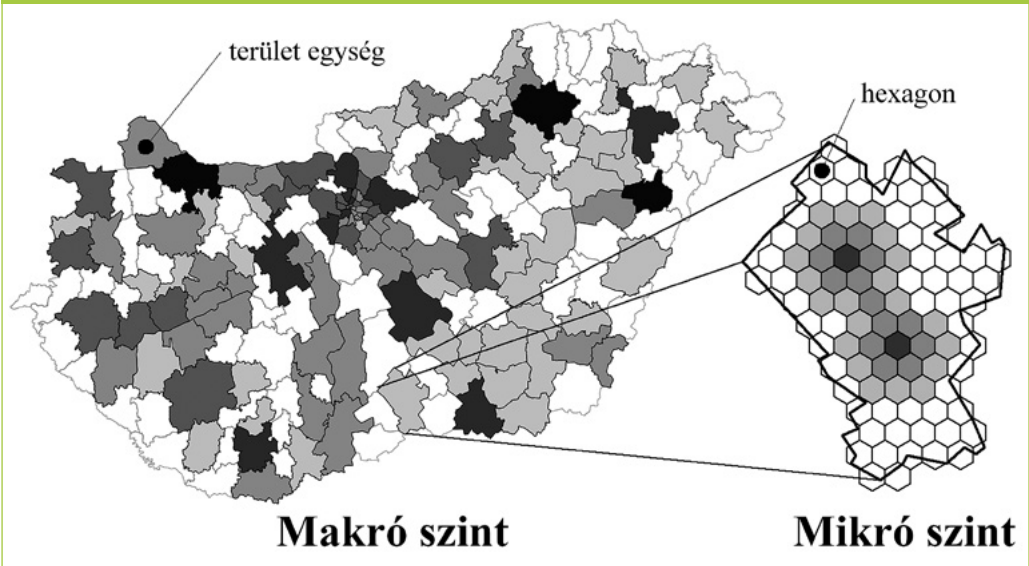
Más tanulmányok elsősorban közlekedési szempontokat vettek figyelembe. Ezen munkák tovább bonthatók pontalapú és áramlásalapú megközelítésekre. A pontalapú megközelítések feltételezik, hogy az igények egy pontban koncentrálnak. A megközelítés hátránya, hogy elhanyagolja az igények térbeli jellemzőit. Ip és szerzőtársai [13] egy hierarchikus klaszteranalízist alkalmaztak a forgalomnagyság hálózati leképezéséhez és pontokhoz rendeléséhez. Ge és szerzőtársai [14] egy hasonló 'hálózat felosztásos' módszert javasoltak; a forgalomsűrűséget és az állomás megközelítéséből eredő 'veszteséget' vették alapul. Módszerük hátránya, hogy a töltési keresletet a mozgó forgalomból vezetik le; sem a parkolási lehetőségeket, sem az elérhető kiegészítő szolgáltatásokat nem veszik figyelembe. Hess és szerzőtársai [15] kibővítették a bemeneti adatok körét az elektromos járművek átlagos hatótávolságával és a potenciális töltőállomások jellemzőivel annak érdekében, hogy utazásokat lehessen generálni és a töltési kereslet szimulálható legyen. Csak meglévő benzinkutakat vettek figyelembe potenciális helyszíneként. A pontszerű módszerek hátránya, hogy a lehetséges helyszínek megkötésre kerülnek (pl. benzinkutak, közlekedési csomópontok); további hátrány a részleges lefedettség problémája, ami sokszögek vagy más modellezési módszerek alkalmazásával küszöbölhető ki [16], [17]. Frade és szerzőtársai [18] lakótömböként képezték a nappali és az éjszakai töltési igényeket. Chen és szerzőtársai [19] az optimális töltési helyszíneket a parkolási igények alapján határozták meg. A közelben lévő munkahelyek számát, a parkolás díját és a közösségi közlekedés színvonalát, mint változókat vették figyelembe. Andrenacci és szerzőtársai [20] szintén a parkolási időre helyezték a hangsúlyt. Klaszteranalízist alkalmaztak az optimális telepítési helyszínek meghatározásához, az egyéni gépjárműves utazások célállo-

másai szerint. Shirmohammadli és Vallée [21] is hasonlóan a parkolásra fókuszált, értékelték a közeli létesítmények forgalomvonzó jellegét, figyelembe véve a létesítmények tulajdonságát, például a nyitvatartási időt. Gavranovic és szerzőtársai [22] egy P-medián helymeghatározási modellt alkalmaztak a telepítési helyszínek meghatározásához, elsődlegesen a lakosságszámra fókuszálva, amelyben a historikus adatok helyett a bemeneti adatok szimulációs megoldásokkal is előállíthatók. Például Alegre és szerzőtársai [23] a töltőállomás helyszíneket az elektromos járművek mozgásának szimulációjával kapott eredmények alapján jelölték ki, figyelembe véve a töltés díját és az utazási idő költséget is, mint változókat.

Áramlásalapú helyszín kijelölési modelleknél (FCLM – Flow Capturing Location Allocation Model) az igények honnan-hová mozgások formájában adottak. A cél a lehető legtöbb honnan-hová mozgás kiszolgálása [24], [25]. Az FCLM modellek jobban alkalmazhatók országos szintű, átjárhatóságot biztosító optimalizációhoz, míg a pontalapú modellek inkább a városi környezetben használhatók hatékonyabban, ahol az igények koncentráltan jelentkeznek [26]. Az FCLM modellekre építve Yao és szerzőtársai [27] többcélú tervezési stratégiát dolgoztak ki, illetve He és szerzőtársai [28] egy hálózati egyensúlyi modellt építettek fel a városi töltőállomás helyszínek kijelölésére. Alhazmi és szerzőtársai [29] bővítették az FCLM modellt a töltőállomások vonzáskörzetével és bevezették az „utazási siker” mutatószámot a töltőállomás-hálózat minőségének mérésére. Az FCLM modellek használatához nagy mennyiségű utazási adatra van szükség, amelyek a széles körben elérhető járműkövető rendszerek segítségével gyűjthetők és a jármű trajektóriák elemezhetőek [30], [31], [32].

Az irodalomkutatást összegezve megállapítottuk, hogy a legtöbb tudományos munka a jármű hely adatait, elsősorban a parkolási jellemzőket használja. A parkoló forgalom nagysága a területi egység jellemzőiből is levezethető. Számos megközelítésben már figyelembe veszik a területi egység jellemzőit, elsősorban az elérhető szolgáltatásokat. Más jellemzőket (pl. lakosság) gyakran figyelmen kívül hagynak.

1. ábra: Az értékelés tárgyai - területi egység makró szinten, hexagonok mikró szinten



3. TÖLTŐÁLLOMÁS HELYSZÍN KIJELÖLŐ MÓDSZER

Egy súlyozott összeg modellt (WSM – Weighted Sum Model) dolgoztunk ki azon területek meghatározására, ahol az intra-city töltési igények koncentráltan jelennek meg, és ahol ennek megfelelően, a töltőállomás telepítése javasolt. A WSM alapú módszer lehetővé teszi a változók súlyának tetszőleges – a célnak megfelelő – megváltoztatását. Így kellően rugalmas a megoldás, ugyanakkor a súlyok értékeire vonatkozó ajánlások fogalmazhatók meg scenáriók formájában. A módszerrel nagy mennyiségű adat figyelembevétele lehetséges. További előny, hogy az alig vagy egyáltalán nem kvantitatív tényezők hatása is értékelhető.

A kifejlesztett módszer legjelentősebb újdonsága, hogy a bemeneti adatok publikusak; nincs szükség a honnan-hová mozgások feltérképezésére. A módszer nem a szükséges töltőállomások számát, hanem a javasolt helyszíneket adja meg. A helyszínek kijelölésének szintjei:

1. telepítendő töltőállomások szétosztása területi egységek között (makró szint),

2. töltőállomás helyszínek meghatározása a terület egységeken belül (mikró szint).

A két szint közötti kapcsolatot az 1. ábra mutatja be. Makró szinten a nagyobb területi egységeket (országosan járáások, Budapest esetén kerületek) értékeljük. Mikró szinten a nagyobb területi egységeket kisebb egységekre, hexagonokra bontjuk, majd értékeljük őket. Az értékelés mind a két szinten a területi egységek elemzésén és összehasonlításán alapszik.

3.1. Telepítendő töltőállomások szétosztása – makró szint

Feltételezzük, hogy adott a terület egységek között szétosztható töltőállomások száma (N). A városok a közvetlen környékükkel együtt tekinthetők egy egységnek. Ezen területi egységeket értékeljük; az eredmény az ún. telepítési potenciál (IP – Installation Potential) (1). IP értéke ott nagyobb, ahol a becsült töltési kereslet is nagyobb.

$$IP_i = a_1 \cdot \frac{5}{2} \left(\frac{x_1}{\max(x_1)} + \frac{x_2}{\max(x_2)} \right) + a_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

ahol:

- IP_i i területi egység töltőtelepítési potenciálja,
- x_1 regisztrált elektromos személygépjárművek száma az adott területi egységben,
- x_2 átlagos jövedelem személyenként az adott területi egységben,
- $max(...)$ legmagasabb értékű területi egységnél a változó értéke,
- x_3 turizmus fontosságát minősítő érték adott területi egységben (1. táblázat),
- a_1, a_2 súlyparaméterek. $a_1 + a_2 = 1$, $a_1 \geq 0$ és $a_2 \geq 0$,

1. táblázat: Turizmus kategóriák

| Turizmus kategória | x_3 |
|-------------------------------|-------|
| Elhanyagolható turizmus | 0 |
| Alacsony jelentőségű turizmus | 1 |
| Közepes jelentőségű turizmus | 3 |
| Jelentős turizmus | 5 |

A töltési keresletet a helyi és a turizusból eredő forgalom együttesen befolyásolja városi környezetben. A helyi töltési keresletet az x_1 és x_2 változók befolyásolják. Feltételezzük, hogy a magasabb jövedelem és a nagyobb elektromos járműszám nagyobb futásteljesítményt indukál, ami növeli a töltési keresletet is. A népszerű turisztikai desztinációk, amelyek elektromos jármű forgalmat generálnak, hasonlóan növelik a töltési keresletet. Az x_3 változó értékének meghatározásához a helyi adottságok és a turizmus szezonális jellegének ismerete is szükséges. Például: a kiemelkedő nyári turisztikai forgalom egyenértékű egy kisebb, de egész évben konstans turisztikai forgalommal. Az 5/2-el való szorzás biztosítja az eredmény 0-5 tartományú értékkészletét.

A töltési igények tehát alapvetően a helyi (x_1 és x_2 változók) és a látogatók (x_3 változó) igényeiből tevődik össze. A módszer kialakításánál törekedtünk az egyszerűsítésre, azaz csak a legmarkánsabb változók bevonására. További változók is bevonhatók a kisebb jelentőségű szempontok figyelembevételéhez; pl. a helyi sajátosságok, szabályozási eltérések esetén. A súlyok az igényt befolyásoló tényezők fontosságát fejezik ki.

A telepíthető töltőállomásokot a (2) szerint osztottuk fel a területi egységek között.

$$n_i = \text{round} \left(\frac{IP_i}{\sum_i IP_i} \cdot N \right) \quad (2)$$

ahol n_i az i területi egységben javasolt töltőállomások száma. A szétoztás lehetséges kimenetelei a kerekítés szabályai miatt a következők lehetnek:

- a) $\sum_i n_i = N$ esetén a szétoztás véget ér,
- b) $\sum_i n_i < N$ esetén egy extra töltőállomás hozzáadása szükséges ahhoz a területi egységhez, ahol a különbség $\left\lfloor \frac{IP_i}{\sum_i IP_i} \cdot N \right\rfloor + 0,5$ és $\frac{IP_i}{\sum_i IP_i} \cdot N$ között a legkisebb pozitív érték,
- c) $\sum_i n_i > N$ esetén eggyel csökkentjük a töltőállomások számát azon területi egység esetén, ahol a különbség $\frac{IP_i}{\sum_i IP_i} \cdot N$ és $\left\lfloor \frac{IP_i}{\sum_i IP_i} \cdot N \right\rfloor + 0,5$ között a legkisebb pozitív érték.

Amennyiben az eltérés kezdetben nagyobb, mint 1, akkor a b) és a c) esethez tartozó lépések ismétlődnek és mindig a legkisebb eltérésű területi egységnél történik a módosítás.

3.2. Töltőállomások helyszíneinek meghatározása – mikro szint

A területi egységek részletesebb vizsgálatához azokat azonos méretű részekre bontottuk. A felbontáshoz a hexagont választottuk, mert a teljes területi egység átfedésmertesen lefedhető, és a sokszögek közül ennek az alakja közelíti leginkább a kör alakját. A párhuzamos oldalak közötti távolság 250 méter, ami még kényelmes gyaloglási távolság a parkolóhely és az úti cél között [33]. A töltőállomásokot a legvonzóbb hexagonokhoz rendeljük. Egy hexagon akkor vonzó, ha magas az átlagosan a hexagonban parkoló járművek száma és a parkolási idő. Ezek az értékek akkor magasak, ha található a hexagonban szolgáltatás vagy lakófunkció. Ennek megfelelően az értékeléskor a forgalomvonzó létesítményeket, a terület jellemzőit és a lakosság számot vettük figyelembe. A közlekedési szempontokon túl számos egyéb szempont is befolyásolja a töltőállomás pontos helyszínének kijelölését, például a terület tulaj-

2. táblázat: Töltésjellemzők helyszíntípusonként

| Helyszíntípus | Töltések átlagos előfordulási száma (f) [töltés/nap/jármű] | Átlagos töltési idő töltésenként (t) [óó:pp/töltés/jármű] | Töltési igény ($d=f \cdot t$) [óó:pp/nap/jármű] |
|--|---|---|---|
| Szupermarket | 0,18 | 0:43 | 0:08 |
| Közhivatal/posta/bank | 0,09 | 0:21 | 0:02 |
| P+R létesítmény | 0,15 | 2:09 | 0:19 |
| Vasútállomás/autóbuszállomás | 0,08 | 1:21 | 0:06 |
| Benzinkút | 0,25 | 0:21 | 0:05 |
| Turisztikai célpont/kulturális- vagy sportlétesítmény | 0,12 | 1:15 | 0:09 |

donviszonya vagy az elektromos hálózat hozzáférhetősége stb. A töltőállomás hexagonon belüli pontos helyszínének kijelölése nem része a módszernek.

Kérdőíves kutatásban vizsgáltuk a városi utazásokat; meghatároztuk a közterületi töltési igényt (d) generáló helyszíntípusokat. Körülbelül 500 fő jelenlegi és potenciális elektromos járműhasználatot kérdeztünk meg Magyarországon, hogy hol, milyen gyakran és mennyi ideig töltenek/töltenének. Az alábbi kategóriákat határoztuk meg:

- helyszíntípus: szupermarket; közhivatal/posta/bank; P+R létesítmény; vasútállomás/autóbuszállomás; benzinkút; turisztikai célpont/kulturális- vagy sportlétesítmény,
- átlagos töltési gyakoriság: soha; évente néhányszor; havonta néhányszor; hetente 2-3 alkalommal; hetente 4-5 alkalommal; mindennap,
- időtartam (t): kb. 10 perc; kb. 30 perc; 2-4 óra; 6-8 óra.

Az időtartam kategóriák megegyeznek a különböző töltőtípusok jellemző töltési idejével. Az eredményeket, vagyis az átlagos töltési gyakoriságot, időtartamot és az ezekből számított töltési igényt helyszíntípusonként a 2. táblázat foglalja össze. Az átlagértékeket a kategóriák középértéke alapján számoltuk.

A lakóterületek minősítő értékének (r) meghatározásához megkérdeztük a kérdőívet kitöltőket, hogy hol tudnák tölteni elektromos járműüket. A válaszok alapján nyilvános

töltők kihelyezése olyan lakóterületeken szükséges, ahol az otthoni töltés nem megoldható. Ennek alapján alacsony r értéket állítottunk be a családi házas területeknek, és magasat a zárt beépítésű (bélvárosias) és lakótelepi területeknek. A minősítő értékeket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Lakóterület kategóriák minősítő értékei

| Lakóterület kategória | r |
|---|-----|
| Családi házas | 1 |
| Zöldövezeti társasház | 3 |
| Zárt beépítésű (bélvárosias), lakótelep | 5 |

Közlekedési szempontból kétféle intra-city töltéstípus különböztethető meg:

- Nappali töltés, ami a nappali tevékenységhez kötött (pl. vásárlás). A töltési keresletet a helyszín jellege és az elérhető szolgáltatások befolyásolják.
- Éjszakai töltés az otthonhoz közeli nyilvános parkolóban. A töltési keresletet a lakosság szám és a lakóterület jellemzői befolyásolják.

Mivel a módszerünk célja a nyilvános töltőállomások helyszínének kijelölése, figyelmen kívül hagytuk a privát parkolóhelyi (pl. garázs) töltéseket (nappal munkahelyen, éjszaka otthon). Egy hexagonban jelentkező töltési igény (Y) a nappali és az éjszakai töltés különböző súlyal történő figyelembevételével számítha-

tó (3). A nappali töltési kereslet a különböző forgalomvonzó helyszíntípusokon jelentkező igényekből, míg az éjszakai otthonközeli töltési kereslet a lakosságszámból és a lakóterület kategóriájából vezethető le.

$$Y = b_1 \cdot \frac{5 \cdot \sum d}{\max(\sum d)} + \frac{b_2}{2} \cdot \left[r + \frac{5 \cdot p}{\max(p)} \right] \quad (3)$$

ahol:

- Y hexagonban jelentkező töltési igény [idő/nap/jármű],
 $\sum d$ forgalomvonzó helyszíntípusokon jelentkező összesített töltési igény,
 p hexagon lakosság száma,
 $\max(\dots)$ legmagasabb értékű hexagonnál szereplő érték,
 b_1, b_2 töltéstípusok súlya. $b_1 + b_2 = 1$, $b_1 \geq 0$ és $b_2 \geq 0$.

A súlyok, vagyis a b_1 és b_2 paraméterek kifejezik a nappali és éjszakai töltés fontosságát. Az éjszakai töltést többnyire csak helyiek veszik igénybe. Ezzel szemben a népszerű szolgáltatásokat, forgalomvonzó helyszíneket más hexagonban élők is felkereshetnek. Ebből kifolyólag javasoljuk a nappali töltés előnyben részesítését a súlyok beállításánál.

Bevezettük a hexagonok töltőtelepítési potenciál értékét (W_q), ami az összehasonlíthatóságot szolgáló dimenzió nélküli (relatív) érték. Minél nagyobb a potenciál, annál inkább szükséges egy adott hexagonban a töltőpont telepítése (figyelembe véve a környező hexagonok jellemzőit is). A potenciál meghatározásánál a gyaloglási hajlandóságot ($w2w$ – *willingnes to walking*) is figyelembe vettük. A $w2w$ paraméter azt a legnagyobb gyaloglási távolságot fejezi ki, amit az elektromos jármű használója hajlandó megtenni a töltőállomás és az utazási célja között, vagyis a hexagon vonzaskörzetét. Egy hexagon töltőtelepítési potenciálja a töltési igények vonzaskörzetén ($w2w$ sugár) belüli összesített értékének és azon igényeknek a különbsége, amelyeket a közeli, meglévő töltőállomások kielégítenek az elvonzó hatásuk révén (4).

$$W_q = P \left[Y_q + \sum_s Y_s - \sum_t (c \cdot \sum_u Y_{qt,u}) \right] \quad (4)$$

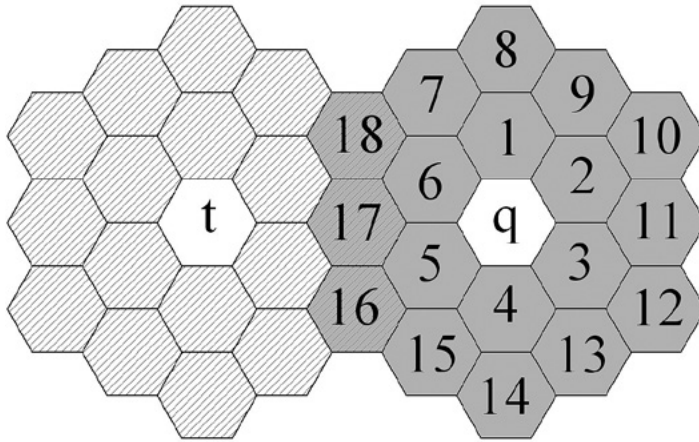
ahol:


- W_q q hexagon töltőtelepítési potenciálja (a dimenzió jelölésétől el lehet tekinteni),
 P parkolási potenciál; $P=0$, ha nincs nyilvános parkolóhely, vagy a töltőtelepítés nem javasolt, minden más esetben $P=1$,
 Y_q q hexagonban jelentkező töltési igény, a vizsgált q hexagon vonzaskörzetében lévő, töltőállomást nem tartalmazó s hexagonban jelentkező töltési igény (a vonzaskörzet sugara $w2w$),
 $\sum_u Y_{qt,u}$ töltési igények összesített értéke a vizsgált q hexagon és a meglévő töltőállomást tartalmazó t hexagon vonzaskörzetének metszetében lévő, u -val jelölt hexagonok esetén. A vonzaskörzet sugara $w2w$, így azok a hexagonok tartoznak a metszetbe, amelyek ennél közelebb találhatóak mindkét vizsgált hexagonhoz.


A metszetben lévő hexagonok töltési igényét mindkét (q és t) hexagon töltőállomása is kiszolgálhatja. Ez az igény megosztandó $c(q,t)$ attraktivitási függvény szerint a lehetséges kiszolgáló hexagonok között. A függvény definiálásánál pl. a hexagonok töltési igényét, mint egyfajta akktraktivitási tényezőt lehet figyelembe venni. A c függvény értékét a leg-egyszerűbb esetben 0,5-nek lehet választani, ha q és t hexagon töltési kereslete megegyezik, vagy közel azonos. Ekkor tehát az u hexagonok töltési keresletének a felét levonjuk a q hexagon töltőtelepítési potenciál értékéből, mivel arra a t hexagonban lévő töltőállomás elvonzó hatást gyakorol.


A számítás logikáját a 2. ábrán egy példával szemléltetjük. A példában a vizsgált hexagon a q . A $w2w$ távolság, vagyis a hexagonok vonzaskörzete két hexagon; azaz feltételezzük, hogy az elektromos jármű használók tölteni fogják a járművet, ha a célállomásuk nincs messzebb két hexagonnál. A vizsgált hexagon vonzaskörzetében lévő hexagonok $s=1..18$. Ezáltal minden ebbe a távolságba eső hexagon növeli, míg minden öt hexagonnál közelebb elhelyezkedő meglévő töltőállomás csökkenti a töltőtelepítési potenciál (W_q) ér-

2. ábra: Hexagonok közötti kapcsolat



 vizsgált hexagon

 meglévő töltőállomás

 vizsgált hexagon vonzaskörzete

 meglévő töltőállomás vonzaskörzete

$s=1..18$

$u=16..18$

tékét. A példában t hexagonban található egy meglévő töltőállomás. A vizsgált q hexagon és a meglévő t töltőállomás vonzaskörzetének metszetében lévő hexagonok 16, 17 és 18, így $u=16..18$.

A töltőállomás helyszínének kijelölésére mohó algoritmust használtunk. Abban az esetben, ha a vizsgált hexagonok egyikében sincs még töltőállomás, a lépések a következők:

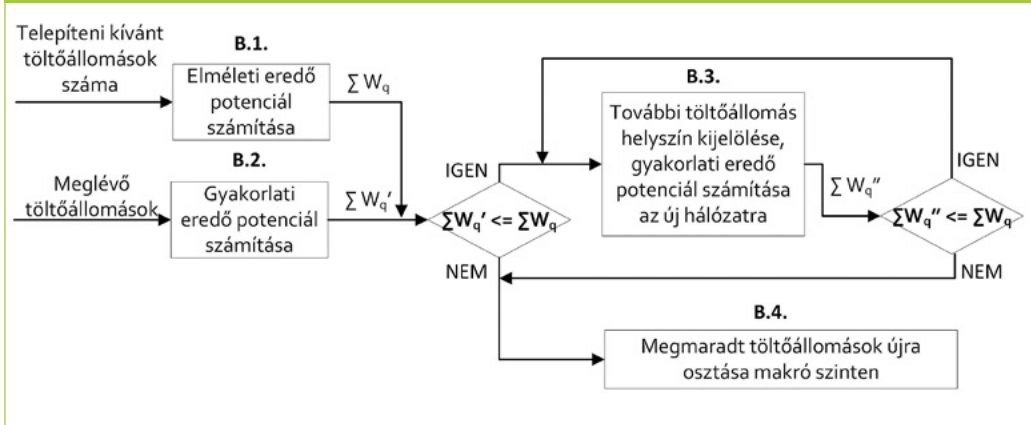
- A1. W_q meghatározása minden hexagonra.
- A2. Töltőállomás hozzárendelése a legnagyobb W_q értékű hexagonhoz.

Újabb töltőállomás helyszín kijelöléséhez a lépéseket megismételjük. Az első hexagon az első számítási ciklus szerinti legmagasabb W_q érték, míg a második hexagon a második számítási ciklus szerinti legmagasabb W_q érték alapján kerül kiválasztásra. W_q értékeket ciklusonként újraszámoljuk.

A módszer összetettebb, amennyiben a vizsgált hexagonok egyikében van már meglévő töltőállomás, mivel a cél, hogy a teljes vizsgált területen belül egységes mértékben legyenek kiszolgálva az igények. Ebben az esetben a javasolt és a meglévő töltőállomásokhoz tartozó hexagonok W_q értékeit számítjuk külön-külön; majd összehasonlítást végzünk. A folyamatot a 3. ábrán foglaljuk össze. A lépések a következők:

- B1. Javasolt töltőállomás helyszínének (hexagonok) kiválasztása a meglévő töltőállomás(ok) figyelmen kívül hagyásával (A1 és A2 lépések). Az elméleti eredő töltőtelepítési potenciál (ΣW_q) meghatározása a javasolt helyszín W_q értékeinek összesítésével.
- B2. A gyakorlati eredő töltőtelepítési potenciál ($\Sigma W_q'$) meghatározása: a meglévő töltőállomást tartalmazó hexagonok W_q értékeinek összesítésével.
- B3. Amennyiben az elméleti eredő potenciál nagyobb, mint a gyakorlati, akkor új telepítési helyszín kiválasztása ajánlott, hiszen a meglévő állomások nem szolgál-

3. ábra: Töltőállomás helyszín meghatározása már meglévő töltőállomások esetében mikro szinten



ják ki megfelelő mértékben az igényeket. A további helyszín kiválasztása az A1 és A2 lépések elvégzésével lehetséges figyelembe véve a meglévő helyszíneket. Ezt a lépést addig ismételjük, amíg az elméleti eredő potenciál nagyobb, mint a létrejövő új töltőhálózat (meglévő és újonnan telepített töltőállomások együttesen) gyakorlati eredő potenciálja (W_q'').

B4. Amennyiben a gyakorlati eredő potenciál nagyobb, mint az elméleti, akkor új telepítési helyszín kiválasztása nem ajánlott, hiszen a meglévő állomások megfelelő mértékben kiszolgálják az igényeket. Hasonlóan, ha a létrejövő új töltőhálózat gyakorlati eredő potenciálja éppen meghaladja az elméletit, akkor további töltőállomások elhelyezése már nem javasolt. Mindkét esetben a „megmaradó” töltőállomásokat makró szinten lehet elosztani a többi területi egység között.

4. A MÓDSZER ALKALMAZÁSA

A töltőállomás helyszín kijelölő módszert Magyarországra alkalmaztuk; a területi egységeknek a járásokat és a budapesti kerületeket tekintettük. Magyarországon 164 járás, míg Budapesten 23 kerület van. Az esettanulmányban a célunk összesen $N=250$ töltőállomás telepítése volt, amelyek a rövid távú, jellemzően városi utazásokat szolgálnák ki.

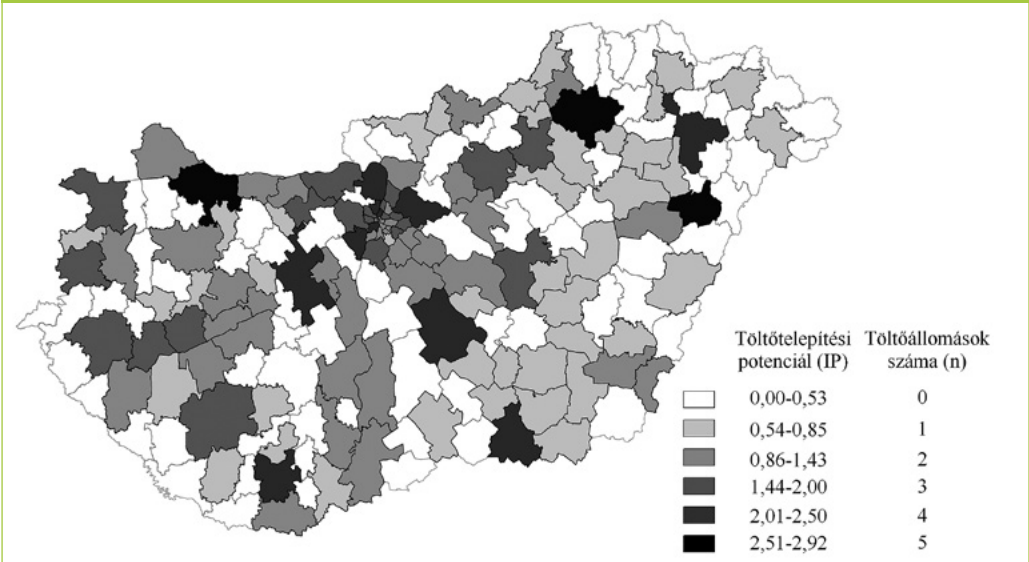
A módszer implementálása a legelterjedtebb geoinformatikai nyelven, Pythonnal történt. A fejlesztett Python szkriptek a nyílt forráskódú QGIS (PyQGIS) asztali térinformatikai szoftver környezetén belül futtathatók.

Először makró szinten szétosztottuk a 250 db állomást a területi egységek között. Területi egységenként becsültük az elektromos személygépjárművek számát a járásonkénti, illetve kerületenkénti járműszám és az elektromos személygépjárművek országos aránya alapján (a konkrét adatok nem álltak rendelkezésre). A jövedelem adatok forrása a Központi Statisztikai Hivatal nyilvántartása volt. A súlyokat tapasztalati úton határoztuk meg (4. táblázat) figyelembe véve, hogy az x_1 , x_2 és x_3 változók milyen mértékben befolyásolják az elektromos járművek elfogadását és az éves futásteljesítményt. A makró szintű értékelés eredményét, a telepítési potenciál (IP) értékét és a szétosztott töltőállomások számát (n) a 4. ábrán ábrázoltuk.

4. táblázat: Súlyok értéke – makró szint (példa)

| Súly | Érték |
|-------|-------|
| a_1 | 0,6 |
| a_2 | 0,4 |

4. ábra: Töltőtelepítési potenciál kategóriák és javasolt töltőállomások száma magyarországi terület egységeként



Az eredmények alapján a Budapestet és környékét, valamint a nagyobb városokat (Miskolc, Győr, Debrecen, Szeged, Pécs, Székesfehérvár, Kecskemét, Nyíregyháza) tartalmazó területi egységek *IP* értéke a legnagyobb. A kiosztható 250-ből így 118 db töltőállomás 39 területi egységen koncentrálódik. Vagyis a töltőállomások 47%-ának telepítése a terület egységek csupán 20%-ára jut. A legnagyobb *IP* értékű terület egységek jellemzően Budapest kerületei.

Mikró szinten biztosítandó, hogy a töltőállomások az igény gócpontokhoz közel helyezkedjenek el, a $w2w$ távolságot egy hexagonnak választottuk. A forgalomvonzó létesítmények helyszínének adatforrásaként az OpenStreetMap nyílt forráskódú térképi adatbázist használtuk. A súlyokat a nappali és az éjszakai otthonközeli töltés fontossága alapján képeztük. Tapasztalataink szerint a nappali töltési igény fontosabb, így a súlyokat az alábbiak szerint határoztuk meg: $b_1=0,6$ és $b_2=0,4$.

A helyszín kijelölő módszert Budapest XI. kerületére vonatkozóan alkalmaztuk. A makró szintű értékelés eredményeként ebbe a kerületbe a 250 db töltőállomásból 4 db telepítése javasolt. A kerületben a vizsgálat elvégzésekor

már 4 db töltőállomás volt; ennek megfelelően a B1-B4 lépéseket végeztük el. Kiszámoltuk az elméleti eredő potenciál értékeket a legvonzóbb hexagonok esetében (5. táblázat).

5. táblázat: A legnagyobb töltőtelepítési potenciállal rendelkező hexagonok értéke

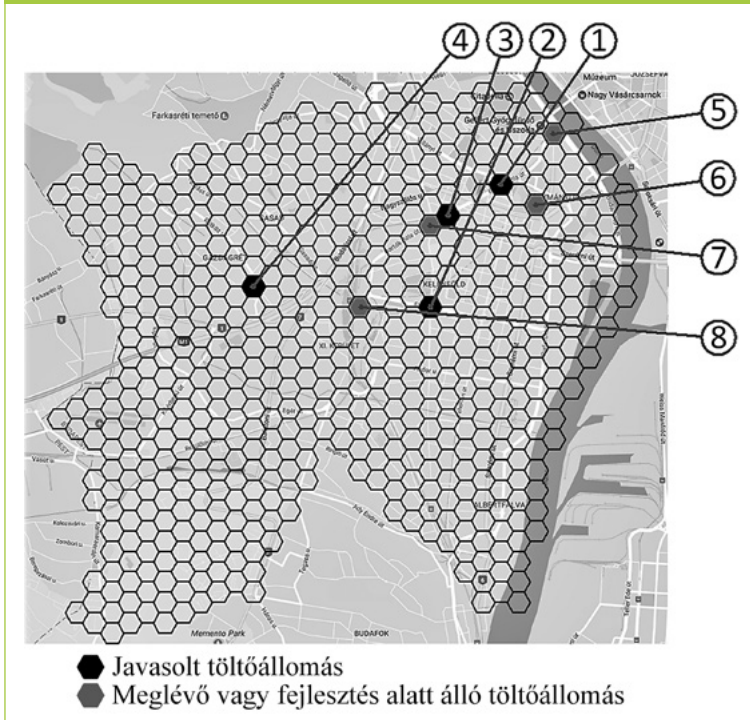
| q (hexagon ID) | W_q |
|----------------|-------|
| 1 | 4,11 |
| 2 | 3,38 |
| 3 | 3,19 |
| 4 | 3,12 |
| Σ | 13,8 |

Meghatároztuk a gyakorlati eredő potenciál értéket a meglévő 4 db töltőállomásra (6. táblázat).

6. táblázat: A meglévő töltőállomást tartalmazó hexagonok töltőtelepítési potenciál értéke

| q (hexagon ID) | W_q |
|----------------|-------|
| 5 | 3,44 |
| 6 | 2,94 |
| 7 | 2,57 |
| 8 | 1,73 |
| Σ | 10,68 |

5. ábra: Meglévő és javasolt töltőállomás helyszínek



A már meglévő töltőállomások gyakorlati eredő potenciálja lényegesen alacsonyabb, mint a legvonzóbb hexagonok elméleti eredő potenciál értéke ($\Sigma W_q' \ll \Sigma W_q$). Megállapítottuk, hogy a meglévő 4 db töltőállomás nem elégíti ki annyi töltési igényt, mint amennyit kielégítene a legvonzóbb helyszínekre telepíthető 4 db töltőállomás. Ezért további töltőállomás(ok) telepítése javasolt, amíg a $\Sigma W_q'$ el nem éri vagy meg nem haladja az elméleti eredő potenciál értékét, vagyis adott esetben a 13,8-at. Ennek megfelelően értékeltük a még üres hexagonokat figyelembe véve a meglévő töltőállomásokat. Megállapítottuk, hogy ha a meglévő állomásokhoz hozzáadunk egy további, akkor már nagyobb a gyakorlati eredő potenciál, mint az elméleti; így teljesül a telepítési feltétel. Például, ha a $q=2$ hexagonban ($W_2=3,38$) elhelyezünk egy töltőállomást, akkor az új $W_q''=14,06$.

Mivel a makró szintű értékelés során eredetileg 4 db új töltőállomás telepítése ajánlott a

kerületben, de figyelembe véve a meglévő töltőállomásokat már egy új töltőállomással is teljesíthető a telepítési feltétel (elvárt szolgáltatási színvonal), ezért 3 db töltőállomás újraszotható makró szinten a többi területi egység között.

A meglévő és ajánlott töltőállomás helyszíneket az 5. ábra szemlélteti. Megállapítottuk, hogy mind az elméleti telepítendő ($q=1..4$), mind a meglévő ($q=5..6$) töltőállomások a kerület hasonló jellegű részein található. Mivel a meglévő töltőállomások helyszíne befolyásolja a telepítési potenciált, a legkedvezőbb ($q=1$) helyszínen töltőállomás telepítése

nem ajánlott. Megfigyelhető továbbá, hogy a 4 db ajánlott helyszíni térbeli eloszlása homogén. Végezetül megállapítottuk, hogy egyik ajánlott hexagon sem tartalmaz benzinkutat, az elérhető szolgáltatások hiánya, valamint a benzinkutak környékén jellemző alacsony lakosságszám miatt.

5. KONKLÚZIÓ

Kétlépcsős, multikritériumos módszert dolgoztunk ki a városi elektromos gyorstöltő állomások helyszíneinek kijelölésére. A módszer újdonsága, hogy a területhasználatra helyezi a hangsúlyt a forgalomnagyság és honnan-hová utazások helyett. További újszerűség, hogy mikró szinten a helyszínek vonzereje a felhasználói elvárásoknak megfelelő töltési igények alapján számolható. Összegezve, a kidolgozott módszer legfőbb előnye, hogy nem igényel honnan-hová utazási adatokat, csak statikus, nyilvánosan elérhető területhasználati adatokat vesz figyelembe.

A módszer használatával képzett eredmények alátámasztják, hogy a forgalomvonzó létesítményekhez, valamint nagy lakosságszámú területek közelébe - ahol az otthoni privát töltés nem lehetséges - telepített töltőállomások szolgálják ki leginkább a töltési igényeket.

Jövőbeli kutatási terveink között szerepel a módszer továbbfejlesztése figyelembe véve a smart grid (okos hálózat) technológiát, vagyis a kétirányú energiaáramlást a villamoshálózat és a jármű között. Továbbá egy töltőpontszám becslő módszer dolgozunk ki figyelembe véve az elektromos személygépjárművek számának becsült növekedését.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Mesterséges Intelligencia (BME FIKP-MI/FM) tématerületi programja keretében.

Ez a cikk egy olyan projekt része, amely az ERA-NET COFUND Electric Mobility Europe (EMEurope) keretében nyert támogatást, az Innovációs és Technológiai Minisztériummal kötött ZFF254/2018-ITM_SZERZ. számú támogatási megállapodás keretében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Casals, L.C., Martinez-Laserna, E., García, B.A., Nieto, N. 2016. Sustainability analysis of the electric vehicle use in Europe for CO2 emissions reduction. *Journal of Cleaner Production*, 127:425-437. <http://doi.org/c48p>
- [2] Skrucany, T., Semanova, S., Figlus, T., Sarkan, B., Gnapp, J. 2017. Energy Intensity and GHG Production of Chosen Propulsions Used in Road Transport. *Communications*, 2017/2: 3-9.
- [3] Knez, M., Jereb, B., Obrecht, M. 2014. Factors influencing the purchasing decisions of low emission cars: A study of Slovenia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 30:53-61. <http://doi.org/f6c5vt>
- [4] Koryagin, M. 2017. Urban Planning: a Game Theory Application for the Travel Demand Management. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(4): 171-178. <http://doi.org/c48q>
- [5] Gong, L., Fu, Y., Li, Z. 2016. Integrated planning of BEV public fast-charging stations. *The Electricity Journal*, 29(10):62-77. <http://doi.org/ch7s>
- [6] Lokowska, A., Kurowicka, D., Papaefthymiou, G., van der Sluis, L. 2011. From transportation patterns to power demand: Stochastic modeling of uncontrolled domestic charging of electric vehicles. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 24-29 July 2011. pp. 1-7. <http://doi.org/dzbtbh>
- [7] Liang, H., Sharma, I., Zhuang, W., Bhattacharya, K. 2014. Plug-in electric vehicle charging demand estimation based on queueing network analysis. 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, 27-31 July 2014. pp. 1-5. <http://doi.org/c48r>
- [8] Arias, M.B., Bae, S. 2016. Electric vehicle charging demand forecasting model based on big data technologies. *Applied Energy*, 183:327-339. <http://doi.org/f9kqv7>
- [9] Zhang, P., Wu, X., Wang, X., Bi, S. 2015. Short-term load forecasting based on big data technologies. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 1(3):59-67. <http://doi.org/c48s>
- [10] Arias, M.B., Kim, M., Bae, S. 2017. Prediction of electric vehicle charging-power demand in realistic urban traffic networks. *Applied Energy*, 195:738-753. <http://doi.org/f97nbz>
- [11] Liu, Z., Wen, F., Ledwich, G. 2013. Optimal Planning of Electric-Vehicle Charging Stations in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1):102-110. <http://doi.org/f4jwvv>
- [12] Awasthi, A., Venkitesamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumar, R., Blaabjerg, F., Singh, A.K. 2017. Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm. *Energy*, 133:70-78. <http://doi.org/gbwkmg>

- [13] Ip, A., Fong, S., Liu, E. 2010. Optimization for Allocating BEV Recharging Stations in Urban Areas by Using Hierarchical Clustering. 6th International Conference on Advanced Information Management and Service (IMS), 30 November - 2 December 2010. pp. 460-465.
- [14] Ge, S., Feng, L., Liu, H. 2011. The Planning of Electric Vehicle Charging Station Based on Grid Partition Method. International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE, 16-18 September 2011. pp. 2726-2730 <http://doi.org/b6wndf>
- [15] Hess, A., Malandrino, F., Reinhardt, M.B., Casetti, C., Hummel, K.A., Barceló-Ordinas, J.M. 2012. Optimal Deployment of Charging Stations for Electric Vehicular Networks. ACM Conference on the 1st Workshop on Urban Networking, CoNEXT UrbaNe, 10 December 2012. <http://doi.org/c48t>
- [16] Cromley, R.G., Lin, J., Merwin, D.A. 2011. Evaluating representation and scale error in the maximal covering location problem using GIS and intelligent areal interpolation. International Journal of Geographical Information Science, 26(3):495-517. <http://doi.org/c7r2jx>
- [17] Wei, R., Murray, A.T. 2014. Evaluating Polygon Overlay to Support Spatial Optimization Coverage Modeling. Geographical Analysis, 46(3):209-229. <http://doi.org/f6fhd2>
- [18] Frade, I., Riberioe, A., Gonçalves, G.A., Antunes, A.P. 2011. Optimal Location of Charging Stations for Electric Vehicles in a Neighborhood in Lisbon, Portugal. Transportation Research Record, 2252:91-98. <http://doi.org/c48v>
- [19] Chen, D.T., Kockelman, K.M., Khan, M. 2013. The Electric Vehicle Charging Station Location Problem: A Parking-Based Assignment Method For Seattle, Washington. Transportation Research Record, 2385:28-36. <http://doi.org/c48w>
- [20] Andrenacci, N., Ragona, R., Valenti, G. 2016. A demand-side approach to the optimal deployment of electric vehicle charging stations in metropolitan areas. Applied Energy, 182:39-46. <http://doi.org/f9b8qq>
- [21] Shirmohammadli, A., Vallée, D. 2017. Developing a location model for fast charging infrastructure in urban areas. International Journal of Transport Development and Integration, 1(2):159-170. <http://doi.org/cxk4>
- [22] Gavranović, H., Barut, A., Ertek, G., Yüzbaşıoğlu, O.B., Pekpostalcı, O., Tombuş, Ö. 2014. Optimizing the electric charge station network of EŞARJ. Procedia Computer Science. 31:15-21, <http://doi.org/c48x>
- [23] Alegre, S., Míguez, J.V., Carpio, J. 2017. Modelling of electric and parallel-hybrid electric vehicle using Matlab/Simulink environment and planning of charging stations through a geographic information system and genetic algorithms. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74:1020-1027. <http://doi.org/gbgwvk>
- [24] Huang, K., Kanaroglou, P., Zhang, X. 2016. The design of electric vehicle charging network. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 49:1-17. <http://doi.org/f9gcvq>
- [25] Xi, X., Sioshansi, R., Marano, V. 2013. Simulation-optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. Transport Research Part D: Transport and Environment, 22:60-69. <http://doi.org/f43bvg>
- [26] Upchurch, C., Kuby, M. 2010. Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations. Journal of Transport Geography, 18:750-758. <http://doi.org/d9pk5x>
- [27] Yao, W., Zhao, J., Wen, F., Dong, Z., Xue, Y., Xu, Y., Meng, K. 2014. A Multi-Objective Collaborative Planning Strategy for Integrated Power Distribution and Electric Vehicle Charging Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 29(4):1811-1821. <http://doi.org/f579rr>
- [28] He, F., Yin, Y., Zhou, J. 2015. Deploying public charging stations for electric vehicles on urban road networks. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 60:227-240. <http://doi.org/f7z97x>
- [29] Alhazmi, Y.A., Mostafa, H.A., Salama, M.M.A. 2017. Optimal allocation for electric vehicle charging stations using Trip Success Ratio. International Journal of

Electrical Power & Energy Systems, 91:101-116. <http://doi.org/gfqnqr>

- [30] Cai, H., Jia, X., Chiu, A.S.F., Hu, X., Xu, M. 2014. Siting public electric vehicle charging stations in Beijing using big-data informed travel patterns of the taxi fleet. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 33:39-46. <http://doi.org/f6sb89>
- [31] Shahraki, N., Cai, H., Turkyay, M., Xu, M. 2015. Optimal locations of electric public charging stations using real world vehicle travel patterns. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 41:165-176 <http://doi.org/f74mdm>
- [32] Yin, X., Zhao, X. 2016. Planning of electric vehicle charging station based on real time traffic flow. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 17-20 October 2016. <http://doi.org/ch7w>
- [33] Daniels, R., Mulley, C. 2011. Explaining walking distance to public transport: the dominance of public transport supply. World Symposium on Transport and Land Use Research, Whistler Canada, 28-30 July 2011. <http://doi.org/gc5tt7>



The method of determining the location of EV charging stations in urban areas

Fully electric vehicles reduce local air and noise pollution and contribute to sustainable transport. Their widespread is, however, limited by the long charging time and the lack of infrastructure required for charging. The article focusses on the latter problem. It presents a multicriteria method developed by the authors, evaluating the territorial units in two steps, using a greedy algorithm to identify possible locations for the urban EV charging station network. The novelty of the method is that, compared to previous ones, the demand for charging stations is estimated by taking into account the average income of the area, the number of electric vehicles, the tourist attractions, the number of inhabitants, the characteristics of the residential area and the traffic-generating facilities. The applicability of the method is presented through the example of Budapest's 11th district.



Die Methode zur Standortbestimmung von Ladestationen für Elektrofahrzeuge in städtischen Gebieten

Vollelektrische Fahrzeuge reduzieren die lokale Luft- und Lärmbelastigung und tragen zu einem nachhaltigen Verkehr bei. Ihre Verbreitung ist jedoch durch die lange Ladezeit und die fehlende Lade-Infrastrukturen begrenzt. Der Artikel konzentriert sich auf das letztere Problem. Es wird eine von den Autoren entwickelte multikriterielle Methode vorgestellt, bei der die territorialen Einheiten in zwei Schritten bewertet werden, wobei ein gieriger Algorithmus verwendet wird, um mögliche Standorte für das städtische EV-Ladestationsnetzwerk zu identifizieren. Die Neuheit des Verfahrens besteht darin, dass die Nachfrage für Ladestationen im Gegensatz zu den vorherigen Methoden, mit der Berücksichtigung des durchschnittlichen Einkommens des Gebiets, der Anzahl der Elektrofahrzeuge, der touristischen Attraktionen, der Einwohnerzahl, der Merkmalen des Wohngebiets und der verkehrserregenden Einrichtungen eingeschätzt wird. Die Anwendbarkeit der Methode wird am Beispiel des 11. Bezirks in Budapest dargestellt.