

Térinformatikai módszerek alkalmazása a budapesti forgalomirányítási rendszerben

Farkas-Németh Zoltán^{1,2} – Török Zsolt Győző¹

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet

² Budapest Közút Zrt.

E-mail: zoltorok@inf.elte.hu, zoltanfarkasnemeth@gmail.com

DOI: [10.30921/GK.78.2026.2.4](https://doi.org/10.30921/GK.78.2026.2.4)

Absztrakt

A tanulmányban a Budapest Közút Zrt. ITS-rendszerére épülő térinformatikai módszertant ismertettük. A detektoros hálózat egyenetlen térbeli lefedettsége, a rendszeres adat kiesések és az időjárás forgalomra gyakorolt hatása olyan problémák, amelyek kezeléséhez nem elegendő az egyes mérőpontok adatait önállóan vizsgálni. Az általunk kidolgozott megközelítés a hálózat gráf-struktúráját, a csomóponti fokszámon alapuló topológiai adatterjesztést (2°: öröklés, 3°+: megállás, geometriától függetlenül a hálózati szerkesztés alapján), a Voronoi-alapú meteorológiai hozzárendelést és a napszak–naptípus–időjárás szerinti kontextualizálást együttesen alkalmazza. A kontextualizálás szükségességét 160 csomópont több mint 20 millió mérési rekordján végzett, anonimizált elemzéssel igazoltuk: a csapadék a reggeli csúcspanakban a csomópontok 93%-ánál átlagosan 13,6%-os forgalomművekedést okoz, a szabadidős és célforgalmi helyszíneken viszont 10–20%-os csökkenést. A módszertan gyakorlati alkalmazásának kerete a Google–BKK harmonizált lámpahangoló rendszer vizsgálata volt.

Kulcsszavak: térinformatika, forgalomszámláló detektor, topológiai adatterjesztés, térbeli interpoláció, Voronoi-poligon, DATEX II, ITS

Abstract

This study presents a geoinformatics methodology built upon the ITS system operated by Budapest Public Roads (Budapest Közút Zrt.). The uneven spatial coverage of the detector network, recurrent data loss, and the influence of weather conditions on traffic constitute challenges that cannot be adequately addressed by analysing individual measurement points in isolation. The proposed approach integrates the graph structure of the network, topology-based data propagation using node degree (2°: inheritance; 3°+: termination, independent of geometry and based on network editing), Voronoi-based meteorological attribution, and contextualization according to time of day, calendar type, and weather conditions. The necessity of contextualization is demonstrated through an anonymized analysis of more than 20 million measurement records from 160 intersections: precipitation increases traffic volume at 93% of intersections during the morning peak (by 13.6% on average), while recreational and destination-type locations show a decrease of 10–20%. The practical application of the methodology is demonstrated through the analysis of the harmonized traffic signal control system jointly developed by Google and BKK.

Keywords: GIS, traffic detector, topological data propagation, spatial interpolation, Voronoi diagram, DATEX II, ITS

1. Bevezetés

A városi közlekedési rendszerek adatkezelésében az elmúlt évtizedben egyre nagyobb szerepet kapott a térbeli szemlélet. A forgalmi adatokat nem elegendő egyedi mérőpontként kezelni; a hálózati összefüggések ismerete nélkül sem a torlódások terjedése, sem az adathiányok kezelése nem érthető meg megfelelően. A térinformatika ezt a hálózati és területi értelmezést segíti. A hurokdetektor-hálózatok adatminőségi problémáival – hiányzó vagy érvénytelen mérések detektálása és pótlása – a nemzetközi szakirodalomban Chen et al. (2003) foglalkozott először rendszerszinten: a California Department of Transportation közel 15 000 hurokdetektorán kidolgozott

eljárásuk a szomszédos mérőpontok lineáris kapcsolatát használta fel az adathiány pótlásához, az adott napokra és időszakra jellemző, historikus minták alapján. Az elemzés kimutatta, hogy az idősor egészének vizsgálata – szemben az egyéni mérési értékekkel – lényegesen megbízhatóbb hibadetekciót eredményez. A jelen tanulmányban bemutatott módszertan ezekre az elvekre épít, de a budapesti hálózat topológiai sajátosságaihoz alkalmazza azokat.

Budapest úthálózata radiális-koncentrikus szerkezetű, így a belvárosba befutó főutak csomópontjain keletkező torlódás gyorsan hat a szomszédos szakaszokra. A Budapest Közút Zrt. (a továbbiakban: Budapest Közút) ITS (Intelligent Transportation System) fejlesztéseiben ezért egyre inkább érvényesül az az elv, hogy a mért adatokat a hálózat egészének kontextusában kell

értelmezni. A tanulmányunkban bemutatott módszertan ehhez a rendszerhez illeszkedve készült, és jelenleg egy olyan műszaki tervezési fázisban van, amelynek célja a forgalomirányítási rendszerbe való integráció megalapozása.

2. A Budapest Közút Zrt. forgalomfigyelő rendszere

A Budapest Közút intelligens közlekedési rendszere (Intelligent Transportation System, ITS) a 2010-es évek eleje óta folyamatos fejlesztés alatt áll. A rendszer Budapest közigazgatási területét, valamint az agglomerációs főúthálózat egyes szakaszait fedi le.

Az adatgyűjtést mikrohullámú és induktív elvű forgalomszámláló detektorok végzik, amelyek 5 perces aggregált értékeket rögzítenek: forgalomnagyságot (jármű/óra), foglaltságot (%) és átlagsebességet (km/h). Az adatok a TASS (Traffic Analysis Support System) belső platformon tárolódnak és kerülnek minőség-ellenőrzésre. A nyilvánosan közzétett adatkör – forgalmi események és sebességadatok – a TN-ITS (Trans-European Transport Network Intelligent Transport Systems) keretrendszerben, DATEX II formátumban jelenik meg; ezt használja fel többek között a TomTom, a HERE és a Huawei is.

A detektorok térbeli kezelésének alapja a Budapest Közút Zrt. által fenntartott fővárosi tengelyhálózat (axis network), amelyhez minden mérőpont és útszakasz-jellemző hozzá van rendelve. A feldolgozási folyamatokat az FME (Feature Manipulation Engine) szoftver automatizálja: ez az eszköz különböző forrású térbeli és nem térbeli adatokat fűz össze, alakít át és tölt be a célrendszerekbe.

3. Az adatalapú forgalomirányítás nemzetközi előzményei

A forgalomirányítás adatokra épülő, valós idejű vezérlése az 1970-es évek végén jelent meg először városi léptékben. Az első rendszerek hurokdetektorok másodpercenkénti impulzusait dolgozták fel, és a jelzőlámpa-kapcsolási tervet ciklikusan korrigálták a mért forgalomhoz. Az azóta eltelt négy évtizedben a módszerek fokozatosan összetettebbekké váltak: a pontszerű mérésből hálózati koordináció lett, majd a GPS-alapú úsjárműadatok és végül a gépi tanulás is beépült a forgalomirányítási döntéshozatalba.

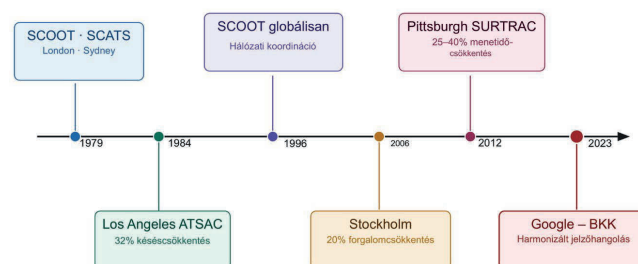
Az adatalapú forgalomirányítás nemzetközi fejlődésének főbb állomásait az 1. ábra foglalja össze.

3.1 SCOOT és SCATS: az első adaptív rendszerek (1979)

1979-ben két, egymástól függetlenül fejlesztett rendszer indult el, amelyek a mai napig a legelterjedtebb adaptív jelzőlámpa-

vezérlők alapját képezik. A brit SCOOT (Split Cycle Offset Optimisation Technique) minden jelzőlámpás csomópontnál a

Az adatalapú forgalomirányítás nemzetközi fejlődése (1979–2023)



1. ábra Az adatalapú forgalomirányítás nemzetközi fejlődése (1979–2023)

hurokdetektorok ciklusszintű forgalomadataiból három paramétert – a zöld idő megosztását (split), a ciklusidőt (cycle) és a léptetési eltolást (offset) – apró lépésekben, folyamatosan igazítja (Hunt et al. 1981).

Az ausztrál SCATS (Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System) ezzel egyidőben jelent meg: a csomópontokat klaszterekbe fogja, és a klaszterek teltségét (degree of saturation) veszi alapul a kapcsolási terv meghatározásához (Lowrie 1982). A SCOOT mára 350-nél több városban üzemel világszerte (TRL Software 2026); a SCATS pedig az ausztrál és ázsiai nagyvárosok meghatározó rendszere.

3.2 ATSAC: egy nagyvárosi léptékű automatizálás (1984)

Los Angelesben 1984-ben, az olimpia előkészítéseként vezették be az ATSAC (Automated Traffic Surveillance and Control) rendszert. A 118 csomóponttal induló rendszer 2021-re közel 4 850 csomópontra bővült, így a világ legnagyobb összefüggő, központilag irányított adaptív jelzőlámpa-rendszere lett; az artériás utakon a megállási késedelmet 32%-kal csökkentette (LADOT 2022).

3.3 Stockholm: keresletszabályozás valós idejű adatokkal (2006)

A stockholmi dugódíj-kísérlet (2006. január–július) az adatalapú forgalomszabályozás kereslet-oldali alkalmazásának legérdekesebben vizsgált példája: a belvárost körülvevő kordonon napszaktól függő úthasználati díjat szedtek. A kordonon átkelő forgalom 22%-kal csökkent a bevezetés előtti évhez képest, a csúcsidős torlódás mértéke 30–50%-kal mérséklődött, és a kísérletet követő népszavazás a rendszer állandósítása mellett döntött (Eliasson et al. 2009).

3.4 SURTRAC: mesterséges intelligencia a jelzőlámpa-vezérlésben (2012)

A Carnegie Mellon Egyetemen fejlesztett SURTRAC (Scalable URban TRAffic Control) 2012-ben indult kísérleti üzemből Pittsburgh kilenc csomópontján. Újdonsága az elosztott, csomópontonként futó, prediktív ütemező algoritmus: minden jelzőlámpa-vezérlő önállóan, a szomszédos csomópontoktól érkező előrejelzések felhasználásával, 1–2 másodpercenként újraoptimalizálja a kapcsolási ütemtervet (Xie–Smith–Barlow 2012). A teszten a menetidő több mint 25%-kal rövidült, a várakozási idő átlagosan 40%-kal csökkent a korábbi fix kapcsolási tervhez képest (Smith et al. 2013); a rendszer azóta több városban is üzemel (Smart Cities Dive 2017).

4. Forgalmi detektorhálózatok térinformatikai elemzése

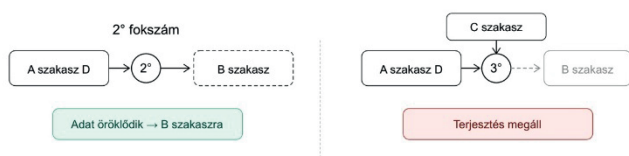
4.1 A térbeli lefedettség problémája

A forgalomszámláló detektorok elhelyezése jellemzően nem statisztikai mintavételezési elvek szerint történik. A telepítési döntéseket a rendelkezésre álló infrastruktúra, a beavatkozási prioritások és a költségvetési lehetőségek határozzák meg, ami egyenetlen térbeli lefedettséghez vezet. Budapesten is kerületenként eltérő a detektorsűrűség, és ez közvetlenül hat arra, hogy az adatok mennyire reprezentálják a valós forgalmi állapotot.

Első lépésként azt határozzuk meg, mely útszakaszok tekinthetők egy adott detektor hatókörén belülnek. A légvonalbeli távolság önmagában félrevezető lehet, mert a hálózati távolság, a csomóponti szerkezet és a forgalom iránya együttesen döntik el, hogy egy útszakasz adata mennyire kötődik az adott mérőponthoz.

4.2 GIS-alapú detektor–útszakasz hozzárendelés

A detektor–útszakasz hozzárendelés elvégzéséhez nem elegendő a geometriai közelség vizsgálata. Egy puffer-alapú megközelítés figyelmen kívül hagyja, hogy az úthálózat gráf, amelyen a kapcsolatok iránya és a csomóponti szerkezet meghatározó (Miller–Shaw 2001). Az itt javasolt módszertan az ESRI ArcGIS Network Analyst bővítményének logikáját követi, de kifejezetten forgalmi alkalmazásokra igazított algoritmusokat alkalmaz.



2. ábra Topológiai adatterjesztés: az örökítési módszer használata

A detektor–útszakasz hozzárendelés során nemcsak a távolságot, hanem az irányultságot is figyelembe vesszük. Ha egy, a detektorhoz közel eső útszakasz iránya a detektor mérési irányához képest $\pm 30^\circ$ -os tartományon belül esik, azt potenciálisan relevánsnak tekintjük. A $\pm 30^\circ$ -os küszöbérték megválasztása korábbi, a Budapest Közút Zrt.-nél végzett fejlesztési munkán alapul: a sebességkorlátozó táblák tengelyhálózathoz való, dinamikus hozzárendelésekor az FME-alapú folyamat ugyancsak $\pm 30^\circ$ -os iránytoleranciával operált (Farkas–Németh–Pusztai–Török 2023). Az örökítési módszer működését a 2. ábra szemlélteti.

4.3 Adathiány-típusok gyakorisági eloszlása

A detektorok kiesése rendszeres jelenség: kommunikációs hiba, szoftverfrissítés vagy fizikai meghibásodás egyaránt okozhat adathiányt. A kiesés időtartama döntően befolyásolja, hogy a hiány melyik módszerrel pótolható ésszerűen. Rövid kiesések esetén a szomszédos detektorok adatai közvetlen alapot adnak a becsléshez; több órás kiesésekre a szomszédsági korreláció gyengül, és historikus mintákon alapuló megközelítés szükséges. Chen et al. (2003) a kaliforniai hurokdetektor-hálózaton kimutatta, hogy az idősor egészére kiterjedő diagnosztika lényegesen megbízhatóbb, és a szomszédos mérőpontok lineáris kapcsolatán, valamint historikus profilokon alapuló kétféle pótlás megbízhatóbb eredményt ad, mint az egyszintű módszerek.

5. Topológiai adatterjesztés a közlekedési hálózatban

5.1 Hálózat-analitikus megközelítés

Habár a nem mért útszakaszok forgalmi adatainak becslése első közelítésben térbeli interpolációs feladatnak látszik, a hagyományos módszerek – kriging, illetve IDW (Inverse Distance Weighting) – közvetlenül nem alkalmazhatók, mert légvonalbeli távolságon alapulnak, nem az úthálózaton megtett tényleges úthosszon. A hálózati távolságra épített interpoláció lényegesen megbízhatóbb eredményt ad, amint ezt Joelianto et al. (2022) szurabájai vizsgálata is megerősíti.

Az általunk alkalmazott topológiai adatterjesztés a gráfelméleti foksám fogalmán alapul. A foksám (jelölése: n°) azt adja meg, hogy egy csomópont-hoz összesen hány útszakasz csatlakozik. Az öröklés feltétele: a csomópont-hoz kizárólag a bemenő és a kimenő szakasz kapcsolódik – ez a 2° eset. Ilyenkor a mért forgalmi értéket átvisszük a szomszédos szakaszra. Ha viszont a csomópont-hoz bármilyen más szakasz is csatlakozik, a foksám 3° vagy magasabb lesz, és a terjesztés megáll. Fontos hangsúlyozni, hogy az öröklés logikája a hálózati szerkesztésen alapul, nem a geometrián (Lóki–Demeter 2009).

5.2 Térbeli autokorrelációs vizsgálatok

A topológiai terjesztés mögötti feltevés – vagyis, hogy a szomszédos szakaszokon hasonló forgalmi viszonyok jellemzőek – statisztikailag igazolt: a közlekedési hálózatokon mért adatok szignifikánsan pozitív térbeli autokorrelációt mutatnak. A Moran-féle I mutató alapján szomszédosnak tekintett útszakaszok értékei szisztematikusan jobban hasonlítanak egymásra, mint a véletlenszerűen kiválasztott pároké (Oláh et al. 2025). A napi, havi és szezonális forgatókönyvekben mért globális Moran-féle I értékek rendre 0,52, 0,34 és 0,35 voltak (Török et al. 2026).

6. Multitemporális térinformatikai adatintegráció

6.1 Az idő-dimenzió térinformatikai kezelése

A forgalom térben és időben együttesen változó jelenség: azonos szakaszon reggel és este, hétköznap és hétvégén, nyáron és télen más-más értékeket mérünk. Az elemzéshez ezért az időbeli dimenziót a térbeli mellé kell rendelni – erre szolgál a téridő-kocka konceptuális modellje (Hägerstrand 1970), amellyel a forgalomirányítási adatok ciklikus mintái feltárhatók.

Saját fejlesztésünkben minden mérési rekordhoz hozzárendeljük az ún. naptípust: munkanap, szombat, vasárnap, munkaszüneti nap, iskolaszünet vagy áthelyezett munkanap. Egy munkaszüneti nap előestéje forgalmi szempontból teljesen más képet mutat, mint egy átlagos hétköznap.

6.2 A forgalmi sebesség változása és a meteorológiai adatok integrációja

A detektoros mérések azt mutatják, hogy esős vagy havas időben a mért átlagsebesség az azonos napszakra és naptípusra jellemző száraz időszaknál alacsonyabb. A HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. mérőállomásai nem egyenletesen fedik le Budapestet és környékét. Az egyes útszakaszokhoz azt az állomást rendeljük, amelyik hozzá a legközelebb esik – ezt a felosztást a Voronoi-poligonok módszerével végezzük el (Okabe et al. 2000).

A számítás során Budapest közigazgatási határát rávetítjük a Voronoi-rácsra, amelyet a fővárosi és a Pest vármegyei állomásokra együttesen határozzunk meg. A Voronoi-alapú hozzárendelés matematikailag a legközelebbi szomszéd elvét valósítja meg, ami az interpolációs módszerek közül a legegyszerűbb – ez azonban ebben a kontextusban tudatos tervezési döntés: a forgalomirányítási rendszer valós idejű döntéstámogatási környezetben fut, ahol a determinisztikus, egyértelműen reprodukálható hozzárendelés fontosabb követelmény, mint a maximális interpolációs pontosság.

A hozzárendelt állomásokról jelenleg egyetlen paramétert veszünk át minden mérési rekordhoz: a csapadékösszeget. A csapadék kiválasztását az indokolja, hogy a forgalomra kettős hatást gyakorol. Egyrészt közvetlenül befolyásolja a forgalmi sebességet: jelenléte csökkenti a tapadást és a látótávolságot, ami mérhető sebességcsökkenéshez vezet. Másrészt a közlekedésmód-választásra is hat, hiszen csapadékos időben többen választják az egyéni gépjárműves közlekedést a tömegközlekedés, a gyaloglás vagy a kerékpározás helyett, ami a hálózat forgalmi terhelését is megnöveli. A HungaroMet állomásai a léghőmérsékletet és a szélsősebességet is szolgáltatják; ezek forgalmi hatásának számszerűsítése – például a fagyveszély vagy a nyílt, hídon futó szakaszok szélterheltségének figyelembevétele – a jövőbeli kutatás irányát jelöli ki, ehhez azonban a meteorológiai és a forgalmi idősorok összekapcsolásának további módszertani fejlesztése szükséges. A minősítés alapegysége a negyedórás mérési rekord: csapadékosnak minősül, ha a hozzárendelt állomáson a csapadékösszeg eléri a 0,1 mm-t, egyébként száraz besorolást kap.

7. Térbeli adathiány-kezelési stratégiák

7.1 Térbeli interpolációs módszerek forgalmi alkalmazásban

Az adathiány-kezelés a detektoros hálózatok visszatérő problémája, amellyel a nemzetközi szakirodalom is kiterjedten foglalkozik. Chen et al. (2003) a szomszédos hurokdetektorok lineáris összefüggésén alapuló, historikus profilokat is felhasználó módszere az egyik legelterjedtebb kiindulópont; Joelianto et al. (2022) szurabájai vizsgálata – 285 urbánus detektor adatain – azt mutatta ki, hogy a városon belüli térbeli hálózat bevonása robusztusabb pótlást ad, mint az egyedi detektorra épülő módszer, különösen egésznapos adathiány esetén. Chen és Sun (2022) Bayes-féle temporális faktorizációs (BTF) kerete, amellyel az alacsony rangú mátrix- és tenzorfaktorizáció vektoros autoregresszív folyamattal integrálódik, városi forgalmi és légszennyezési adatsorokon egyaránt megbízható pótlást és előrejelzést ad.

Az alábbiakban azt a megközelítést ismertetjük, amelyet ezekre az elvekre támaszkodva, a Budapest Közút hálózatának sajátosságaihoz igazítva dolgoztunk ki. A módszer lényege: a kieső detektor helyett a hálózaton keresztül elérhető legközelebbi működő mérőpontok adatait vesszük alapul, de kizárólag akkor, ha azok időbeli és időjárási kontextusa megegyezik a hiányzó mérésével – reggeli csúcsforgalmi adatot csak reggeli csúcsforgalmi referenciával becsülünk.

7.2 Geostatistikai megközelítések adaptációja

A geostatistikai módszerek hálózatokra szabott változata, az ún. network kriging, a hálózati geometriát és a forgalom

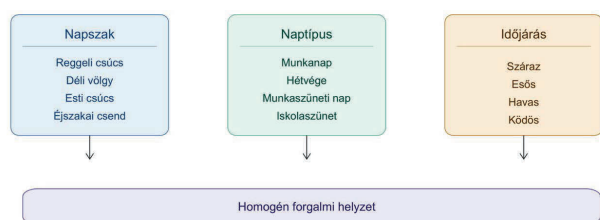
irányultságát is beépíti a variogramba. Sűrű belvárosi hálózatokon, ahol sok szomszédos mérőpont áll rendelkezésre, ez a megközelítés eredményesen alkalmazható: a hálózati távolságon alapuló variogram-számítás szignifikánsan pontosabb interpolációt ad, mint a hagyományos, euklideszi módszer.

8. Gyakorlati alkalmazás és eredmények

8.1 Forgalmi adatok természeti és társadalmi kontextusba helyezése

A forgalomirányítási rendszer által mért, nyers detektoros adatok – forgalomnagyság, foglaltság, átlagsebesség – önmagukban nem értelmezhetők anélkül, hogy ismernénk azt a természeti és társadalmi környezetet, amelyben keletkeztek. Ugyanaz a mért sebességérték más-más jelentéssel bír egy hétköznapi reggeli csúcsban, egy havas vasárnap délelőttön, vagy egy munkaszüneti nap előestéjén.

Az időbeli kontextus három fő dimenzióból épül fel. A napszak meghatározza, hogy a mérés reggeli csúcsforgalmi időszakba (6–9 h), déli völgybe, esti csúcsba (15–18 h) vagy éjszakai csendes időszakba esik-e. A naptípus besorolás – hétköznapi, szombat, vasárnap, ünnepnap, iskolaszünet, áthelyezett munkanap – a keresleti oldal társadalmi mintázatát tükrözi. A szezonális tényező a naptári időszakot jelöli ki. napszak, a naptípus és az időjárás együttese adja azt az értelmezési keretet, amelyben a nyers mérési adatok a harmonizált forgalmi hatássá állnak össze (3. ábra).



3. ábra A forgalmi detektorok mérési adatainak kontextualizált keretrendszere

8.2 Az időjárás hatás számszerűsítése a budapesti detektorhálózaton

A kontextuális megközelítés indokoltságát a detektorhálózat saját mérésein vizsgáltuk. Az elemzés 160 budapesti jelzőlámpás csomópont detektoradataira terjedt ki a 2024. novembere és 2026. márciusa közötti időszakban, összesen több mint 20 millió negyedórás mérési rekord alapján. Csomópontonként a csapadékos és a száraz órák átlagos forgalomnagyságát hasonlítottuk össze; a statisztikai megbízhatóság érdekében csak

a legalább 50 csapadékos órával rendelkező csomópontokat (147 db) értékeltük.

Csapadékos körülmények között a vizsgált csomópontok 84%-ánál nőtt a mért forgalomnagyság a száraz referenciához képest; a növekedés átlagosan 7,3% (medián: 5,0%) volt. A reggeli csúcsidőszakban a növekedés átlagosan 13,6% (medián: 12,4%), és a csomópontok 93%-ánál jelentkezik. A délutáni csúcsban viszont az átlagos eltérés mindössze 4,5%, a medián 0,8%, és a csomópontoknak már csak 54%-ánál mérhető növekedés.

Nagy kapacitású, sugárirányú főúti csomópontokon a reggeli csúcsban 40–60%-os forgalomnövekedést is mértünk csapadékos időben. Ezzel szemben a szabadidős célforgalmú, hegyvidéki helyszíneken 15–20%-os csökkenés jellemző, és a bevásárlóközponti célforgalmat kiszolgáló csomópontokon is 10–20%-kal alacsonyabb a csapadékos időszakok forgalma.

8.3 A Google–BKK harmonizált lámpahangoló rendszer vizsgálata

A kifejlesztett módszertan alkalmazási keretét a Google és a BKK (Budapesti Közlekedési Központ) 2023 októberében elindított, harmonizált lámpahangoló rendszere adja (BKK 2023). A rendszer célja a jelzőlámpák kapcsolásának a tényleges forgalomhoz igazítása volt Budapest több főútvonalán. A Google saját mérései szerint a beavatkozás nyomán az érintett csomópontokon az álló járművek aránya legfeljebb 30%-kal csökkent, a csomóponti emissziók pedig legfeljebb 10%-kal mérséklődtek (Google 2024).

A fentiekben leírt topológiai adatterjesztéssel olyan útszakaszokon is kapunk forgalmi becslést, ahol nincs közvetlen mérés. A szomszédos detektorok adatait hálózati távolság és a csomóponti fokszám alapján súlyozzuk, és az így kapott érték a lámpahangoló rendszer bemeneteként felhasználható. Ez a módszertan jelenleg műszaki tervezési fázisban van; a fővárosi rendszerbe való illesztés részleteinek kimunkálása folyik.

9. Következtetések és kitekintés

A tanulmányban saját kutatásaink alapján három, egymásra épülő módszertani elemet mutattunk be. Az első a detektor–útszakasz hozzárendelés, amely irányalapú szűrővel pontosabb lefedettségű képet ad, mint a hagyományos puffer-alapú megközelítés. A második a topológiai adatterjesztés: az adat akkor öröklődik a szomszédos szakaszra, ha a csomóponthoz a két érintett szakaszon kívül semmi más nem csatlakozik (2°); bármilyen más csatlakozó szakasznál a terjesztés megáll ($3^\circ+$). A harmadik a kontextuális adatkezelés: minden mérési rekordhoz hozzárendeljük a naptípust, a napszakot és az időjárás állapotot.

A Google–BKK lámpahangoló rendszer vizsgálata megmutatta, hogy a lefedetlen szakaszok becslése és az időjárás kontextus kezelése a budapesti forgalomirányítási döntéshozatalban valós, gyakorlati igény. A detektorhálózat 160 csomópontjának másfél éves idősorán végzett elemzésünk számszerűen is igazolta a

kontextualizálás szükségességét: a csapadék hatása a reggeli csúcsban a csomópontok 93%-ánál forgalomnövekedésként (átlagosan +13,6%), a szabadidős és célforgalmi helyszíneken viszont 10–20%-os csökkenésként jelentkeznek. Az új módszertan jelenleg a műszaki tervezési fázisban van; a forgalomirányítási rendszerbe való illesztés részleteinek kidolgozása a Budapest Közútnál folyik.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Budapest Közút Zrt. ITS-csapatának az adatokhoz való hozzáféréseért és a módszertani fejlesztések támogatásáért.

Irodalomjegyzék

- BKK 2023: A Google és a BKK harmonizált lámpahangolással segíti a közlekedőket Budapesten. <https://bkk.hu/hirek/2023/10/a-google-es-a-bkk-harmonizalt-lampahangolassal-segiti-a-kozlekedeket-budapesten.10992/> (Letöltés dátuma: 2024. október 20.)
- Chen, C. – Kwon, J. – Rice, J. – Skabardonis, A. – Varaiya, P. 2003: Detecting errors and imputing missing data for single-loop surveillance systems. *Transportation Research Record* 1855: 160–167. DOI: 10.3141/1855-20
- Chen, X. – Lei, M. – Saunier, N. – Sun L. 2022b: Low-rank autoregressive tensor completion for spatiotemporal traffic data imputation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23(8): 12301–12310. DOI: 10.1109/TITS.2021.3113608
- Chen, X. – Sun, L. 2022: Bayesian temporal factorization for multidimensional time series prediction. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 44(9): 4659–4673. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3066551
- Chen, Y. 2021: An analytical process of spatial autocorrelation functions based on Moran's index. *PLOS ONE* 16(4): e0249589. DOI: 10.1371/journal.pone.0249589
- Eliasson, J. – Hultkrantz, L. – Nerhagen, L. – Smidfelt Rosqvist, L. 2009: The Stockholm congestion-charging trial 2006: Overview of effects. *Transportation Research Part A* 43(3): 240–250. DOI: 10.1016/j.tra.2008.09.007
- Farkas-Németh, Z. – Pusztai, G. – Török, Zs. Gy. 2023: Sebességkorlátozó táblák dinamikus hozzárendelése tengelyhálózatokhoz. In: Lóki J. (szerk.): *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában XIV.* Debreceni Egyetem, Debrecen, pp. 107–112.
- Google 2024: 2024 Environmental Report. Google LLC, Mountain View. <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2024-environmental-report.pdf> (Letöltés dátuma: 2026. március 3.)
- Hägerstrand, T. 1970: What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association* 24(1): 6–21.
- Hunt, P. B. – Robertson, D. I. – Bretherton, R. D. – Winton, R. I. 1981: SCOOT – A traffic responsive method of co-ordinating signals. TRRL Laboratory Report 1014. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Jaelianto, E. – Fathurrahman, M. F. – Sutarto, H. Y. – Semajnski, I. – Putri, A. – Gautama, S. 2022: Analysis of spatiotemporal data imputation methods for traffic flow data in urban networks. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11(5): 310. DOI: 10.3390/ijgi11050310
- LADOT 2022: Automated Traffic Surveillance and Control (ATSAC). Los Angeles Department of Transportation, Los Angeles. <https://ladot.lacity.gov/vehicles-streets/traffic-management/automated-traffic-surveillance-and-control-atsac> (Letöltés dátuma: 2024. október 20.)
- Lóki, J. – Demeter, G. 2009: *Geomatematika.* Debreceni Egyetem, Debrecen, 266 p.
- Lowrie, P. R. 1982: SCATS: Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System – A traffic responsive method of controlling urban traffic. Roads and Traffic Authority, Sydney.
- Miller, H. J. – Shaw, S.-L. 2001: *Geographic Information Systems for Transportation: Principles and Applications.* Oxford University Press, Oxford, 458 p.
- Okabe, A. – Boots, B. – Sugihara, K. – Chiu, S. N. 2000: *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams.* John Wiley & Sons, Chichester, 671 p.
- Oláh, Sz. – Kozma, K. – Barsi, Á. 2025: Pontfelhők geometriai és attribútumtorzulásai. *Geodézia és Kartográfia* 77(3): 18–26. DOI: 10.30921/GK.77.2025.3.3
- Smart Cities Dive 2017: This AI traffic system in Pittsburgh has reduced travel time by 25%. Smart Cities Dive. <https://www.smartcitiesdive.com/news/this-ai-traffic-system-in-pittsburgh-has-reduced-travel-time-by-25/447494/> (Letöltés dátuma: 2024. október 20.)
- Smith, S. F. – Barlow, G. J. – Xie, X.-F. – Rubinstein, Z. B. 2013: Smart Urban Signal Networks: Initial Application of the SURTRAC Adaptive Traffic Signal Control System. *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling* 23(1): 434–442. DOI: 10.1609/icaps.v23i1.13594
- Török, Zs. Gy. – Zhang, X. – Wang, X. 2026: Multi-scale spatiotemporal GIS mapping of urban flood risk hotspots in Zhengzhou: implications for adaptation strategies. *Environmental Systems Research* 15: 10. DOI: 10.1186/s40068-025-00447-x
- TRL Software 2026: SCOOT – Intelligent Signal Control. TRL Software, Wokingham. <https://trlsoftware.com/software/intelligent-signal-control/scoot/> (Letöltés dátuma: 2026. március 3.)
- Wang, X. – Jerome, Z. – Wang, Z. – Zhang, C. – Shen, S. – Kumar, V. V. – Bai, F. – Krajewski, P. – Deneau, D. – Jawad, A. – Jones, R. – Piotrowicz, G. – Liu, H. X. 2024: Traffic light optimization with low penetration rate vehicle trajectory data. *Nature Communications* 15: 1306. DOI: 10.1038/s41467-024-45427-4
- Xie, X. – Smith, S. F. – Barlow, G. J. 2012: Schedule-driven coordination for real-time traffic network control. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2012).* AAAI Press, Menlo Park, pp. 323–331. DOI: 10.1609/icaps.v22i1.13510