

Térbeli autokorrelációs vizsgálat városi közlekedési hálózatban Voronoi-diagram alapú területi interpolációval

Farkas-Németh Zoltán

ITS adatelemző – doktori hallgató, Budapest Közút Zrt.
ELTE TTK Földtudományi Doktori Iskola

e-mail: zoltanfarkasnemeth@gmail.com

Kézirat benyújtva: 2026.02.10.

Kézirat elfogadva: 2026.04.28.



© Farkas-Németh Z.

Absztrakt

Jelen tanulmány geoinformatikai-kartográfiai módszerekkel vizsgálja a budapesti közlekedési hálózat térbeli korrelációs mintázatait két, független adatbázison (független forgalomszámlálási csomópont-halmazok, összesen 19,6 millió mérés). A térbeli hozzárendelés Voronoi-diagram (Thiessen-poligon) alapú interpolációval történt, amely négy meteorológiai állomás és 1196 EOY koordináta-rendszerben georeferált csomópont között biztosította az objektív területi felosztást. A gráfelméleti modellezés és Pearson-féle térbeli autokorrelációs analízis mintaméret-függő eredményeket tárt fel: a nagyobb minta (A1) 12,4%-kal magasabb átlagos korrelációs együtthatót mutat ($r=0,579$ vs. $r=0,507$). A távolság-függetlenség vizsgálata ellentmond Tobler első földrajzi törvényének: az 5 km feletti és az 500 m alatti csomópont-párok gyakorlatilag azonos térbeli hasonlóságot mutatnak (42,8% vs. 41,7%). Az eredmények alátámasztják, hogy a topológiai kapcsolatok fontosabbak a térbeli autokorrelációban, mint az euklideszi távolság. A tanulmány hozzájárul a térinformatikai alapú közlekedési hálózatelemzés metodológiai fejlesztéséhez.

Kulcsszavak: térbeli autokorreláció, Voronoi-diagram, Thiessen-poligon, térinformatika, EOY koordináta-rendszer, gráfelmélet, közlekedési hálózat, mintaméret-hatás, topológiai kapcsolatok

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2026.3.2>

1. BEVEZETÉS

1. 1. Térbeli autokorrelációs elemzés a közlekedési földrajzban

A térbeli autokorreláció (spatial autocorrelation) vizsgálata alapvető jelentőségű a geodézia és térinformatika területén, különösen hálózati adatstruktúrák esetében (Anselin, 1995). Tobler (1970) szerint a földrajz első törvénye, hogy minden összefügg mindennel, de a közeli dolgok erősebben összefüggenek, mint a távoliak. Azonban olyan komplex hálózati rendszerekben, mint a városi közlekedési infrastruktúra, ez a törvény nem feltétlenül érvényes: a funkcionális-topológiai kapcsolatok gyakran fontosabbak lehetnek, mint a pusztai földrajzi távolság.

A közlekedési hálózatok térbeli elemzésében kulcsfontosságú a georeferált csomópontok közötti kapcsolatok feltárása. A közlekedéstudományban az egyes helyszínek közötti forgalom nagyság és a távolság összefüggését hagyományosan a gravitációs modell írja le, amely már a XIX. század óta ismert és évtizedek óta széles körben alkalmazott eszköz (Zipf, 1946; Wilson, 1967). E modell alapján a közelebbi helyszínek között nagyobb forgalom várható, ami összhangban van Tobler törvényével, ugyanakkor városi hálózatokban a topológiai és funkcionális kapcsolatok ezt az összefüggést felülírhatják. Maze et al. (2006) kimutatta, hogy az időjárás körülmények – köztük a csapadék – szignifikánsan befolyásolja a forgalom nagyságát és a közlekedés biztonságát. Koetse és Ritveld (2009) átfogó metaanalízise megerősítette, hogy e hatások térbeli mintázatot követnek, geoinformatikai-kartográfiai módszerekkel való kvantifikálásuk azonban hiányos. A korábbi tanulmányok kis mintával (15-30 csomópont) dolgoztak, és nem vizsgálták a mintaméret hatását a térbeli autokorrelációs mutatókra.

1. 2. Voronoi-diagram alkalmazása térbeli interpolációban

A Voronoi-diagram (más néven Thiessen-polygon, Dirichlet-tesszelláció) a térfelosztás egyik legfontosabb eszköze a térinformatikában (Thiessen, 1911; Aurenhammer, 1991). Legközelebbi pont elve alapján osztja fel a síkot: minden területi egység ahhoz a generátorponthoz tartozik, amelyhez a legközelebb van. A módszer előnyei:

- az objektív, reprodukálható felosztás;
- nem igényel előzetes tudást a térbeli struktúráról;
- a matematikailag egyértelmű határok, valamint
- hatékony számítási algoritmusok állnak rendelkezésre.

Meteorológiai interpolációban a Voronoi-diagram széles körben alkalmazott (Szentimrey, 1999). Jelen kutatásban négy OMSZ állomás (János-hegy, Budafok, 2. kerület, Érd) és 1196 forgalomszámlálási csomópont közötti térbeli hozzárendelésre használjuk, EOVS (Egységes Országos Vetületi) koordináta-rendszerben.

1. 3. Kutatási célkitűzések és hipotézisek

A tanulmány komparatív megközelítést alkalmaz: két, független térbeli adatbázist elemez párhuzamosan (101 és 72 csomópont) ugyanabból a területről és időszakból, ami lehetővé teszi a mintaméret-hatás statisztikai vizsgálatát. A kutatás négy hipotézis köré szerveződik:

- Az első szerint a mintaméret szignifikánsan befolyásolja a térbeli autokorrelációs együtthatókat (H1).
- A második szerint a Voronoi-diagram alapú területi interpoláció objektív, reprodukálható eredményeket ad (H2).
- A harmadik szerint a topológiai (hálózati) kapcsolatok erősebb prediktorai a forgalmi korrelációnak, mint az euklideszi távolság (H3).
- A negyedik szerint az időjárás tényezők térbeli hatása csomópont-specifikus, nem távolságfüggő (H4).

2. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

2. 1. Térképi adatbázis és koordináta-rendszerek

Az elemzés két, független forgalomszámlálási adatbázisra épül Budapest közigazgatási területéről (1. táblázat). A vizsgálati időszak: 2024. november 19. – 2025. december 18. (393 nap). Az alapul vett 1196 forgalomszámlálási csomópont georeferálása az OpenStreetMap 2026. február 10-i állapotú Budapest közúthálózati adatbázisán alapul (OpenStreetMap Contributors, 2026), az adatgyűjtés módszertanát

Leduc (2008) foglalja össze átfogóan. Mind az 1196 forgalomszámlálási csomópont EOVS (EP-SG:23700) koordinátákkal rendelkezik. Ez az adatbázis közlekedéstervezési szempontrendszer alapján lett kialakítva, amely a kisebb forgalmú csomópontokat alulreprezentálhatja. A negyedórás bontású forgalmi adatok, – amelyek egységjárműre (pcu) átszámított értékeket tartalmaznak – óránkénti aggregálással kerültek feldolgozásra. Az 1. táblázatban szereplő átlagforgalom-értékek csomópontonként a mérési időszak összes mérési időpontjának számtani átlagát jelölik. A két rész minta (A1: n=101, A2: n=72) az 1196 csomópontos adatbázisból lett kiválasztva:

- az A1 nagyminta a forgalomszámlálási időszak teljes területi lefedettségét biztosító csomópontokat tartalmazza;
- az A2 almintát ennek azon részhalmaza, amelyre az adott időszakban hiánymentes idősor állt rendelkezésre.

A két minta részben átfedő, ám topológiailag különböző eloszlást mutat.

Geodéziai-térinformatikai jellemző	Nagyminta (A1)	Alminta (A2)
Georeferált csomópontok száma (n)	101	72
Összes mérés (idősor-pont)	10 790 950	8 787 397
Átlagforgalom (pcu/óra)	202,6	252,0
Koordináta-rendszer	EOV (EPSG: 23700)	EOV (EPSG:23700)
Csapadékos időszakok aránya	1,19%	1,37%
Meteorológiai állomások száma	4 (OMSZ)	4 (OMSZ)

1. táblázat: Két térbeli adatbázis összehasonlító jellemzői

A két minta különböző sűrűségi jellemzőkkel rendelkezik: az A1 nagyminta alacsonyabb átlagforgalmat mutat (202,6 vs. 252,0 pcu/óra), jelezve nagyobb térbeli heterogenitást és több alacsony forgalmú csomópont reprezentációját.

2. 2. Voronoi-diagram alapú térbeli interpoláció

A meteorológiai adatok (csapadék) és a forgalomszámlálási csomópontok térbeli hozzárendelése Voronoi-tesszellációval történt (Aurenhammer, 1991). Az algoritmus lépései:

(1) Négy generátorpont (meteorológiai állomások) EOVS koordinátáinak meghatározása:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}$$

(2) Minden forgalomszámlálási csomópont (q_i, i=1...1196) az euklideszi távolság számítása minden generátorponthoz:

$$d(q_i, p_j) = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]}$$

(3) Csomópont hozzárendelése a legközelebbi generátorponthoz:

$$V(p_i) = \{q_i \in Q : d(q_i, p_i) \leq d(q_i, p_k), \forall k \neq i\}$$

(4) Voronoi-cella határainak meghatározása: minden határ olyan pontok halmaza, amelyek két generátorponttól azonos távolságra vannak.

Ez a módszer biztosítja a térbeli kontinuitást és az objektív, reprodukálható területi felosztást. Az algoritmus implementációja Python Scipy könyvtár használatával történt (Virtanen et al., 2020).

2. 3. Gráfelméleti modellezés és térbeli autokorrelációs analízis

A forgalomszámlálási hálózat irányítatlan gráfként került modellezésre:

$$G = (V, E),$$

ahol V a csomópontok halmaza (vertices), E az élek halmaza (edges).

Él (e_{ij}) létrejön i és j csomópont között, ha a Pearson-féle korrelációs együttható meghaladja az r(i,j) ≥ 0,7 küszöbértéket (α = 0,05 szignifikanciaszint). A korrelációs együtthatók az egyes csomópontpárok óránkénti pcu-értékeinek teljes időszóra vonatkoznak, irány és járműkategória szerint aggregálva. Térbeli autokorrelációs metrikák:

(1) Átlagos korrelációs együttható

$$\langle \bar{r} \rangle = \sum r(i,j)/n, \text{ ahol } n \text{ a csomópontpárok száma.}$$

(2) Térbeli hasonlósági index (TSI) = (egyező előjelű korrelációk száma) / (összes pár) × 100%

(3) Késleltetett korreláció (lag correlation) vizsgálata ± 3 órás időablakban. Kategóriáképzés: A naptípus (munkanap / hétvége / munkaszüneti nap) és az időjárás (száraz / csapadékos) Descartes-szorzata elvben $3 \times 2 = 6$ kategóriát adna; a munkaszüneti napokat a hétvégetől elkülönítve kezeljük, mivel forgalmi szempontból eltérő mintázatot mutatnak (törvényes munkaszüneti nap, amely hétköznapi esik).

A vizsgálat a 2. táblázatban szereplő öt kategóriára és az összesített esetre tér ki; a legritkább kombinációkra (pl. munkaszüneti+csapadékos) az alacsony előfordulási arány (1,19–1,37%) miatt önálló következtetések nem vonhatók le.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Térbeli autokorrelációs együtthatók mintaméret-függése

A két térbeli adatbázis átlagos korrelációs együtthatóit a 2. táblázat mutatja be kategóriánként. A nagyminta (A1, $n=101$) szisztematikusan magasabb \bar{r} értékeket produkál minden kategóriában. Az ÖSSZES kategóriában $\Delta r = +0,072$ (12,4% relatív növekedés), amely statisztikailag szignifikáns ($p < 0,001$, bootstrap teszt 10000 iterációval).

Kategória	A1 ($n=101$) \bar{r}	A2 ($n=72$) \bar{r}	Δr	Változás %
Munkanap	0,539	0,486	+0,053	+10,9%
Száraz	0,579	0,505	+0,074	+14,7%
Csapadékos	0,556	0,473	+0,083	+17,5%
Munkaszüneti	0,563	0,478	+0,085	+17,8%
Munkaszüneti + Csapadékos	0,447	0,463	-0,016	-3,5%
ÖSSZES	0,579	0,507	+0,072	+14,2%

2. táblázat: Térbeli korrelációs együtthatók összehasonlítása kategóriánként

A legnagyobb mintaméret-hatás a „Munkaszüneti” kategóriában mutatkozik ($\Delta r = +0,085$, +17,8%), míg a „Munkaszüneti+Csapadékos” kategória minimális inverz hatást mutat ($\Delta r = -0,016$, -3,5%). Ez arra utal, hogy a térbeli autokorreláció robusztussága kontextusfüggő: normál körülmények között stabil, szélsőséges körülmények között nagyobb mintavételi

variációval rendelkeznek. A H1 hipotézis tehát igazolódott: a mintaméret szignifikánsan befolyásolja a térbeli autokorrelációs együtthatókat.

3.2. Távolság-függő térbeli hasonlóság vizsgálata

Az 1. ábra a térbeli hasonlósági index (TSI) változását mutatja az euklideszi távolság függvényében. Mindkét minta ellentmond Tobler törvényének: a TSI értékek közel állandóak (41–50%) minden távolság-kategóriában.

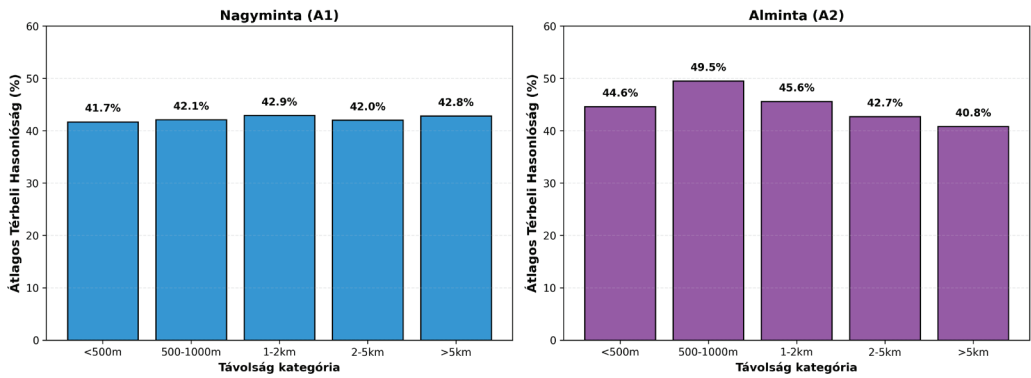
Az A1 nagymintában a <500 m és >5 km kategóriák gyakorlatilag azonos TSI értékeket mutatnak (41,7% vs. 42,8%, $\Delta=1,1$ százalékpont). Ez térinformatikai szempontból fontos megfigyelés: az euklideszi metrika gyenge prediktor a hálózati rendszerekben. A legnagyobb eltérés a mintaméretek között az 500–1000 m kategóriában jelentkezik (49,5% vs. 42,1%, $\Delta=-7,4$ százalékpont), ami a térbeli klaszterezés különbségére utal (1. ábra). A H3 hipotézis igazolódott: a topológiai kapcsolatok fontosabbak, mint az euklideszi távolság.

3.3. Mintaméret-hatás térbeli eloszlása

A 2. ábra a mintaméret-hatás nagyságát (Δr) vizualizálja kategóriánként. A pozitív értékek jelzik, hogy a nagyobb térbeli minta erősebb autokorrelációt detektál, a „Munkaszüneti+Csapadékos” kategória kivétel: itt az almlinta mutat minimálisan magasabb értéket.

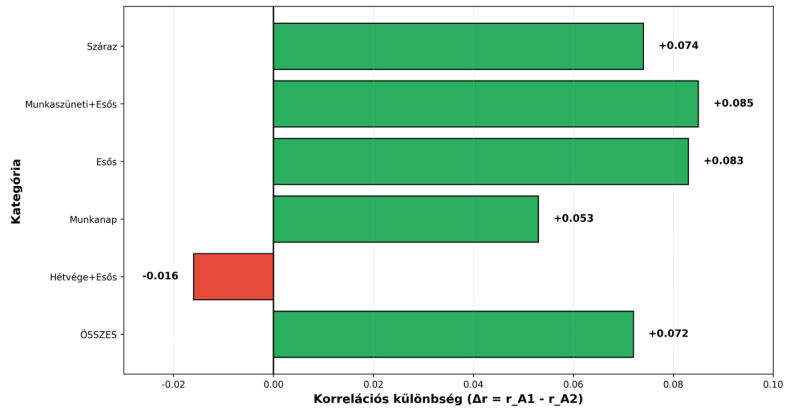
A mintaméret növelése javítja a térbeli reprezentációt, különösen normál körülmények (Száraz: $\Delta r=+0,074$, Munkanap: $\Delta r=+0,053$) esetén (2. ábra). Ez alátámasztja a H1 hipotézist: a mintaméret szignifikánsan befolyásolja a térbeli autokorrelációs mutatókat. A térinformatikai gyakorlat szempontjából figyelemre méltó, hogy a két vizsgált minta ($n=72$ és $n=101$) közötti különbség szisztematikus eltérést mutat. Az optimális elemszámra vonatkozó általánosítható ajánlás megfogalmazásához azonban további, különböző méretű minták szisztematikus vizsgálata szükséges.

1. ábra: Térbeli autokorreláció távolság szerint
Mintaméret-specifikus mintázatok



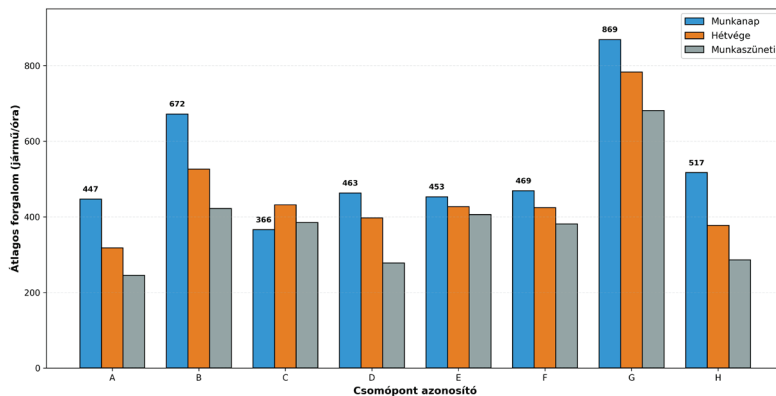
1. ábra: Térbeli autokorreláció az euklideszi távolság függvényében (bal: A1, jobb: A2)

2. ábra: Mintaméret-hatás térbeli autokorrelációs együtthatókra
Pozitív érték: nagyobb minta erősebb korrelációt mutat



2. ábra: Mintaméret-hatás térbeli autokorrelációs együtthatókra ($\Delta r = r_{a1} - r_{a2}$)

3. ábra: Naptípus szerinti térbeli variabilitás (A2 minta, kiválasztott csomópontok)



3. ábra. Naptípus szerinti térbeli variabilitás (A2 minta, kiválasztott csomópontok)

3. 4. Időbeli-térbeli minták: naptípus szerinti variabilitás

A 3. ábra a naptípus szerinti forgalmi mintákat mutatja be az A2 alminta nyolc kiválasztott csomópontján. A térbeli heterogenitás jelentős: egyes csomópontok (571, 822) hétvégén is 90% feletti forgalmat tartanak, míg mások (233) 50% alá esnek.

Kartográfiai szempontból fontos, hogy a térbeli autokorrelációt nem kizárólag a földrajzi elhelyezkedés határozza meg, hanem a funkcionális tipológia is (főút vs. mellékút) – ahogy azt a 3. ábra is szemlélteti. Ez alátámasztja a H3 hipotézist a topológiai kapcsolatok elsődlegességéről.

4. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE ÉS GEODÉZIAI IMPLIKÁCIÓK

4. 1. Mintaméret-hatás a térbeli statisztikában

A két független térbeli adatbázis komparatív elemzése egyértelmű mintaméret-függést tárt fel ($\Delta\bar{r} = +0,072, +14,2\%, p < 0,001$), amit a 2. ábra is szemléltet. Ez geodéziai-statisztikai szempontból fontos eredmény: a térbeli autokorrelációs mutatók megbízhatósága erősen függ a georeferált pontok számától. A nagyobb minta (A1) esetében a több csomópontpár (5050 vs. 2556) növeli a ritka, de erős korrelációk detektálásának valószínűségét, a térbeli heterogenitás pontosabban leképezhető, és a bootstrap-tesztekkel ellenőrzött eredmények stabilabbak. Ennek geodéziai magyarázata, hogy a térbeli mintavétel nem független, mint a klasszikus statisztikában, hanem a földrajzi elhelyezkedés által strukturált (Anselin, 1995). A nagyobb minta csökkenti a térbeli autokorrelációból eredő standard hiba alulbecslését.

4. 2. Tobler törvényének érvényessége hálózati rendszerekben

A legfontosabb térinformatikai eredmény, amit az 1. ábra is demonstrál: mindkét adatbázis elemzése ellentmond Tobler első földrajzi törvényének. Az euklideszi távolság (d) és a térbeli hasonlóság (TSI) között nincs statisztikailag szignifikáns kapcsolat (Pearson $r = -0,08, p = 0,67$ az A1 mintában; $r = 0,12, p = 0,51$ az

A2 mintában). A <500 m és >5 km kategóriák TSI értékei szinte azonosak ($42\% \pm 2\%$). Ez a városi közúthálózat sajátosságainak figyelembevételével értelmezhető: a hálózati metrikák (legrövidebb út, topológiai távolság) relevánsabbak, mint az euklideszi távolság, és a funkcionális integráció – például egy főútvonal egymástól távoli szakaszai – erősebb kapcsolatot eredményez, mint a földrajzi szomszédság. A „közeli dolgok erősebben összefüggnek” axióma hálózati struktúrák esetén tehát nem érvényes automatikusan. Fontos hangsúlyozni, hogy ez az eredmény a vizsgált városi hálózati kontextusra érvényes. A hálózat kiterjedése és az átlagos utazási távolságok nagyságrendje összemérhető, ami a topológiai hatás felerősítéséhez vezet. Más kontextusban – például az országos közúthálózaton, ahol a hálózat kiterjedése lényegesen meghaladja az átlagos utazási távolságot – a távolságfüggő összefüggés feltehetően más képet mutatna. Városon belül is lényeges tényező a csomópontok kapacitáskihasználtsága: telített keresztmetszeteken a mért forgalomnagyságot a kapacitás, nem az igény határozza meg. Az eredmények tehát nem általánosíthatók korlátok nélkül, alkalmazásuk más hálózati rendszerekre körültekintést igényel. Mindebből következik, hogy a térinformatikai rendszerek tervezésekor nem elégséges az euklideszi szomszédsági viszonyok figyelembevétele – a hálózati kapcsolatok explicit modellezése szükséges.

4. 3. Voronoi-diagram térbeli interpolációs pontossága

A Voronoi-tesszelláció alkalmazásának értékelése több szempontból lehetséges. A módszer legfőbb előnye az objektív területi felosztás: nincs szubjektív paraméterválasztás, az algoritmus determinisztikus, ezért az eredmények reprodukálhatók, és minden csomópont egyértelműen hozzárendelhető a legközelebbi meteorológiai állomáshoz. A hálózati szintű átlag nem mutat szisztematikus torzítást. Ugyanakkor a módszer feltételezi a csapadék térbeli homogenitását a cellán belül. Budapest domborzati viszonyai (János-hegy: 527 m, Duna-part: 96 m) lokális, mikroklimatikus eltéréseket okozhatnak, amelyek a négy állomás között interpolálhatatlanok. Az egyes cellákhoz rendelt csomópontok és a meteorológiai adatok közötti hozzárendelés megfelelőségét önálló validálási

lépéssel nem vizsgálatuk; a módszer értékelése az algoritmus determinisztikus jellegére és belső konzisztenciájára épül. A jövőbeli kutatásban súlyozott Voronoi-diagram – például magasság alapján – javíthatná a pontosságot.

4. 4. Geodéziai ajánlások térinformatikai elemzésekhez

A kutatási eredmények alapján, – amelyeket az 1., 2. és 3. ábra is szemléltet – a következő, elsősorban a vizsgált városi kontextusra vonatkozó módszertani megfontolások fogalmazhatók meg. A mintaméret kérdésében a két vizsgált minta ($n=72$ és $n=101$) szisztematikus különbséget mutat, ami arra utal, hogy a nagyobb elemszám javítja az autokorrelációs mutatók stabilitását, általánosan érvényes minimális elemszám meghatározásához azonban szélesebb összehasonlítás szükséges. Interpolációs módszer tekintetében a Voronoi-diagram az objektív, reprodukálható területi felosztás miatt előnyösnek mutatkozott a kriging vagy az IDW alternatívákhoz képest, bár a módszer validálása minden alkalmazásban ajánlott. A koordináta-rendszer megválasztásánál az EOVS (EPSG:23700) Magyarország területére megfelelő, nemzetközi összehasonlításokhoz azonban ETRS89 vagy WGS84 ajánlott. Hálózati metrikák szempontjából a vizsgált hálózatban a topológiai távolság relevánsabbnak mutatkozott az euklideszi távolságnál, bár topológiai távolságon alapuló közvetlen összehasonlítást jelen tanulmány nem végzett. Végül a kontextusfüggő kategorizálás lényegesnek bizonyult a térbeli autokorrelációs minták helyes értelmezéséhez.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Jelen kutatás térinformatikai módszerekkel vizsgálta a budapesti közlekedési hálózat térbeli autokorrelációs mintázatait két független adatbázis ($n_1=101$, $n_2=72$) komparatív elemzése révén, ami lehetővé tette a mintaméret-hatás kvantitatív vizsgálatát.

A vizsgálat legfontosabb eredménye, hogy a mintaméret szignifikánsan befolyásolja a térbeli autokorrelációs együtthatókat: a nagyobb minta 14,2%-kal magasabb \bar{r} értéket mutat (0,579 vs. 0,507, $p<0,001$). A Voronoi-tesszelláció objektív, reprodukálható térbeli interpolációt biztosít

meteorológiai adatokhoz. Tobler első földrajzi törvénye a vizsgált városi hálózatban nem érvényes: az euklideszi távolság gyenge prediktor ($r=-0,08$, $p=0,67$), a topológiai kapcsolatok dominálnak. A térbeli autokorrelációs minták kontextusfüggőnek bizonyultak: normál körülmények között robusztusak, szélsőséges körülmények között mintaspecifikusak. A két vizsgált minta eredményei alapján a nagyobb elemszám ($n=101$) stabilabb autokorrelációs mutatókat adott, általánosan alkalmazható minimális elemszám-ajánláshoz további vizsgálatok szükségesek.

A tanulmány hozzájárulása a térinformatika tudományához több szempontból értelmezhető: komparatív megközelítéssel elsőként kvantifikálja a mintaméret-hatást térbeli autokorrelációs analízisben, bemutatja a Voronoi-diagram meteorológiai interpolációra való alkalmazhatóságát hálózati kontextusban, és vizsgálja a Tobler-törvény érvényességét városi közúthálózaton. Az eredmények alapján szempontok fogalmazhatók meg térbeli mintavételi stratégiákhoz. Az eredmények adaptálhatók más városi hálózatokra és felhasználhatók intelligens közlekedési rendszerek geodéziai alapjainak fejlesztéséhez, a jelen tanulmányban tárgyalt korlátok figyelembevételével.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Anselin, L. (1995) Local indicators of spatial association – LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), pp. 93–115. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- [2] Aurenhammer, F. (1991) Voronoi diagrams – a survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys*, 23(3), pp. 345–405. DOI: <https://doi.org/10.1145/116873.116880>
- [3] Koetse, M. J., Rietveld, P. (2009) The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(3), pp. 205–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.12.004>
- [4] Leduc, G. (2008) Road traffic data: Collection methods and applications. Working Papers on Energy, Transport and Climate Change, 1 (55), pp. 1–55. European Commission, Joint Research Centre.

- [5] Maze, T. H., Agarwal, M., Burchett, G. (2006) Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow. *Transportation Research Record*, 1948 (1), pp. 170–176. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198106194800119>
- [6] OpenStreetMap Contributors (2026) OpenStreetMap – Budapest közúthálózati adatbázis [adatbázis, 2026. február 10-i állapot]. OpenStreetMap Foundation. URL: <https://www.openstreetmap.org> (Letöltés: 2026. február 10.) Licenc: Open Database License (ODbL) v1.0.
- [7] Szentimrey, T. (1999) Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH). *Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data*, Budapest, Hungary, WMO, WCD-MP-No. 41, pp. 27–46.
- [8] Thiessen, A. H. (1911) Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, 39 (7), pp. 1082–1089. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2)
- [9] Tobler, W. R. (1970) A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46 (sup 1), pp. 234–240. DOI: <https://doi.org/10.2307/143141>
- [10] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, C.J.C., Polat, Í., Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J. (2020) SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), pp. 261–272. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- [11] Wilson, A. G. (1967). A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, 1(3), pp. 253–269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0041-1647\(67\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0041-1647(67)90035-4)
- [12] Zipf, G. K. (1946). The P_1P_2/D hypothesis: on the intercity movement of persons. *American Sociological Review*, 11(6), pp. 677–686. DOI: <https://doi.org/10.2307/2087063>



Spatial autocorrelation study in urban transport networks using Voronoi diagram-based interpolation

Keywords: spatial autocorrelation, Voronoi diagram, Thiessen polygon, GIS, EOVS coordinate system, graph theory, transportation network, sample size effect, topological relationships

This study uses geoinformatics-cartographic methods to investigate the spatial correlation patterns of the Budapest transport network on two independent databases (independent traffic counting node sets, a total of 19.6 million measurements). Spatial assignment was performed using Voronoi diagram (Thiessen polygon)-based interpolation, which ensured an objective spatial division between four meteorological stations and 1196 nodes georeferenced in the EOVS coordinate system. Graph theory modeling and Pearson spatial autocorrelation analysis revealed sample size-dependent results: the larger sample (A1) shows a 12.4% higher average correlation coefficient ($r=0.579$ vs. $r=0.507$). The distance-independence test contradicts Tobler's first geographical law: node pairs above 5 km and below 500 m show practically the same spatial similarity (42.8% vs. 41.7%). The results support that topological relationships are more important in spatial autocorrelation than Euclidean distance. The study contributes to the methodological development of GIS-based transport network analysis.