

Tudományos közlemény

Harántirányú közösségi közlekedési útvonalak utasszámának meghatározása

Beküldve: 2023.12.18.
Elfogadva: 2024.07.07.
Online közzététel: 2024.11.29.

DR. SZABÓ ZSOMBOR integrált közlekedési szakértő, tudományos munkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Köszolgáltatási Igazgatóság, Központi Közlekedésszervező Iroda; tanársegéd, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedés- és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, szabo.zsombor@kti.hu

Kivonat: Hazánk közlekedési rendszere történelmi adottságok miatt sugaras-körutas szerkezetű, ami azt jelenti, hogy a közlekedési rendszer központjából – Budapestről – sugárirányban húzódnak a fő közlekedési útvonalak, amelyeket harántirányban egyéb kapcsolatok egészítenek ki. Megfigyelhető továbbá, hogy az agglomerációs települések lakosságszámának növekedésével a hagyományos településszerkezet a budapesti agglomerációban fokozatosan átalakul, amelynek következtében a térségben a közlekedés iránti igény rendszere átalakul, az itt húzódó harántirányú útvonalak szerepe felértékelődik. Kutatásomban arra keresem a választ, hogy hogyan lehet térszerkezeti adatok segítségével meghatározni ezen harántirányú vonalak utasvonzó képességét. Ehhez példaként Budapest közlekedési rendszerét vettem, ugyanis ebben az esetben hosszú időre visszamenő utasszám adatok érhetők el. Véleményem szerint az itt megfigyelt sajátosságok alkalmasak lehetnek arra, hogy a modellt – bizonyos megkötések mellett – kiterjesszem a közeli városkörnyékre is.

Kulcsszavak: térstatisztika; távolság-hányatlás arány; térökonometria közforgalmú közlekedés; harántirányú kapcsolatok

Determination of the number of passengers on transversal public transport routes

Abstract: Our country's transport system has a radial-circular structure due to historical circumstances, which means that the main transport routes run radially from the centre of the transport system – Budapest – which are complemented by other connections in the transverse direction. It can also be observed that with the increase in the population of the suburb, the traditional settlement structure in the surroundings of Budapest is gradually changing, as a result of which the system of demand for transport in the region is changing, and the role of the transversal routes here is being valued. In my research, I am looking for the answer to how the passenger-attracting capacity of these transversal lines can be determined with the help of spatial structure data. I took Budapest's transport system as an example because, in this case, passenger number data going back a long time are available. In my opinion, the peculiarities observed here may be suitable for extending the model to the nearby agglomeration, subject to certain restrictions.

Keywords: spatial statistics; distance-decay ratio; spatial econometrics; public transportation; transversal lines

Bevezetés

Budapest és közvetlen vonzáskörzetének közlekedése az elmúlt évtizedekben jelentősen átalakult. Egyre többen költöznek ki a fővárosból a városkörnyékre, amely jelentősen megnehezíti a közlekedésszervezést. Az agglomerációs gyűrű településeire kiköltözés legnagyobb problémája, hogy az egyéni közlekedés irányába tolja el a modal split-et, annak következtében, hogy nem, vagy csak nehezen lehet hatékony közforgalmú közlekedési eszközökkel kezelni a keletkező igényeket. Ugyanis, a közforgalmú közlekedés akkor működik hatékonyan, ha magas utasszám figyelhető meg, ami indokolja a járművek sűrű közlekedtetését, ugyanis az utasok a pénzük mellett az idejükkel is fizetnek az utazásért (de Palma et al., 2011).

A vonzáskörzetben fekvő települések számos problémától szenvednek. A városok korábban kistelepülések voltak, ahová a nagyvárosi lakosság költözött be. A kiköltözésnél legtöbbször nem vették figyelembe a megnövekedő lakosságszám utazási igényeit, így a közlekedési útvonalak szűkek, a lakóterületek kiterjedése pedig hatalmas,

ami nem teszi lehetővé a közforgalmú közlekedési kiszolgálást. Ez pedig ahhoz vezet, hogy a közúti közlekedés felerősödik, a kapacitáshiány pedig torlódáshoz vezet (Cumz – Török, 2015). A közforgalmú közlekedés hatékonyan a fő közlekedési útvonalakon a városközpont irányába tud megvalósulni, amely viszonylatok szintén kapacitáshiányosak lehetnek a lakosságszám növekedésével. Molecki és Gąska (2012) tanulmányukban a Katowice környéki villamoshálózat áteresztőképességét mutatták be, felsorolva a forgalomnagyság okozta kapacitásproblémákat. Az elővárosi közforgalmú közlekedési rendszerekkel szemben támasztott igényeket Ranceva et al. (2022) vizsgálta, bemutatva a legfontosabb befolyásoló paramétereket. Az országhatáron átnyúló elővárosok problémáját Hardi (2012) cikke mutatja be, hasonló problémákra rávilágítva, mint amelyekkel Budapest esetében lehet találkozni.



1. ábra A figyelembe vett autóbusz- illetve trolibusz-vonalak, és megállóhelyeik

Forrás: <https://www.openstreetmap.org> (2023. december 18.) alapján saját szerkesztés

A városkörnyéki települések növekedésével egyre inkább megjelennek olyan, korábban a fővárosban elérhető szolgáltatások (koncentrált munkahelyek, bevásárlóközpontok, szabadidő létesítmények), amelyek a helyi közlekedési igények kiszolgálását indokolják az adott településen belül (Capuzzo, 1998). Vagyis a hagyományos előváros-főváros irányú eljutás mellett megjelenik a harántirányú kapcsolatok iránti igény, amely egy városkörnyéki településen belüli, vagy agglomerációs települések közötti utazást feltételezne. Ezek a kapcsolatok pedig sokszor hiányoznak. Kiszolgálásuk azonban fontos lehet a hozzáférhetőség szempontjából.

A közforgalmú közlekedéshez történő hozzáférés egy napjainkban is kutatott, nem egyértelműen meghatározott téma. Hernandez (2018) cikkében amellyel érvel, hogy a hozzáférhetőség és a jólét összefüggésben van egymással, méghozzá a közforgalmú közlekedéshez való hozzáférés egyenlőséget teremt. Ezzel szemben Lionjanga és Venter (2018) cikkükben rámutatnak, hogy nem mutatható ki egyértelmű összefüggés a két paraméter között. Azt azonban számos tanulmány bemutatja, hogy a hozzáférhetőség alakítja az utazási szokásokat (Adhikari et al., 2020), még olyan speciális környezetben is, mint az országhatárokon átnyúló kapcsolatok esetében (Cavallaro – Dianin, 2020a; 2020b), valamint hogy a hozzáférhetőség hiánya megnehezíti a terület közlekedési igényeinek

kiszolgáltatás (Jomehpour Chahar Aman – Smith-Colin, 2020).

Jelen kutatásban arra keresem a választ, hogy hogyan lehet kimutatni hasonló, harántirányú kapcsolatokra a közlekedési igényt, illetve megbecsülni az utasszámot. Ehhez, mivel a helyközi közlekedésben az utasszám nem, vagy csak korlátozottan áll rendelkezésre, Budapest harántirányú közforgalmú közlekedési rendszerének adatait vettem alapul. A közforgalmú közlekedési vonalak lehetnek klasszikus harántirányúak, vagy klasszikus sugárirányúak, illetve vegyesen is elláthatják a két funkciót (Vásárhelyi – Szabó, 1965). Mivel a két szélsőségből van a legkevésbé, így azok a vonalak kerültek be az elemzésbe, amelyek rendelkeznek hangsúlyos harántirányú funkcióval. A kiválasztott vonalakat az 1. ábra szemlélteti, tételes felsorolásukat pedig az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat Az elemzésbe bevont vonalak listája

	Viszonylat		Viszonylat
8E	Kelenföld vá. M – Újpalota, Nyírpalota út	139	Széll K. tér M – Gazdagréti tér
13	Budatétény vá. – Diósd, Búzavirág u.	140	Széll K. tér M – Törökbálint, bevásárlóközpont
13A	Budatétény vá. – Diósd, Sashegyi út	140A	Széll K. tér M – Budaörsi Itp.
29	Hűvösvölgy – Szentlélek tér H	140B	Budaörsi Itp. – Törökbálint, bevásárlóközpont
32	Göncz Á. vkp. M – Örs v. tere M+H	146	Újpalota, Nyírpalota út – R.keresztúr, vkp.
35	Csepel, Csillagtelep – Szentlőrinci úti Itp.	146A	Cinkotai autóbuszgarázs – R.keresztúr, vkp.
36	Csepel, Csillagtelep – Pestszentlőrinc vá.	148	Kőbánya-Kispest M – Csepel, Soroksári rév
46	Újpalota, Nyírpalota út – R.keresztúr, vkp.	151	Kőbánya alsó vá. – Csepel, Határ u.
68	Kispest, Vas G. u. – Akadémiaújtelep, 525. tér	166	Gubacsi út / Határ út – Ferihegy vá.
73	Keleti pu. M – Nyugati pu. M	175	Újpalota, Szentmihályi út – Cinkota H
75	Jászai M. tér – Puskás F. stadion M	188	Kelenföld vá. M – Budakeszi, Honfoglalás sétány
76	Jászai M. tér – Keleti pu. M	188E	Kelenföld vá. M – Budakeszi, Honfoglalás sétány
79	Keleti pu. M – Dózsa Gy. út M	196	Újpalota, Szentmihályi út – Újpest, Fóti út
82A	Örs v. tere M+H – Uzsoki Utcai Kórház	196A	Újpest-városkapu M – Újpalota, Szentmihályi út
85	Kőbánya-Kispest M – Örs v. tere M+H	198	Dél-pesti autóbuszgarázs – R.csaba-Újtelep, Tóalmás u.
85E	Kőbánya-Kispest M – Örs v. tere M+H	204	R.palota, Kossuth u. – Békásmegyér, Újmegyéri tér
91	Nyugati pu. M – Széll K. tér M	212	Boráros tér H – Svábhegy
96	Újpalota, Szentmihályi út – Újpest, Fóti út	266	Pestszentimre vá. – Ferihegy vá.
103	Kelenföld vá. M – Hengermalom út	277	Örs v. tere M+H – Bosnyák tér
111	Batthyány tér M+H – Óbuda, Bogdáni út	287	Budaörsi Itp. – Budatétény vá.
113	Budatétény vá. – Diósd, Sashegyi út	291	Nyugati pu M – Zugliget, Libegő
135	Millenniumtelep H – Soroksár, IKEA áruház	296	Békásmegyér, Újmegyéri tér – Újpalota, Szentmihályi út
138	Csepel, Szent I. tér – Budatétény vá.	296A	Újpalota, Szentmihályi út – K.megyér, Szilas-patak

Forrás: <https://bkk.hu/menetrendek/> (2024. június 10.) alapján saját szerkesztés

Az így meghatározott modellel hipotézisem szerint általánosítható olyan formában, hogy segítségével elővárosi környezetben is meg lehessen határozni az utazási igényeket. Ehhez szükséges, hogy olyan magyarázóváltozókat azonosítsak, amelyek alkalmasak lehetnek arra, hogy az utasszámokat megfelelően leírják.

Az elemzés során az Adatok fejezetben bemutatom a modell során figyelembe vett paramétereket. A módszertani részben bemutatom a modellezés elméleti alapjait, valamint ismertetem az eljárás lépéseit. Az Eredmények fejezetben ismertetem a modellek paraméterbecslésének számszerűsített értékeit, amelynek bemutatása a Kiértékelés fejezetben látható.

Adatok

Az elemzés során azt vizsgáltam, hogy a harántirányú autóbuszvonalakon hogyan alakul a megállóhelyi utasszám. Ehhez egy lineáris regresszió jellegű modellt terveztem felállítani (Preston, 2015), amelyben a függőváltozó az egyes megállóknál az egyes járatokon a fel- vagy a leszállók száma volt, ami azt jelentette, hogy minden megállóhely duplán szerepel – egyik, illetve másik irány – az adattáblában, továbbá ahol több viszonylat is érintett volt az elemzésben, ott többszörös előfordulás is megfigyelhető, amely speciális megfontolásokat igényelt a térbeli

súlymátrixok felállítása során.

A magyarázóváltozókat két részre lehet osztani. Az egyik a megállóhelyek demográfiai-térbeli helyzetét írja le. Itt összesen három változót azonosítottam, amelyből az egyik a 0-s kilométerkötőtől, mint szimbolikus központtól való távolság, a másik kettő pedig egy a távolság-hanyatlás tulajdonság (Haggett, 2001) alapján számított elméleti igényszint (DDR – Distance Decay Ratio).

Ehhez vettem Budapest 203 területegységre történő felosztását, amely a legfinomabb lehatárolásnak tekinthető, amelyre még elérhetők hivatalos lakosságszám-adatok, valamint az előváros szomszédos településeit is beemelttem a modellbe az elérhető legrészletesebb lehatárolással. Minden egyes területegységhez vettem a OSM (Open Street Map) adatbázis (OpenStreetMap contributors, 2017) alapján definiált központját. Az egyes megállóhelyekben definiált demográfiai-térbeli igény a következő képlet alapján került meghatározásra:

ahol:

$$DDR_i = \sum_{j=1}^R \frac{Pop_j}{d_{ij}^\alpha} \quad \forall i \in [1..N] \quad (1)$$

- DDR_i : a megállóhelyekre vonatkozó demográfiai-térbeli igény,
- Pop_j : a j . területegység lakosságszáma,
- d_{ij} : az i . megállóhely távolsága a j . területegység központjától,
- α : távolság-hanyatlás kitevő,
- R : a területegységek száma,
- N : a megállóhelyek száma.

Az így meghatározott DDR mutatók két szintje lett bevonva a modellbe, amelyek számítási módja különbözik a leszállók és a felszállók esetén. Maga a DDR mutató tulajdonképpen egy potenciálfelület, amely a településszerkezet alapján mondja meg egyes pontokban az utazási igényt. Így a megállóhelyekben a felszállások számát befolyásolja a kiinduló pont igénypotenciálja, valamint a lehetséges célpontok igénypotenciálja. Jelen modellben lehetséges célpontnak az adott vonalon lévő megállóhelyeket tekintettem. Ugyanezen logika alapján az adott megállóhelyen leszállók számát befolyásolja a lehetséges kiindulópontok potenciálja, valamint az érkező megállóhelyé. Ahol több potenciált is figyelembe kellett venni – felszállók számánál az érkező DDR-nél, míg leszállók számánál az induló DDR-nél – ott egyszerű összegzéssel éltem. Az elemzés során próbálkoztam azzal, hogy a DDR összegzést, a geográfia első törvényének (Tobler, 1970) megfelelően, súlyozom a kiindulóponttól vett távolságával, azonban ez a megközelítés nem bizonyult kedvezőnek.

A magyarázóváltozók döntő többsége azonban a megállóhely városi közlekedési hálózatban elfoglalt szerepét reprezentálja, ezen paraméterek működését a 2. táblázat szemlélteti.

2. táblázat A közforgalmú közlekedési kínálatot leíró magyarázóváltozók

Név	Jelölés	Típus	Leírás
Végállomás	va	Dummy	Amennyiben a megállóhely egyben az adott vonal végállomása is, akkor 1, egyébként 0 értéket vesz fel
Járatszám	j	Nominális	Az adott vonalon az adott megállóhelyről történő indulások száma
Autóbusz	b	Nominális	Az adott megállóhelyen elérhető autóbuszvonalak száma
Villamos	v	Nominális	Az adott megállóhelyen elérhető villamosvonalak száma
Trolibusz	t	Nominális	Az adott megállóhelyen elérhető trolibuszvonalak száma
Volánbusz	vb	Nominális	Az adott megállóhelyen elérhető regionális és országos helyközi autóbuszvonalak száma
Gyorsvasút	gyv	Nominális	Az adott megállóhelyen elérhető vasúti- és metróvonalak száma

Forrás: saját szerkesztés

A 2. táblázatban meghatározott adatok lehetővé teszik a lineáris regressziós módszertannal történő elemzést. A felírt OLS (OLS – Ordinary Least Squares – hagyományos legkisebb négyzetek módszere) modell a következő képlettel adott:

ahol:

$$\ln U = \alpha + \beta_1 \ln DDR_{ind} + \beta_2 \ln DDR_{erk} + \beta_3 va + \beta_4 j + \beta_5 b + \beta_6 v + \beta_7 t + \beta_8 vb + \beta_9 gyv + \beta_{10} \ln d + \varepsilon \quad (2)$$

- U : a megállóhely felszálló/leszálló utasszáma,
- α : konstans tag,
- β_i : a lineáris regressziós egyenlet együtthatói.

A paraméterekkel kapcsolatban a következőket lehet elmondani. Előzetes elvárásom volt, hogy a 0 kilométerkőtől való távolság kivételével mindegyik paraméter pozitív legyen. Előzetes elvárás volt továbbá, hogy a közlekedési módok paramétere sorbarendezhető legyen, tehát legnagyobb a gyorsvasúthoz tartozó (β_9), utána következik a villamosé (β_6), végül pedig a buszoké ($\beta_5, \beta_7, \beta_8$). A 0 kilométerkőtől való távolság esetében szintén távolság-hányatlás tulajdonságot feltételeztem, minél messzebb megyünk a belvárostól, annál alacsonyabb lesz az utasszám.

Módszertan

A módszertan alapja a lineáris regressziós modellezés volt. Ennek során a függőváltozót (U) becsültem az 1. táblázatban bemutatott magyarázóváltozók segítségével. A lineáris regresszió alkalmazhatóságát a Gauss–Markov-tétel befolyásolja (Bolla – Krámlí, 2005), amelynek jelen modell nem felelt meg a térbeli autokorreláció jelenléte miatt.

A modellek nem megfelelőségét az adatok közötti térbeli autokorreláció fennállása is okozhatja (Anselin, 1988; Varga, 2002). Ennek lényege, hogy az idősorokhoz hasonlóan a térbeli egységek is befolyással vannak egymásra a geográfia első törvényének megfelelően (Tobler, 1970). Feltételezhető, hogy az igények térben koncentráltak, az egyes központok körül magasabbak, míg azoktól távolodva alacsonyabbak. Annak eldöntésére, hogy a térbeli autokorreláció fennáll-e, a Moran-féle I-próba alkalmazható (3) (Moran, 1948).

ahol:

$$I = \frac{N \sum_{i,j} (w_{ij}(x_i - \mu)(x_j - \mu))}{S_0 \sum_i (x_i - \mu)^2} \quad (3)$$

- N : a megfigyelések száma,
- x_i, x_j : két pontban mért érték,
- μ : x várható értéke,
- w_{ij} : térbeli súlymátrix egy eleme,
- S_0 : normalizáló faktor – $S_0 = \sum_{i,j} w_{ij}$.

Amennyiben a Moran-próba szignifikánsan kimutatja az autokorreláció lehetőségét, úgy három féle térökonometriai modellt vettünk figyelembe. Ezek a térbeli késleltetés (SAR – spatial autoregression), térbeli hiba (SEM – spatial error model), valamint térbeli autokorreláció (SAC – spatial autocorrelation) modellek. A megközelítések abban különböznek egymástól, hogy a térbeli késleltetés (ρ), vagy a térbeli hiba (λ) paraméterét rögzítjük nullának. Így a 3. táblázat alakítható ki, amely tartalmazza a legkisebb négyzetek módszerével, valamint az előbb bemutatott három módszertannal felírható modellekben megfigyelhető különbségeket. Mivel a megközelítések közötti különbség abból adódik, hogy bizonyos paraméterek értékeiben rögzítettek-e, így annak eldöntésére, hogy melyik alkalmazható a Lagrange-multiplikátor próbák álltak rendelkezésre (Anselin et al., 1996).

3. táblázat A térökonometriai modellek közti, valamint az OLS eljárástól vett különbségek

			Képlet
OLS	$\rho = 0$	$\lambda = 0$	$y = X\beta + \varepsilon$
SAR	$\rho \neq 0$	$\lambda = 0$	$y = \rho W y + X\beta + \varepsilon$
SEM	$\rho = 0$	$\lambda \neq 0$	$y = X\beta + \lambda W u + \varepsilon$
SAC	$\rho \neq 0$	$\lambda \neq 0$	$y = \rho W_1 y + X\beta + \lambda W_2 u + \varepsilon$

Forrás: saját szerkesztés

ahol:

$$y_{(N \times 1)} = \rho W_{1(N \times N)} y_{(N \times 1)} + X_{(N \times K)} \beta_{(K \times 1)} + \lambda W_{2(N \times N)} u_{(N \times 1)} + \varepsilon_{(N \times 1)} \quad (4)$$

- y : eredményváltozó értékeinek a vektora,
- ρ : térbeli autoregressziós paraméter,
- W, W_1, W_2 : sorstandardizált súlymátrixok,
- W_y : az eredményváltozó térben késleltetett értékeinek a vektora,
- X : az exogén változók mátrixa,
- β : az exogén változók paramétervektora,
- λ : térbeli hiba paramétere,
- u : térbeli autokorrelációval terhelt hibatag,
- ε : térbeli autokorrelációtól megszürt hibatag ($\zeta \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$).

Jelen cikkben azt a megoldást választottam amikor a két megközelítést együttesen alkalmazom. Erre számos modell van (Zhukov, 2010), ezek közül viszont a térbeli autokorrelációs modellt használtam. Ennek képlete a következő:

Mivel több modellezési eljárás is rendelkezésre áll, így célszerű az egyes megközelítéseket összehasonlítani, és csak a legjobbnak tekinthetőt kiválasztani. Az OLS modelleket leggyakrabban az R^2 értékük alapján lehet összehasonlítani, azonban létezik számos más megoldás is, amely nem csak az OLS modellek vizsgálatára alkalmas. Leggyakrabban alkalmazott eljárás a likelihood függvény értékén alapuló összehasonlítás. Ebben az esetben négyféle statisztika alkalmazható. Ezek a logaritmizált likelihood függvény értéke, valamint az AIC, BIC és CAIC mutatószámok. Az logaritmizált likelihood értékek esetén alapvetően, ha az érték alacsonyabb, akkor a modell jobbnak tűnik. Ez az érték azonban függ a független változók számától és a minta nagyságától, ezért célszerű egyéb indexeket alkalmazni. Ezek az információs kritériumok (Cameron – Trivedi, 2005).

Az első, és a legszéleskörűben alkalmazott információs kritérium, AIC, a legegyszerűbb az összes közül (5). Ez még nem veszi figyelembe az elemszámot csupán a magyarázóváltozók számával súlyoz. Képlete a következőképpen néz ki (Cameron – Trivedi, 2005):

ahol:

$$AIC = -2 \ln L + 2q \quad (5)$$

- L : a likelihood-függvény értéke,
- q : a magyarázóváltozók száma.

Az AIC index javítására az úgynevezett KLIC (Kullback–Liebler Information Criterion) indexeket szokták felhasználni. Ezeknek lényege, hogy az összeg második tagját egy olyan függvénnyel helyettesítik, amelyik csak az N -tól és a q -tól függ, és nagyobb, mint $2q$ (Cameron – Trivedi, 2005). Mivel azonban a jelenlegi elemzés során N értéke nem változik a modellek esetében, így további információs kritériumok meghatározása nem szükséges.

Az információs kritériumok mutatta eltérés erősségének meghatározására likelihood arány próba (Likelihood-ratio Test – LRT) is alkalmazható azért, hogy a modellek összehasonlíthatók legyenek. A teszt azt vizsgálja, hogy az egyik modell szignifikánsan jobbnak tekinthető-e a másikkal (Maddala, 2001). E megközelítés szerint két hierarchikus rendszerben álló modellt hasonlítunk össze. A modellek azonos függő változóval és közel azonos magyarázóváltozókkal rendelkeznek, azonban a felsőbbrendűként (superior) azonosított modell néhány extra magyarázóváltozót tartalmaz (ezek számát d -vel jelöltem). A nullhipotézis, amit ebben az esetben vizsgálunk az az, hogy a felsőbbrendű és alsóbbrendű (inferior) modellek között nincs szignifikáns különbség, a felsőbbrendű modell nem ad jobb becslést. H_0 teljesülése esetén a (6) képlettel fémjelzett próbastatisztika érték χ^2 eloszlást követ d szabadságfokkal (Maddala, 2001):

ahol:

$$LRT = 2 \ln \frac{L_2}{L_1} = 2(\ln L_2 - \ln L_1) \sim \chi_d^2 \quad (6)$$

- L_1 : az alsóbbrendű modell likelihood függvény értéke,
- L_2 : a felsőbbrendű modell likelihood függvény értéke.

Az alkalmazott lépéseket és a modellek mögötti bővebb kifejtést (Sarmiento-Barbieri, 2016; Szabó – Török, 2019) tartalmazza. A térökonometriai elemzéseket az R 3.4.0 környezetben (R Core Team, 2017) végeztem el. Az elemzéshez felhasználtam a maptools (Bivand – Lewin-Koh, 2017), az sp (Bivand et al., 2013b; Pebesma – Bivand, 2005), az

spdep (Bivand et al., 2013b; Bivand – Wong, 2018), valamint a spatialreg (Bivand et al., 2013a; 2013b; Bivand – Piras, 2015) könyvtárakat.

Összefoglalva, az elemzés módszertana az alábbi lépésekből áll:

1. Az OLS modell meghatározása,
2. Autokorrelációra való tesztelés megfelelően megválasztott súlymátrixokkal,
3. Megfelelő térökonometriai modell kiválasztása Lagrange-multiplikátor teszt segítségével,
4. Modellek összehasonlítása,
5. Modell(ek) kiértékelése.

Eredmények

A 2. egyenlettel fémjelzett modellből kiindulva vizsgáltam meg a térökonometriai modelleket. Az elemzésekhez minden esetben szükséges egy térbeli súlymátrix (Getis, 1991). Jelen cikkben két súlymátrix is alkalmasnak tűnt a térbeli autokorreláció vizsgálatára és kezelésére, így mindkettőt vizsgáltam a továbbiakban. Mindkét súlymátrix bináris alapú és sorstandardizált, valamint a szomszédság alapja minden esetben a távolság.

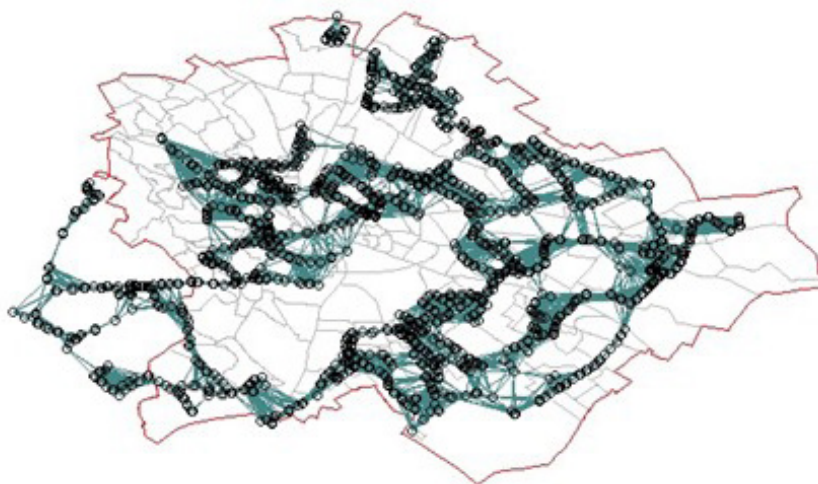
A W.alt kódjelű mátrix esetében két megállót akkor tekintettem szomszédosnak, ha a távolságuk egy bizonyos küszöbérték alatt van. Ehhez a 2,25 kilométert választottam, hogy a kapcsolatok által kiadott hálózat összefüggő legyen (2. ábra). Mindemellett célszerű volt, hogy kiküszöböljem a megállóhely-többszörösséget, valamint az ellenirányú párával fennálló összefüggőséget, így alsó korlátnak 100 méter került beállításra. Sajnos magasabb alsó korlát nem állt rendelkezésre, ugyanis abban az esetben a városi közlekedés sajátosságai miatt már összemérhető lett volna a vonali megállóhely-távolsággal.



2. ábra A W.alt kódjelű súlymátrix által figyelembe vett kapcsolatok

Forrás: (OpenStreetMap contributors, 2017; R Core Team, 2017) alapján saját szerkesztés

Ezzel párhuzamosan a Wk50 kódjelű mátrix esetében a szabály az volt, hogy minden megállóhely a vele 50 legközelebbi elemmel van kapcsolatban (3. ábra). Természetesen ebben az esetben az előző bekezdésben felvetett megfontolásokat nem vettem figyelembe. A két súlymátrixra vonatkozó Moran-I, valamint Lagrange-multiplikátor teszteket a 4. táblázat szemlélteti. A szignifikanciaszinteket az R programban alkalmazott módon jelöltem, vagyis: . ha $p < 0,1$, * ha $p < 0,05$, ** ha $p < 0,01$, és *** ha $p < 0,001$ (Bivand et al., 2013a; Bivand – Piras, 2015; R Core Team, 2017).



3. ábra A Wk50 kódjelű súlymátrix által figyelembe vett kapcsolatok

Forrás: (OpenStreetMap contributors, 2017; R Core Team, 2017) alapján saját szerkesztés

4. táblázat A Moran-próba, valamint a Lagrange-multiplikátor tesztek eredménye a vizsgált súlymátrixokra

	Wk50		W.alt	
Moran-I	0.2311		0.1165	
	(84.62)	***	(72.81)	***
LMerr	(6554.61)	***	(4455.21)	***
LMlag	(977.33)	***	(423.43)	***
RLMerr	(5613.58)	***	(4094.01)	***
RLMlag	(36.30)	***	(62.22)	***
SARMA	(6590.91)	***	(4517.43)	***

Forrás: (Bivand et al., 2013a; 2013b; Bivand – Piras, 2015) alapján saját szerkesztés

A súlymátrixokat felhasználva számos térökonometriai modell futtatható. Mind a SAR, mind pedig a SEM modellek esetében alkalmazható mind a W.alt, mind pedig a Wk50 kódjelű súlymátrix. A SAC modellek esetében annyival bonyolultabb a helyzet, hogy mivel két súlymátrix szükséges a felíráshoz, így ezek lehetnek ugyanazok, de lehetnek különbözőek is, sorrendtől függően. Az összes lehetséges esetből egy SAC modell kivételével mindet megvizsgáltam. A köztük lévő különbségeket az 5. táblázat szemlélteti.

5. táblázat A lehetséges modellek főbb paramétereinek összehasonlítása

	err.k50	sar.k50	sac.k50	err.W.alt	sar.W.alt	sac.W.alt	sac.alt
Típus	SEM	SAR	SAC	SEM	SAR	SAC	SAC
W ₁		Wk50	Wk50		W.alt	W.alt	W.alt
W ₂	Wk50		Wk50	W.alt		W.alt	Wk50
ρ		0.4429 (24.41)***	0.0404 (0.64)		0.3359 (16.55)***	-0.8882 (-7.62)***	-0.6670 (-7.01)***
λ	0.8424 (45.86)***		0.8316 (34.58)***	0.8377 (24.90)***		0.9755 (122.41)***	0.9273 (90.30)***
AIC	12564	13035	12566	13118	13343	13043	12528
LRT_OLS	(1064.8)***	(593.56)***	(1065.2)***	(511.29)***	(286.22)***	(588.3)***	(1103.4)***
LRT_SEM			(0.37)			(77.01)***	(38.58)***
LRT_SAR			(471.61)***			(302.07)***	(817.16)***

Forrás: (Bivand et al., 2013a; 2013b; Bivand – Piras, 2015) alapján saját szerkesztés

Az 5. táblázat tartalmazza az alkalmazott térökonometriai modell típusát (SAR, SEM vagy SAC), az alkalmazott mátrixok kódjelzését – a W₁ a térbeli késleltetés, míg a W₂ a térbeli hibához tartozóét – a térbeli paraméterek értékét, valamint a nullától való különbözőségük u-próbastatisztika-értékét. A modellek összehasonlításához ismerttettem az AIC értékeket, valamint a LRT-hez tartozó próbastatisztika-értékeket, ahol releváns. Tehát a SAR

és SEM modellek esetében vizsgáltam az OLS modelltől való különbözőséget, míg a SAC modellek esetében az összes többi től való különbözőséget lehet vizsgálni. Mindezek alapján a SAC.alt kódjelű modell bizonyult a legkedvezőbbnek, ahol a térbeli késleltetéshez a W.alt, míg a térbeli hibához a Wk50 súlymátrix került bevonásra. A legjobbnak tekinthető modell paraméterbecslésének eredményét a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat A legjobbnak tekinthető modell (sac.alt) paraméterbecslésének eredménytáblázata

	Leírás	Paraméterbecslés	u-érték
Tengelymetszet (α)		7.1926	3.4573 ***
$\ln DDR_{ind} (\beta_1)$	Kiindulási DDR érték	0.4213	25.7841 ***
$\ln DDR_{erk} (\beta_2)$	Érkezési DDR érték	0.4268	26.0573 ***
$va (\beta_3)$	Végállomás	0.9725	11.5520 ***
$j (\beta_4)$	Járatszám	0.0266	39.4865 ***
$b (\beta_5)$	Autóbusz-viszonylatok száma	0.0503	7.7954 ***
$v (\beta_6)$	Villamosokviszonylatok száma	0.0790	4.5905 ***
$t (\beta_7)$	Trolibusz-viszonylatok száma	0.1311	2.8499 **
$vb (\beta_8)$	Volánbusz-viszonylatok száma	0.0018	0.5087
$gyv (\beta_9)$	Gyorsvasúti viszonylatok száma	0.1198	2.1975 *
$\ln d (\beta_{10})$	0 kilométerkötől való távolság	-0.4774	-2.2044 *
ρ		-0.6670	-7.0109 ***
λ		0.9273	90.3020 ***

Forrás: (Bivand et al., 2013a; 2013b; Bivand – Piras, 2015) alapján saját szerkesztés

Kiértékelés

A SAC.alt modell paraméterbecslése (6. táblázat) alapján a következőket lehet megállapítani. A paraméterek a volánbuszhoz tartozó érték kivételével szignifikánsan különböznek nullától, és az előjelük is megfelel az előzetes elvárásoknak, vagyis a 0 kilométerkötől való távolság kivételével minden pozitívan befolyásolja a megállóhelyek utasszámát.

Azonban, ha a közlekedési módok egymáshoz viszonyított értékét vizsgáljuk, akkor az nem feltétlenül felel meg az előzetes elvárásoknak. A legnagyobb érték a trolibuszokhoz tartozik, utána jön a gyorsvasúti kiszolgálás, majd a villamos és az autóbusz, végül pedig a volánbusz, amely már nem is tekinthető nullától különbözőnek. Ennek oka vélhetően arra vezethető vissza, hogy a közlekedési módok szerepe nem tisztázott a városi közlekedésben (Szabó – Sipos, 2021).

A trolibuszok magas utasvonzóképesége történelmi okokra vezethető vissza, ugyanis a belvárosi villamosközlekedés helyét vették át az '50-es években, és ez a feladata jellemzően megmaradt a mai napig is. A gyorsvasút alacsonyabb együttthatója pedig arra vezethető vissza, hogy a modellezés során egybe számítottam a metró, a HÉV, valamint a városi nagyvasúti közlekedést. Habár a hosszútávú tervek csereszabatosként kezelik őket – gondolva az M2-H8 összeköttetésre, vagy az ötös metróra, amely a tervek szerint magában foglalja a másik három HÉV-vonalat, valamint a 150-es vasútvonal elővárosi forgalmát – jelen állapotában még a HÉV és az elővárosi vasút utasvonzóképesége jelentősen elmarad a metróétól. Ezen anomália szintén tekinthető történelmi örökségnek, hiszen míg a metróépítés jelentősen átalakította Budapest közlekedési rendszerét, úgy, hogy az utasok szívesebben válasszák a földalatti, de gyors és zavartalan közlekedést, addig a HÉV-ek és a nagyvasút esetében eddig ez nem, vagy csak korlátozottan történt meg.

A volánbuszok esetében a nem szignifikáns paraméter annak az indikátora, hogy az utasok a városi közlekedésben kevésbé keresik ezeket a járatokat. Teszik ezt annak ellenére, hogy tarifális akadályok nem gördülnek eléjük, valamint számos esetben csak vagy részben elővárosi buszok szolgálnak ki egy-egy térséget. Jelen eredmények, jellegükből adódóan, csak rávilágítanak ezen problémára, tüzetesebb vizsgálatuk további kutatást igényel.

Érdekes megvizsgálni a térbeliséget leíró paraméterek előjelét is. Alapvetően a Moran-próba pozitív autokorrelációt jelzett előre, ami azt jelenti, hogy az azonos tulajdonságú egyedek tömörülnek a térben. Ez a megközelítés némiképp ellentmond a mindennapi megfigyeléseknek, ugyanis, ha egy megállóban magasabb a le/felszálló utasszám – például az ott elérhető szolgáltatások miatt – akkor az azt jelenti, hogy a szomszédos megállóhelyek relatíve alacsonyabb utasszámmal fognak rendelkezni. Ez az eredmény következik a paraméterbecslésből is, ugyanis míg a térbeli hiba előjele pozitív, addig a térbeli késleltetésé negatív. Vagyis megfigyelhető egyfajta tömörülés a térben (pozitív λ), azonban a megállóhelyek versengenek egymással (negatív ρ).

A kutatási kérdés megfogalmazásánál kiemelésre került, hogy a kutatás egyik célja, hogy hogyan lehet az itt tett megfigyeléseket kiterjeszteni az agglomerációs térségre is. A magyarázóváltozók jelentős része továbbra is alkalmazható lenne, azonban néhány változtatást célszerű tenni. A 0 kilométerkő helyett sokkal célszerűbb a Budapesttől való távolságról beszélni, valamint a közlekedési módokat is érdemes átértékelni. A gyorsvasút, mint mód továbbra is rendelkezésre áll, hiszen az elővárosi vonatok eredetileg is benne voltak ebben a kategóriában. Azonban a trolibusz és a villamos, mint dedikált közlekedési mód nem értelmezhető az elővárosban, az autóbusz/volánbusz lehatárolás pedig speciális megfontolásokat igényel. Mindezek miatt mindenképpen fontos lenne a helyközi harántirányú járatokon az utasszámok ismerete a modell újrakalibrálása érdekében.

Mindezek mellett érdemes kitérni a kutatás limitációira. Egyrészt a kutatásban az általam kiválasztott BKK megrendelésében részt vevő autóbusz- és trolibusz-vonalak szerepeltek, amelyek részben vagy egészben harántirányú kapcsolatot biztosítanak, és amelyre volt megfelelő adat. Az elemzést megnehezítette például a 73-as, vagy 82-es trolibuszvonali módosítása, továbbá, hogy az adatok egy része a COVID-19 alatt került felmérésre, amely miatt egy szorzótényezőt kellett alkalmazni az összehasonlíthatóság miatt.

Többek között a buszvonalak önkényesnek tekinthető megválasztása okozta azt is, hogy a súlymátrixok kialakításánál nagy küszöbértéket kellett választani, pusztán azért, hogy a kapcsolatokból adódó hálózat összekötött legyen. Egy egyenletesebb megállóhely-eloszlás lehetővé tett volna egy alacsonyabb küszöbértéket is, amely kedvezőbb lehetett volna az elemzés szempontjából. A jövőben érdemes egy olyan súlymátrix vizsgálata is, amely nem automatikus számítással áll elő, és igazodni tud az adatsor specialitásaihoz.

Összefoglalás

Jelen cikkben arra kerestem a választ, hogy agglomerációs környezetben kialakítható-e egy olyan modell, amely megmondja az utazási igényeket, illetve az utasszámokat egy harántirányú útvonalon. Az adatok rendelkezésre állása miatt Budapest harántirányú közforgalmú közlekedési vonalait vettem alapul az elemzéshez. A módszertan újdonsága, hogy meghatároztam egy térbeli potenciálértéket Budapest statisztikai egységeinek, valamint a környező települések demográfiai adatai alapján, amelyet magyarázóváltozóként alkalmaztam a modellemben. Mindemellett felvettem a közforgalmú közlekedési hálózatra, illetve a kiszolgálásra jellemző paramétereket is, leírandó a rendelkezésre álló kínálatot. A módszertan során lineáris regressziós modellezést alkalmaztam, azonban térbeli autokorreláció jelenléte miatt térökonometriai modellek bevonása vált szükségessé.

Az elemzés legfontosabb eredménye, hogy előállítható egy olyan modell, amely alkalmas a harántirányú közforgalmú közlekedési járatok útvonalának meghatározására. A magyarázóváltozók általánosíthatók a helyközi közlekedés kívánalmainak megfelelően, azonban egy tanuló adatbázis előállítása elengedhetetlen az általánosítás elvégzéséhez.

Másik fontos eredmény a városi közlekedés sajátosságait új meglátásba helyező súlyszámok alakulása. Korábbi eredményeink alapján (Szabó – Sipos, 2021) kimutatható volt, és jelen cikk is rámutat, hogy a közforgalmú közlekedési módok szerepe tisztázatlan, ami megnehezíti a közlekedésszervezés optimális lebonyolítását.

Mindenképpen fontos a jövőben a modell fejlesztése és finomítása. Új térbeli súlymátrixok alkalmazása pontosabbá tudja tenni a modellt, kiszűrve azokat a nem kívánatos egymásra hatásokat, amely jelenleg kényszerűségeiből részét képezi a modellnek. További jövőbeni feladat a modell agglomerációs igényekhez való megfeleltetése.

Felhasznált irodalom

- Adhikari, Binay – Hong, Andy – Frank, Lawrence D. (2020): Residential relocation, preferences, life events, and travel behavior: A pre-post study, *Research in Transportation, Business & Management* 36, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100483>
- Anselin, Luc (1988): *Spatial Econometrics: Methods and Models*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 284 o.
- Anselin, Luc et al. (1996): Simple diagnostic tests for spatial dependence, *Regional Science and Urban Economics* 26:1, 77–104. [https://doi.org/10.1016/0166-0462\(95\)02111-6](https://doi.org/10.1016/0166-0462(95)02111-6)
- Bivand, Roger – Hauke, Jan – Kossowski, Tomasz (2013a): Computing the Jacobian in Gaussian spatial autoregressive models: An illustrated comparison of available methods, *Geographical Analysis* 45:2, 150–179. <https://doi.org/10.1111/gean.12008>
- Bivand, Roger S. – Lewin-Koh, Nicholas (2017): *mapprools: Tools for Reading and Handling Spatial Objects*. <https://CRAN.R-project.org/package=mapprools> (2020. augusztus 10)
- Bivand, Roger S. – Pebesma, Edzer J. – Gómez-Rubio, Virgilio (2013b): *Applied Spatial Data Analysis with R*, 2nd Edition, Springer, New York, NY, 405 o.
- Bivand, Roger S. – Piras, Gianfranco (2015): Comparing Implementations of Estimation Methods for Spatial Econometrics, *Journal of Statistical Software* 63:18, 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v063.i18>
- Bivand, Roger S. – Wong, David W. S. (2018): Comparing implementations of global and local indicators of spatial association, *TEST* 27, 716–748. <https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>
- Bolla Marianna – Krámlí András (2005): *Statisztikai következtetések elmélete*, Typotex Kiadó, Budapest, 407 o.
- Cameron, A. Colin – Trivedi, Pravin K. (2005): *Microeconometrics: Methods and Applications*, Cambridge University Press, New York, NY, 1056 o. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811241>
- Capuzzo, I. Paolo (1998): The defeat of planning: the transport system and urban pattern in Vienna (1865–1914), *Planning Perspectives* 13:1, 23–51. <https://doi.org/10.1080/026654398364554>
- Cavallaro, Federico – Dianin, Alberto (2020a): Efficiency of public transport for cross-border commuting: An accessibility-based analysis in Central Europe, *Journal of Transport Geography* 89, 102876. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102876>
- Cavallaro, Federico – Dianin, Alberto (2020b): An innovative model to estimate the accessibility of a destination by public transport, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 80, 102256. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102256>
- de Palma, André et al. (szerk.) (2011): *A Handbook of Transport Economics*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 928 o. <https://doi.org/10.4337/9780857930873>

- Getis, Arthur (1991): Spatial interaction and spatial autocorrelation: A cross-product approach, *Environment and Planning A: Economy and Space* 23:9, 1269–1277. <https://doi.org/10.1068/a231269>
- Gumz, Felix – Török Ádám (2015): Investigation of Cordon Pricing in Budakeszi, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 43:2, 92–97. <https://doi.org/10.3311/PPtr.7579>
- Haggett, Peter (2001): *Geography: a global synthesis*, 4th Edition, Pearson Education, Essex, UK, 833 o.
- Hardi Tamás (2012): Cross-Border Suburbanisation: The Case of Bratislava, in: Csapó Tamás – Balogh András (szerk.): *Development of the Settlement Network in the Central European Countries*, Springer, Berlin, Heidelberg, 193–206. o. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20314-5_14
- Hernandez, Diego (2018): Uneven mobilities, uneven opportunities: Social distribution of public transport accessibility to jobs and education in Montevideo, *Journal of Transport Geography* 67, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.08.017>
- Jomehpour Chahar Aman, Javad – Smith-Colin, Janille (2020): Transit Deserts: Equity analysis of public transit accessibility, *Journal of Transport Geography* 89, 102869. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102869>
- Lionjanga, Nahungu – Venter, Christo (2018): Does public transport accessibility enhance subjective well-being? A study of the City of Johannesburg, *Research in Transportation Economics* 69, 523–535. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2018.07.011>
- Maddala, Gangadharrao S. (2001): *Introduction to Econometrics*, 3rd Edition, John Wiley&Sons Ltd., Chichester, UK, 664 o.
- Molecki, Adam – Gaska, Damian (2012): Calculations of tramway track capacity in the wide area networks, *Transport* 27:4, 428–433. <https://doi.org/10.3846/16484142.2012.754378>
- Moran, Patrick A. P. (1948): Some Theorems on Time Series: II The Significance of the Serial Correlation Coefficient, *Biometrika* 35:3/4, 255–260. <https://doi.org/10.2307/2332344>
- Pebesma, Edzer J. – Bivand, Roger S. (2005): Classes and methods for spatial data in R, *R News* 5:2, 9–13. https://cran.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2005-2.pdf (2020. augusztus 10.)
- Preston, John (2015): Public transport demand, in: Nash, Chris (szerk.): *Handbook of Research Methods and Applications in Transport Economics and Policy*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 192–211. o. <https://doi.org/10.4337/9780857937933.00018>
- R Core Team (2017): *A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Wien, AT (elektronikus kiadvány). <https://www.r-project.org/> (2020. november 8.)
- Ranceva, Justina – Ušpalytė-Vitkūnienė, Rasa – Vaišis, Vaidotas (2022): Indicators Affecting the Operation of Public Transport in Regions and Their Interfaces, *Promet – Traffic&Transportation* 34:6, 849–861. <https://doi.org/10.7307/ptt.v34i6.4144>
- Sarmiento-Barbieri, Ignacio (2016): *An Introduction to Spatial Econometrics in R*, University of Illinois, Champaign–Urbana, IL (elektronikus kiadvány). http://www.econ.uiuc.edu/~lab/workshop/Spatial_in_R.html (2024. augusztus 29.)
- Szabó Zsombor – Sipos Tibor (2021): Közösségi közlekedési módok súlyszámának meghatározása városi környezetben – egy lehetséges módszertan, *Közlekedéstudományi Szemle* 71:6, 4–16. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2021.6.1>
- Szabó Zsombor – Török Árpád (2019): Spatial Econometrics – Usage in Transportation Sciences: A Review Article, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 48:2, 143–149. <https://doi.org/10.3311/PPtr.12047>
- Tobler, Waldo R. (1970): A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region, *Economic Geography* 46:2 (Supplement), 234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>
- Varga Attila (2002): Térökonometria, *Statisztikai Szemle* 80:4, 354–370. https://www.ksh.hu/statszemle_archive/2002/2002_04/2002_04_354.pdf (2024. augusztus 29.)
- Vásárhelyi Boldizsár – Szabó Dezső (szerk.) (1965): *Városi közlekedési kézikönyv*, Műszaki Kiadó, Budapest, 799 o.
- Zhukov, Yuri M. (2010): *Applied spatial statistics in R*. <https://zhukovyuri.github.io/files/applied-spatial-stats.pdf> (2023. december 18.)