



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék

Vasúti személyszállítási kereslet becslése kínálati modell invertálásával

Szerző:

Sejben András

Közlekedésmérnök hallgató

Konzulens:

Dr. Hörcher Dániel

Adjunktus



Tudományos
Diákköri
Konferencia
2023

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	4
2. Irodalomkutatás	7
2.1. <i>A kínálatoptimalizáció szakirodalma</i>	7
2.2. <i>A gravitációs egyenletek szakirodalma</i>	9
3. Modell felállítása.....	11
3.1. <i>Kínálatoptimalizáció és inverz kínálatoptimalizáció</i>	12
3.2. <i>Gravitációs egyenletek</i>	14
3.3. <i>Regresszióanalízis</i>	16
4. Eredmények	18
4.1. <i>Regressziós becslések</i>	18
4.2. <i>Alkalmazás</i>	25
5. Konklúzió	27
Felhasznált irodalom	28
1. Melléklet: Jelölésmagyarázat	31

ABSZTRAKT

Az Európai Unióban a nemzetközi személyszállító vonatok szolgáltatási színvonala – járatsűrűsége, átlagsebessége, jegyárai megfizethetősége – gyakran elmarad a belföldön közlekedő társaiktól. A vasúti személyszállítási liberalizáció mérsékelt ütemét látva továbbra is kérdéses, hogy a profitorientált, a nemzeti vasúttársaságokra épülő, vagy esetleg egy uniós szintű megrendelő szervezet nyújtotta kínálat eredményezné a legmagasabb társadalmi hasznot a nemzetközi közlekedésben. A kérdés megválaszolásához jelenleg nem állnak rendelkezésre megfelelő keresleti adatok. A dolgozatban egy közép-európai vasúti forgalomáramlási mátrix becslésére kerül sor. A kidolgozott módszer inverz kínálatoptimalizációt használ, melynek segítségével az utasszám kifejezhető a járatsűrűség függvényében. Ezt felhasználva, különböző elérhetőségi formulákat alkalmazó gravitációs egyenleteket írunk fel és becslünk meg, majd a legjobban illeszkedő modell segítségével a tényleges keresletre is becslést hajtunk végre. Végül egy kiválasztott viszonylaton bemutatom, hogy a kereslet hogyan reagál a járatsűrűség növelésére, valamint egy építés alatt álló vasútvonal várható keresletének becslése is megtörténik a kidolgozott módszer felhasználásával. A dolgozat módszertana fontos lépés lehet a kontinensen belüli nemzetközi vasúti személyszállítás optimalizációjához.

1. Bevezetés

Európa kiterjedt vasúti hálózattal rendelkezik, a kontinens országai között nemzetközi személyszállító vonatok közlekednek, amelyekkel számos desztináció elérhető. Bár több megoldatlan technológiai probléma is hátráltatja a határokon átnyúló vasúti közlekedést – elég csak a különböző nyomtávokra, vontatási áramnemekre, valamint a számtalan vonatbefolyásoló rendszerre gondolni – mégis meghatározó szerepet tölt be a kontinens társadalmi és gazdasági folyamataiban. A hálózaton jellemzően a szomszédos államok közötti forgalom dominál, hiszen a légi személyszállítás hosszabb távokon jelentősen gyorsabb. Ennek ellenére hosszabb vasúti utazások elméletileg ma is megvalósíthatók, és az Európai Unió deklarált célja ezek vonzerejének javítása.

Azonban a nemzetközi személyszállító vonatok szolgáltatási színvonala gyakran elmarad a belföldön közlekedő társaiktól. Külföldi desztinációk általában alacsonyabb járatsűrűség mellett érhetők el, azaz jellemzően kevesebb személyszállító vonat köt össze két különböző országban található várost, a belföldi eljutási lehetőségekhez viszonyítva. Mindez magával hordozza azt is, hogy az elméleti várakozási idő egy nemzetközi utazás esetén várhatóan magasabb.

A járatsűrűség mellett a nemzetközi vonatok átlagsebessége is általában alacsonyabb. Ennek okát több tényező is befolyásolhatja, de mindenképpen érdemes megemlíteni azt, hogy Európában nem mindenhol élveznek előnyt a nemzetközi vonatok a kapacitás- és menetrendtervezési folyamat során, valamint alkalmazott gyakorlat, hogy a nemzetközi vonatok belföldi járatok összekapcsolásaként nyernek határon átnyúló menetvonalat, így azok elsősorban belföldi utazási igények kielégítésére szolgálnak.

Mindezeket túl nem szabad elfeledkezni a nemzetközi vonatok (gyakran aránytalanul) magas jegyáráról sem. A jellemzően hosszú utazások miatti magas költség mellé társul az a tény is, hogy ritkán vehetők igénybe kedvezmények ilyen szolgáltatások esetén. A belföldi jegyárakkal összehasonlítva, ahol viszont az Európai Unió szinte minden tagállamában létezik kedvezmény, nagy különbség mutatkozik. Az említettek miatt a nemzetközi közlekedési piacon a vasúti személyszállítás sokszor nem tudja felvenni a versenyt más közlekedési ágazatokkal, a repüléssel és az egyéni közúti közlekedéssel.

A kínálat vártnál lassabb fejlődése ellenére a nemzetközi vasúti személyszállítási szolgáltatások iránti kereslet folyamatosan növekszik. A probléma megoldására európai szintű szabályozási beavatkozásra lehet szükség, amely a határon átnyúló közszolgáltatások

társadalmi hasznainak magasabb kiaknázását eredményezné. Azonban, mint minden hatékonyságnövelő beavatkozás során, megbízható és mindenre kiterjedő adatokra lenne szükség, ami különösen problémás a nemzetközi viszonylatokon.

A nemzetközi vasúti személyszállítási szektor megismeréséhez elsősorban egy egész Európára kiterjedő forgalomáramlási mátrixra lenne szükség, azonban jelenleg ez nem áll rendelkezésre. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy az idő- és költséghatékonyság jegyében a forgalomszámlálás, mint lehetséges adatgyűjtési módszer, nem jöhet szóba. Bár biztosan vannak olyan vasúttársaságok, amelyek ismerik a saját hálózatukra vonatkozó utasszám adatokat, ezek aggregálására és megismerésére nincs lehetőség, hiszen azok szigorú üzleti titkok. Ezen túl, a jelenlévő bérlet jellegű ajánlatok, valamint a helyfoglalás nélkül is igénybe vehető szolgáltatások miatt előfordulhat, hogy a vasúttársaságok az aktuálisan közlekedő járataikon sem tudják pontosan, hányan utaznak.

Dolgozatom a fenti problémára keres megoldást: a személyszállítási keresleti mátrixot reprodukálja észlelt adatok begyűjtése nélkül. A keresleti adatok visszafejtése a kínálat észlelésének segítségével történik, azaz az utasszám adatokra a hálózaton közlekedő járatok tulajdonságai alapján következtetünk. Egy olyan gravitációs függvényformula kerül kidolgozásra, amely a viszonylatok végpontjaiban található városok szocio-ökonómiai adataira és elérhetőségeire támaszkodik, valamint figyelembe veszi a vasúti járatok és a konkurens közlekedési ágazatok jellemzőit.

A függvényformula rendelkezésre állása és a szükséges adatok begyűjtése után statisztikai úton megbecsülhető a kívánt hálózatra a forgalomáramlási mátrix. A becsült utasszámok ezek után számos alkalmazásban használhatók. Egyrészt lehetőség van annak vizsgálatára, hogy a városok népességváltozása hogyan hat a forgalmakra, valamint előre jelezhető a várható keresletváltozás egy járatsűrűség-növelés esetén. Vizsgálható az is, hogy a konkurens közlekedési módok szolgáltatási színvonalának növekedése milyen hatást gyakorol, azaz például a vasúti viszonylattal párhuzamos közúti eljutás idejének jelentős csökkenése esetén a vasutat választó utasok száma várhatóan mennyire esik vissza. Végül megbecsülhető, hogy a nemzetközi személyszállítás uniós szintű árszabályozásával milyen mértékű keresletnövekedés érhető el.

A keresleti adatok ismeretében további, nagyobb volumenű vizsgálatok is véghez vihetők, például összehasonlíthatók különböző piacszerkezetek: liberalizált és nemzeti vasúttársaságokra, illetve egy európai szintű megrendelő szervezetre épülő forgatókönyv egyaránt. Az Európai Unióban a nemzetközi vasúti közlekedés liberalizációja ellenére

leggyakrabban ebben a szegmensben is a nemzeti vasúttársaságok nyújtják a szolgáltatást, tisztán üzleti alapon, vagy az érintett államok közötti megállapodások alapján. Míg a nemzeti vasúttársaságok közszolgáltatói szerepe az anyaországuk határain belül egyértelmű, addig nemzetközi viszonylatokban már kérdéses, hogy milyen célfüggvény szerint optimalizálják a részben külföldi utasoknak nyújtott szolgáltatás paramétereit (Oates, 2008; De Borger és Proost, 2012; Hörcher et al., 2023). Pontosan emiatt érdemes megvizsgálni, hogy más piacszerkezetek össztársadalmi haszna miként alakul. Lehetőség lenne az Európai Unióban a nemzetközi vasúti személyszállítás centralizáltan történő megrendelésére, de teljesen a versenyen alapuló piac is létrehozható. Az említettek vizsgálata lehetőséget biztosít a kutatás folytatására.

A téma aktualitását mutatja az Európai Bizottság nemzetközi vasúti személyszállítás iránti érdeklődése (Európai Bizottság, 2021). A Bizottság 2022 őszén pályázatot hirdetett (Európai Bizottság, 2022) és olyan projektek támogatását vállalta, amelyek a nemzetközi vasúti szolgáltatások színvonalát hivatottak növelni. 2023 elején tíz pilot projekt került kiválasztásra, köztük a magyar közlekedésért felelős Minisztérium pályázatával (Európai Bizottság, 2023). Ezek mindegyike olyan operatív program, amely a vasút helyzetét igyekszik erősíteni a nemzetközi személyszállítási piacon.

Az Európai Bizottság téma iránti érdeklődése vélhetően azzal magyarázható, hogy az európai nemzetközi vasúti személyszállítás liberalizációja láthatóan (még) nem járt sikerrel. Bár a 3. vasúti csomag (Európai Bizottság, 2007) megteremti a jogi környezetet, jelenleg mindössze néhány magántársaság tevékenykedik a piacon és ezek sem elsősorban egymás, hanem a nemzeti vasúttársaságok konkurenciái. Az okokat több tanulmány is tárgyalja (például: Bergantino et al., 2015; Casullo, 2016; Tomeš et al., 2016; Broman és Eliasson, 2019), de esetünkben a megoldási lehetőségek, pontosabban az ezek vizsgálatához szükséges adatok előállítása kap kiemelt szerepet.

A dolgozat felépítése a következő: Az 1. fejezet képbe helyezi az olvasót, a 2. fejezet elhelyezi a dolgozatot a szakirodalomban. A 3. fejezetben a felállított modell olvasható, a 4. fejezet az elért eredményeket részletezi, míg az 5. fejezet összegez.

2. Irodalomkutatás

Az irodalomkutatás célja a dolgozat elhelyezése a szakirodalomban. A fejezetben a kínálatoptimalizáció és a gravitációs egyenletek irodalmának vizsgálata történik meg. Meghatározásra kerül a kutatási rés, valamint a dolgozat relációja a szakirodalomban megtalálható cikkekhez.

2.1. A kínálatoptimalizáció szakirodalma

A közösségi közlekedés gazdaságtana egészen az 1960-as évekig nyúlik vissza. A szakirodalomban számos cikk megtalálható, amelyek a kínálat és annak optimalizációja mellett olyan szakterületekkel is foglalkoznak, mint az árazás, a méretgazdaságosság, a módok közötti helyettesíthetőség és a felhasználói döntéshozatal, a teljesség igénye nélkül. A kínálatoptimalizáció szorosan kapcsolódik az említett területekhez, így a szakirodalom feltárásához széleskörű kutatás szükséges.

A közösségi közlekedés gazdaságtanával foglalkozó számos tanulmány miatt több olyan cikk is született az elmúlt fél évszázadban, amelyeknek elsődleges célja a szakirodalom rendszerezése. Ebben a kutatómunkában úttörő szerepet játszott Nash (1982). Később Berechman (2013) és Gwilliam (2008) ad áttekintést a közösségi közlekedés gazdaságtanáról. A téma egyik friss tanulmánya (Hörcher és Tirachini, 2021) a közösségi közlekedés optimális tervezésének szakirodalmát tárgyalja, kitérve a kínálatoptimalizáció témájára is. Az említett könyvek és cikkek a dolgozat elkészítése során felhasznált irodalom alapját adják.

A bevezetett kontextus alapján a kínálatot az operátor által felkínált kapacitással azonosítjuk. A kapacitás fogalmát a közlekedésgazdaság igen tágan kezeli, ide tartoznak egyrészt a szolgáltatás jellemzésére használatos fizikai változók, például a követési idő vagy járatsűrűség, valamint a járműméret, másrészt a járművek fizikai jellemzői, valamint az útvonal hossza és tulajdonságai (Hörcher és Tirachini, 2021). Esetünkben előbbiek játszanak fontos szerepet. Bár a dolgozatban a távolsági közlekedésre való tekintettel a zsúfoltság és más szociológiai jellemzők nem jelennek meg, ezen témakörök nem hagyhatók említés nélkül (Hörcher és Graham, 2018).

A kínálatoptimalizáció alapja a költségfüggvények meghatározása, melyek a szolgáltatóra és a felhasználókra terjednek ki. A költségfüggvények más kontextusban is használatosak, ezt bizonyítja ezen részterület szakirodalmi kidolgozottsága. A mérőszámok kidolgozása és meghatározása nem egyszerű feladat, Jara Diaz (1982), Oum és Waters II (1996), valamint Pels és Rietveld (2007) is ezzel foglalkozik. A szakirodalom azonban két részre oszlik annak

tekintetében, hogy a kínálat mindössze a fizikailag mérhető jellemzők függvénye, vagy a kereslet, azaz az utasforgalom is befolyásoló tényező, vagyis a közlekedés végső kibocsátása a megfelelő mérőszám (De Borger et al., 2002; Small és Verhoef, 2007). A dolgozat az utóbbi irányzatot követi.

A felhasználók költségeire áttérve, vannak olyan komponensek, amelyeket maguknak az utasoknak kell viselniük, azok közvetlen természetéből adódóan. Ilyen az utazás monetáris ára, valamint az utazással elvesztegetett időből adódó költségek (Hörcher és Tirachini, 2021). Utóbbi tovább bontható a járművön eltöltött időre (vagy a háztól-házig eljutás idejére), valamint a várakozásból adódó időre, amely magában foglalja az előnytelen indulási időpontokból adódó veszteséget is. Megemlítendő még az átszállásokból adódó várakozási idők is.

Míg a járműveken eltöltött idő viszonylag egyértelműen mérhető, a közösségi közlekedésben jellemzően a menetrend alapján meghatározható, addig a várakozási idő már nem, így különösebb említést érdemel. A várakozási időt elsősorban a vonalon közlekedő járművek átlagos követési ideje befolyásolja, ami pedig nem más, mint az órás indításszám, azaz a járatsűrűség reciproka. Ha a járatsűrűség viszonylag magas és az utasok nem igazítják tevékenységüket a menetrendhez, feltételezhető, hogy véletlenszerűen, állandó ütemben érkeznek az állomásokra, így az elméleti átlagos várakozási idő a követési idő fele (Hörcher és Tirachini, 2021). Azonban egy bizonyos követési idő felett az utasok számára vonzóbbá válhat az indulási időponthoz igazítani tevékenységüket, ami egy passzív várakozási költségként jelenik meg és mivel ezen idő alatt produktív tevékenységet tudnak végezni, az alternatív költség alacsonyabb, mint az állomásokon tapasztalt aktív idővesztés költség (Tirachini et al., 2010). Azzal a kérdéssel, hogy mi az a kritikus követési idő, ami felett az utasok már a menetrend alapján tervezik az utazásukat, több tanulmány is foglalkozik, és bár az utasok között jelentős különbségek mutatkoznak (Ingvardson et al., 2018; Singh et al., 2020), a kritikus követési időt 5 és 12 perc között határozzák meg (Fan és Machemehl, 2009; Berggren et al., 2019). A dolgozatban ennél jóval nagyobb követési idők jelennek meg – 30 perc és 24 óra között – ezért a várakozási idő járatsűrűség-függését egy degresszív exponenciális függvénnyel fejezzük ki.

A szakirodalomban szokásos feltételezés, hogy az egyes utazási szakaszok – esetünkben a várakozás és a járművön töltött idő – felhasználói költségei függetlenek egymástól, és ezek összegzésével megkapjuk az utazás teljes költségét (Hörcher és Tirachini, 2021). Ezt a teljes költséget monetáris dimenzióban szeretnénk kifejezni, ehhez az időértéket kell alkalmaznunk. Az idő értéke az a pénzösszeg, amelyet az utas azért hajlandó fizetni, hogy utazásának ideje

egy egységgel csökkenjen. Az időérték meghatározásának külön irodalma van (Becker, 1965; DeSerpa, 1971; Jara-Díaz, 2007; Wardman et al., 2016), esetünkben az Európai Unió költség-haszon elemzési útmutatóját (Európai Bizottság, 2015) hívjuk segítségül.

Az operátor és a felhasználók költségeinek vizsgálata után térjünk át a kapacitásoptimalizáció témakörére. A szakirodalom szerint a kapacitást addig kell növelni, amíg annak határhaszna nagyobb, mint a határköltsége, így érjük el az optimális kínálatot. A járatsűrűség szerinti optimalizáció alapját Mohring (1972) fektette le, számos tanulmány felhasználja az ebben leírtakat, így a dolgozatban is azonos megközelítést alkalmazunk.

A kínálatoptimalizáció szakirodalmának feltárása során megismerteket összefoglalva, a módszer első lépéseként az operátor és a felhasználók költségeit kell meghatároznunk. Előbbi a járművek közlekedéséből adódó költséggel azonosítható, míg utóbbi a monetáris ár és az egyes utazási szakaszok idővesztés-költségeinek összege. A monetáris dimenzióba konvertálás az utazási időérték segítségével történik. Ezután a költségfüggvények összegének minimumpontja adja az optimális kínálatot.

2.2. A gravitációs egyenletek szakirodalma

A gravitációs egyenletek szakirodalma, a kínálatoptimalizációhoz hasonlóan széleskörű és szerteágazó. A dolgozatban felhasznált egyenletek alapjául szolgáló irodalom megismeréséhez így kitekintést kell tennünk a kereskedelem témakörébe.

A gravitációs egyenletek alkalmazásának egyik alapcikkének Silva és Tenreyro (2006) tanulmánya tekinthető. A szerzők multiplikatív összefüggést használnak a keresett változó kifejezésére, minden tényező különböző kitevővel lép az egyenletbe, súlyának megfelelően, amely általánosan elfogadott alak a közgazdaságtanban. Az egyenlet logaritmikus alakban történő felírása után olyan additív formulához jutunk, amelyből a legkisebb négyzetek elvére alapuló regresszióanalízis segítségével az eredeti egyenlet kitevői becsülhetők.

A dolgozatban a városok közötti utasszámok kifejezése történik gravitációs egyenletek segítségével. Silva és Tenreyro (2006) a városok közötti kereskedelem mértékének kifejezésére használja az összefüggést, a városok közötti távolság és a városok GDP-je segítségével, esetünkben a városok népességszáma fogja betölteni a „tömeg” jellemzőt, míg a városok közötti távolság a vasúti eljutás és a konkurens ágazatok generalizált árában jelenik meg.

Bár Silva és Tenreyro (2006) a gravitációs egyenletek becsléséhez pseudo-maximum-likelihood módszert javasol, a dolgozatban a legkisebb négyzetek elvére alapuló becslés történik, az előbbi módszer témához mért bonyolultsága miatt, valamint mivel nullaközeli

utasforgalmak nem várhatók. A dolgozat így a Leibenstein (1966) által felállított hagyományos gravitációs egyenlet becslő módszert alkalmazza.

A gravitációs egyenleteknek a kétoldalú kereskedelem témakörében történő felhasználásáról Head és Mayer (2014) ad bővebb áttekintést, amely szintén a dolgozatban használt módszert támasztja alá. Emellett Okawa és van Wincoop (2012), valamint Novy (2013) szintén ezen témával foglalkozik.

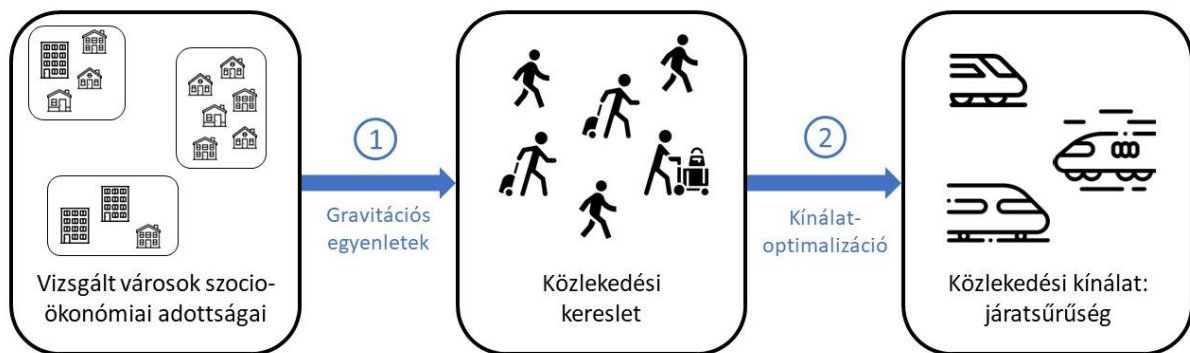
Miután láttuk, hogy a közgazdaságtanban hogyan került kidolgozásra a gravitációs egyenletek elmélete, térjünk át annak a közlekedés témakörében történő felhasználására. Ehhez a közlekedésszervezés és a hálózattervezés témakörében szükséges kutatómunkát végezni. Ebben egyrészt Horváth et al. (2006) nyújt segítséget, amely többek között az analitikus forgalomelőrebecslés módszerét tárgyalja, amely során a forgalomkeltési és -szétosztási modellekben jelenik meg a gravitációs egyenletek használata. Ezen túl érdemes említést tenni Erlander és Stewart (1990), valamint de Dios Ortúzar és Willumsen (2011) tanulmányáról is. Ezek részletesen tárgyalják a gravitációs egyenletek lehetséges formáit és felhasználási lehetőségeit.

Elmondható, hogy a dolgozat a szakirodalomkutatás során feltárt tanulmányokban megtalálható gravitációs egyenletformulákat alkalmazza, a részterületre, azaz a nemzetközi vasúti személyszállításra vonatkozó megkötésekkel, kiegészítésekkel. Összefoglalva megállapítható, hogy míg a vizsgált két tématerület kidolgozottsága részletes, addig a szakirodalomban az inverz kínálatoptimalizációról kevés található meg, valamint a szerző tudomása szerint a gravitációs egyenletekkel történő együttes felhasználásra még nem került sor. A dolgozatban kidolgozott módszer ezen kutatási rést igyekszik betölteni.

3. Modell felállítása

A közösségi közlekedés szervezési gyakorlatban általános módszer az aktuális forgalom gravitációs egyenletekkel történő becslése, valamint a várható utasszámok analitikus forgalomelőrebecsléssel történő előrejelzése. A kereslet ismeretében ezután, kínálatoptimalizáció segítségével beállítható a hálózat elemein a megfelelő járatsűrűség.

A folyamat lineáris felépítésű. A gravitációs egyenletek a forrás- és nyelőpontok mérhető szocio-ökonómiai adataira támaszkodnak, ebből állítanak elő aktuális forgalom nagyságokat. Analitikus forgalomelőrebecslés esetén szintén a kereslet megadása történik, további, a várható fejlődést leíró paraméterek felhasználásával. A kínálatoptimalizáció során a kereslet, valamint a felhasználók és az operátor költségfüggvényeinek ismeretében, a teljes társadalmi költség minimalizálásával, megadható az optimális járatsűrűség az utasszám függvényében, a hálózat minden elemére. Az ismertetett általános módszertan lépései az 1. ábrán láthatók.

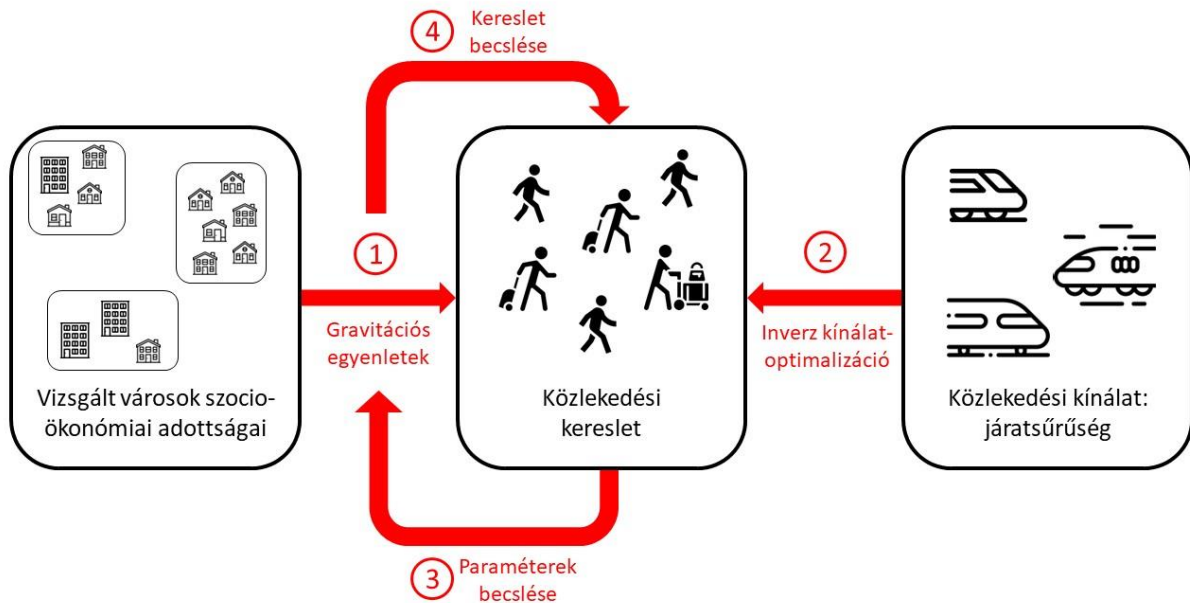


1. ábra: A közösségi közlekedés szervezésének általános gyakorlata
(forrás: www.flaticon.com; a szerző összeállítása)

Míg a városi közösségi közlekedésben széleskörű irodalma van a gravitációs egyenleteknek és az analitikus forgalomelőrebecslésnek, addig távolsági és különösen nemzetközi személyszállítás esetén nincs elfogadott függvényformula, amely a hálózat városainak szociális és gazdasági adatainak segítségével megbízhatóan megbecsülné a forgalmakat. A dolgozat célja ennek a hiányosságnak pótlása, azaz egy nemzetközi forgalomban használható gravitációs egyenlet kidolgozása és annak alkalmazása a közép-európai vasúti hálózatra.

A gravitációs függvényformula kidolgozásához a korábban említett kínálatoptimalizációt kell segítségül hívni, pontosabban annak invertált verzióját. Alapesetben a kínálatoptimalizáció a kereslet függvényében adja meg a megfelelő járatsűrűséget, azonban optimális kínálatot feltételezve, a függvényformula invertálásával, a kereslet visszafejthető a járatsűrűség függvényében.

A kereslet, valamint a forrás- és nyelőpontok szocio-ökonómiai adatainak rendelkezésre állásával a gravitációs egyenletek paraméterei kalibrálhatóvá válnak, ehhez regresszióanalízis kerül felhasználásra. A legjobban illeszkedő függvényformula a paraméterek szignifikanciavizsgálatával, valamint néhány viszonylat becült és tényleges keresleti adatainak összehasonlításával adható meg. Az invertált kínáloptimalizációt használó kidolgozott módszer lépéseit a 2. ábra ismerteti.



2. ábra: Az invertált kínáloptimalizációt alkalmazó módszertan
(forrás: www.flaticon.com; a szerző összeállítása)

3.1. Kínáloptimalizáció és inverz kínáloptimalizáció

A kínáloptimalizáció célja adott utasszám mellett a teljes társadalmi költség minimalizálása és ez alapján az optimális járatsűrűség meghatározása. A teljes társadalmi költség az operátor és a felhasználók költségeinek összege:

$$TSC_{ij}(Q_{ij}, f_{ij}) = Q_{ij} c_{ij}^u(Q_{ij}, f_{ij}) + C_{ij}^o(Q_{ij}, f_{ij}) \quad (1)$$

Optimális kínálat esetén a teljes társadalmi költség járatsűrűség szerinti deriváltja zéró, azaz a két költségkomponens járatsűrűség szerinti deriváltjainak összege nulla:

$$\frac{\partial TSC_{ij}(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}} = \frac{\partial c_{ij}^u(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}} Q_{ij} + \frac{\partial C_{ij}^o(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}} = 0 \quad (2)$$

A deriváltak kifejezésével és az egyenlet átrendezésével az optimális járatsűrűség megadható az utasszám függvényében:

$$f_{ij}^* = f(Q_{ij}) \quad (3)$$

A fenti egyenlet invertálásával azonban az utasszám fejezhető ki az optimális járatsűrűség függvényében:

$$Q_{ij} = f^{-1}(f_{ij}^*) \quad (4)$$

$$Q_{ij} = - \frac{\frac{\partial c_{ij}^o(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}}}{\frac{\partial c_{ij}^u(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}}} \quad (5)$$

Az operátor költségfüggvénye az alábbi egyenlet szerint alakul, a távolságra vetített fajlagos üzemeltetési költség, a távolság, az egy órában közlekedő járatok és a napi üzemidő szorzata:

$$c_{ij}^o(Q_{ij}, f_{ij}) = r d_{ij} f_{ij} \tau_{ij} \quad (6)$$

Az üzemeltetők költségei a valóságban természetesen ennél sokkal bonyolultabban adhatók meg, nem elhanyagolhatók például a járműméretekből adódó költségkülönbségek és az országoként különböző személyzeti munkabérek sem. Azonban az ezek vizsgálatához szükséges adatok beszerzése nehézkes és bevezetésük nem gazdagítja a modellt érdemben, ezért az ismertetett egyszerűsített üzemeltetési költség egyenlet kerül felhasználásra.

A felhasználók generalizált költségfüggvénye három komponens összegeként adódik. Egyrészt számolni kell az utazás monetáris költségével, másrészt az utazási időből és a várakozási időből adódó költségekkel, utóbbiakat az utazási időérték konvertálja monetáris dimenzióba:

$$c_{ij}^u(Q_{ij}, f_{ij}) = p_{ij} + \alpha (t_{ij} + t^w_{ij}) \quad (7)$$

A várakozási idő kifejezése az esetenként nagyon alacsony járatsűrűség miatt nem egy lineáris vagy lineáris szakaszok összegeként felírt függvénnyel történik – mint az a városi közlekedésben szokásos – hanem egy egynél kisebb kitevőjű hatványfüggvény segítségével:

$$t^w_{ij} = (0,5 f_{ij}^{-1})^\theta \quad (8)$$

ahol: $\theta \in]0; 1[$

Hasonlóan az üzemeltetési költség egyszerűsített felírásához, a felhasználói költség vizsgálata sem teljes az említett három komponenssel. Azonban a hasznosság és az adatgyűjtés nehézségeit szem előtt tartva az utazási idő változékonysága – azaz a késések mértéke és szórása – vagy a komfort és a zsúfoltság például nem kerül vizsgálatra. Így a felhasználók generalizált költsége, a várakozási idő egyenletét behelyettesítve:

$$c_{ij}^u(Q_{ij}, f_{ij}) = p_{ij} + \alpha t_{ij} + \alpha (0,5 f_{ij}^{-1})^\theta \quad (9)$$

Az operátor és a felhasználók költségfüggvényeinek járatsűrűség szerinti deriváltjai az alábbiak:

$$\frac{\partial C_{ij}^o(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}} = r d_{ij} \tau_{ij} \quad (10)$$

$$\frac{\partial c_{ij}^u(Q_{ij}, f_{ij})}{\partial f_{ij}} = -0,5^\theta \alpha \theta f_{ij}^{-\theta-1} \quad (11)$$

A kínálatoptimalizáció invertálásával felírt egyenlet tehát, azaz az utasszám a járatsűrűség függvényében:

$$Q_{ij} = \frac{r d_{ij} \tau_{ij}}{0,5^\theta \alpha \theta} f_{ij}^{\theta+1} \quad (12)$$

A fenti egyenlet alapján látható, hogy a hálózat két szomszédos állomása között az utasszám a járatszámmal, a napi üzemidővel és a távolsággal arányosan változik, az utazási időérték, a várakozási idő kitevője és a fajlagos üzemeltetési költség pedig konstans értéként lép az egyenletbe.

3.2. Gravitációs egyenletek

A gravitációs egyenletek segítségével a hálózat két meghatározott pontja között becsülhető a forgalom, a forrás- és nyelőpontokra jellemző szocio-ökonómiai adatok és a viszonylatra jellemző utazási értékek felhasználásával. A gravitációs egyenletek felírása multiplikatív alakban történik, általános alakjukat az alábbi egyenlet szemlélteti:

$$Q_{ij} = \prod_m X_m^{\chi_m} \quad (13)$$

Legegyszerűbb esetben az utasszám kifejezhető úgy, hogy kizárólag a kezdő- és végpont lakosságszámától, a vasúti utazás generalizált árától és a vasúttal konkurens egyéni közúti eljutás generalizált árától függ:

$$Q_{ij} = M_i^\beta M_j^\gamma c_{ij}^\delta c^a_{ij}^\varepsilon \quad (14)$$

A vasúti utazás generalizált ára a 3.1. fejezetben ismertetett felhasználói költség függvény szerint fejezhető ki, míg az egyéni közúti közlekedés generalizált ára – némi egyszerűsítéssel élve – a közúti eljutás idejével arányos:

$$c^a_{ij} = \alpha t^a_{ij} \quad (15)$$

A (14) egyenlet nagy hiányossága azonban, hogy segítségével nem lehetséges több ponton áthaladó utazás modellezése. A 3.1. fejezetben a kínálatoptimalizáció invertálásával kifejezett utasszám két szomszédos pont között értelmezhető a hálózaton, míg az itt ismertetett gravitációs egyenlet minden kezdő- és végpont esetén értelmes. A probléma feloldható lenne a gravitációs egyenletekkel meghatározott utasszámok a hálózat élére történő ráterhelésével, azonban ez minden élre egy additív kifejezést eredményezne. A 3.3. fejezetben viszont látni fogjuk, hogy ez az alak matematikailag nem kezelhető, így be kell vezetnünk az elérhetőségeket.

Az elérhetőségek segítségével megadható, hogy a hálózat egy adott pontjában hány olyan utas jelenik meg felszállóként, aki nem az adott város lakosa. Ennek bevezetésével a gravitációs egyenletek – továbbra is multiplikatív alakban – felírhatók a hálózat minden élére és a továbbiakban matematikailag kezelhetők. Egy vizsgálni kívánt város elérhetősége a hálózat többi városától való távolsága, azok népességszáma és az elérhetőségi kitevő függvényében kerül felírásra:

$$R^i_r = f(d_{ik}, M_k, \kappa) \quad (16)$$

A szakirodalomban számos elérhetőségi egyenlet megjelenik, ezek közül az alábbi formulák kerülnek vizsgálatra:

$$R^i_1 = \sum_{k \neq i} M_k d_{ik}^{-\kappa} \quad (17)$$

$$R^i_2 = \sum_{k \neq i} M_k e^{-\kappa d_{ik}} \quad (18)$$

$$R^i_3 = \prod_{k \neq i} M_k d_{ik}^{-\kappa} \quad (19)$$

$$R^i_4 = \prod_{k \neq i} M_k e^{-\kappa d_{ik}} \quad (20)$$

A vizsgált formulák mindegyikében az egyes városok elérhetősége a többi város népességszámától és a vizsgált várostól mért távolságától hatvány vagy exponenciális függvény formában függ. Az első kettő formula ezek összegeként, utóbbi kettő ezek szorzataként fejezi ki az elérhetőséget. A gravitációs egyenletek az ismertetett elérhetőségekkel kiegészítve az alábbiak szerint alakulnak:

$$Q_{ij,r} = M_i^{\beta_1} R_r^{\beta_2} M_j^{\gamma_1} R_r^{\gamma_2} c_{ij}^{\delta} c_{ij}^{\alpha \varepsilon} \quad (21)$$

3.3. Regresszióanalízis

A 3.1. fejezetben látott invertált kínálatoptimalizáció célja a kereslet visszafejtése, azaz az egyes éleken megjelenő utasszám meghatározása volt. Az egyenletben szereplő változók és konstans értékek, a fajlagos üzemeltetési költség kivételével, mind mérhetők vagy a szakirodalomból kölcsönözhetők. A 3.2. fejezetben felállított gravitációs egyenletek szintén a keresletet fejezik ki, a szereplő változók és konstansok szintén mérhetők, eltekintve a kitevőktől.

A felállított módszer következő lépésének célja a kétféleképpen kifejezett keresleti utasszámok egyenlővé tétele, majd az említett fajlagos üzemeltetési költség és a gravitációs egyenletek kitevőinek regressziószámítás segítségével történő becslése. Megjegyzendő, hogy a fajlagos üzemeltetési költség akár ismert változókét is kezelhető lenne, de az ezzel kapcsolatos adatgyűjtés a vizsgált viszonylatokon, a vasúttársaságok üzletpolitikai titoktartása miatt akadályba ütközik, valamint a módszer lehetőséget kínál az ismeretlenként történő kezelésre.

A (12) és (14) egyenletek egyenlővé tételével az alábbi kifejezés adódik:

$$\frac{r d_{ij} \tau_{ij}}{0,5^{\theta} \alpha \theta} f_{ij}^{\theta+1} = M_i^{\beta} M_j^{\gamma} c_{ij}^{\delta} c_{ij}^{\alpha \varepsilon} \quad (22)$$

Látható, hogy ilyen formában az említett változók becslése csak komplikált módon lehetséges, ezért érdemes a kifejezést logaritmikus alakban felírni, hogy lineáris regressziószámítás legyen alkalmazható, valamint a fajlagos üzemeltetési költséget a jobb oldalra csoportosítani:

$$\ln \frac{d_{ij} \tau_{ij}}{0,5^{\theta} \alpha \theta} f_{ij}^{\theta+1} = -\ln r + \beta \ln M_i + \gamma \ln M_j + \delta \ln c_{ij} + \varepsilon \ln c_{ij}^{\alpha} \quad (23)$$

A fenti egyenlet bal oldalán minden változó és konstans ismert. A további könnyebb kezelés érdekében vezessük be a következő két jelölést:

$$K = \ln \frac{d_{ij} \tau_{ij}}{0,5^\theta \alpha^\theta} f_{ij}^{\theta+1} \quad (24)$$

$$\rho = -\ln r \quad (25)$$

Az egyszerűsített jelölésekkel a fenti egyenlet, valamint a további gravitációs formulákból származó egyenletek a következők.

$$K = \rho + \beta \ln M_i + \gamma \ln M_j + \delta \ln c_{ij} + \varepsilon \ln c^a_{ij} \quad (26)$$

$$K_r = \rho + \beta_1 \ln M_i + \beta_2 \ln R^i_r + \gamma_1 \ln M_j + \gamma_2 \ln R^j_r + \delta \ln c_{ij} + \varepsilon \ln c^a_{ij} \quad (27)$$

4. Eredmények

4.1. Regressziós becslések

A felállított módszertan következő lépésében a 3.3. fejezetben levezetett egyenletek függő változóinak becslése következik. Ehhez a legkisebb négyzetek elvére alapuló lineáris regressziószámítás kerül felhasználásra, a változók becslése az RStudio szoftver segítségével történik.

A felhasznált vasútspecifikus adatok, nevezetesen a vasúti eljutási idők, járatsűrűségek, napi üzemidők és jegyárak, a vizsgált viszonylatokon szolgáltató vasúttársaságok honlapjáról származnak. A közúti eljutási idők, valamint a távolságok a Google adatai alapján kerültek legyűjtésre. A szerző kérésre az adatokat rendelkezésre bocsátja.

A regressziószámítás elvégzése előtt meg kell határozni a használt konstansok értékét is. Az utazási időérték az Európai Bizottság költség-haszon elemzési útmutatója alapján (Európai Bizottság, 2015) és a vonatkozó tanulmányok (Wardman et al., 2016) ajánlása szerint 4,3 euró és 12,9 euró közötti érték. Mivel a felhasználáshoz egyetlen érték szükséges, valamint a nemzetközi járatokon jelenlévő jelentős nem üzleti célú utasok részaránya miatt válasszunk 10 eurót utazási időértéknek.

Az érzékelt várakozási idő a járatsűrűség függvényében egy egynél kisebb kitevőjű hatványfüggvényként kerül kifejezésre. A várakozási idő kitevőjét állítsuk be 0,8 értékre, így a nagyobb követési idők esetén a modell az érzékelt várakozási időt a követési idő felénél alacsonyabbra becsüli.

Az elérhetőségek kifejezésében szereplő negatív kitevő értéke a rendelkezésre álló szakirodalom segítségével nem határozható meg, így szenzitivitásvizsgálatra van szükség. Azonban a kitevő 1 értéktől való túlzott eltávolodása a modellek értelemvesztéséhez vezethet, mivel az a távolságok kitevőjeként vagy szorzójaként szerepel. A különböző elérhetőségeket tartalmazó gravitációs egyenletek minden esetben azokat az elérhetőségi kitevőket tartalmazzák, amelyek a modell legjobb illeszkedéséhez vezetnek.

Az említett változók értékeinek meghatározása után vizsgáljuk azt a modellt, amely nem tartalmaz elérhetőségeket, előzetes ellenőrzés céljából. Bár ez a modell biztosan nem a legjobb eredményt fogja adni, nagyságrendi vizsgálatok és a minta elemszám nagyságának ellenőrzése elvégezhető, valamint később összehasonlításként fog szolgálni az elérhetőségeket is tartalmazó modellek vizsgálatánál.

```

Call:
lm(formula = Kereslet ~ Beta + Gamma + Delta + Epsilon,
    data = modell0adat)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.73672 -0.67703 -0.09521  0.45317  3.13330

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  5.0499     2.5807   1.957  0.05358 .
Beta         0.3393     0.1189   2.853  0.00541 **
Gamma        0.3840     0.1181   3.250  0.00164 **
Delta       -4.0447     0.3743 -10.806 < 2e-16 ***
Epsilon      2.3485     0.4183   5.614  2.32e-07 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.001 on 87 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7225, Adjusted R-squared:  0.7098
F-statistic: 56.63 on 4 and 87 DF, p-value: < 2.2e-16

```

3. ábra: Az alapmodell eredménytáblája (forrás: RStudio; a szerző összeállítása)

A 3. ábrán, az RStudio szoftver segítségével készített becslés eredménytábláját megvizsgálva látható, hogy a becsült változók előjelhelyesek. A kezdő és végpont népszerűségének kitevője csak kismértékben tér el egymástól, ami a valóság logikus magyarázata. A vasúti utazás generalizált költségének kitevője negatív, ez a várakozásoknak megfelel, hiszen a költség növelésének a kereslet csökkenését kell eredményeznie. A konkurens közúti közlekedés generalizált árának kitevője pozitív, ez a két mód közötti helyettesíthetőségre utalva szintén valósághű.

A modell jóságát, azaz illeszkedését a szignifikanciaértékek írják le. Látható, hogy a tengelymetszet kivételével a becsült változók szignifikanciája megfelelő. Emellett fontos megfigyelni az R^2 és a módosított R^2 értékeket is, melyek a változók magyarázó erejének fokára utalnak. A körülményeket figyelembe véve a két érték elfogadható.

A fentiekben vizsgált alapmodell csak összehasonlítási célokra használható, hiszen nem tartalmaz elérhetőségi változókat, így keresleti értékek visszaszámolásának nincs értelme. Megjegyzendő azonban, hogy olyan speciális hálózatokon, ahol az átszállások nem értelmezettek, azaz, ha például a hálózatot egy teljes gráf írja és minden esetben az átszállásmentes utazás a legelőnyösebb alternatíva, már ez a modell is felhasználható a keresleti utasszámok becslésére.

Az alapmodell után térjünk át az elérhetőségeket is tartalmazó modellek vizsgálatára, pontosabban az elérhetőségi kitevő szenzitivitásvizsgálatára. Az 1. sz. modell esetén az eljárás nem járt sikerrel, mivel az egyensúly a növekvő értékek felé található, azonban az 1 értéktől való túlzott eltávolodás a modell értelemvesztését eredményezheti. ($\kappa = 2$ választás esetén egy

egymástól 100 kilométerre fekvő várospár közötti távolság már 10 000 kilométernek érződik! Ennél nagyobb értékválasztás már nem reális.) Emiatt az eredmények elemzése során a $\kappa = 2$ kerül alkalmazásra, azonban az említettek ismeretében meg kell állapítani, hogy ez a modell nem megfelelő, az alkalmazott 1. sz. elérhetőségi formula nem használható.

A 4. sz. modell vizsgálata során hasonló probléma adódik. Az egyensúly a $\kappa = 0$ értékválasztás esetén állna fenn, azonban ez nem engedhető meg, hiszen így a távolságok nem befolyásolnák az elérhetőségek értékeit, emiatt a 4. sz. modell sem használható. Az elemzés során a minimálisan megengedhetőnek vélt $\kappa = 1$ kerül alkalmazásra.

A 2. és 3. sz. modell esetében a szenzitivitásvizsgálat eredményeképpen $\kappa = 1,1$ adódik (egymástól függetlenül), amely a várt határokon belül helyezkedik el. A regresszióanalízis eredményeit, az említett elérhetőségi kitevők alkalmazása esetén, a 4. táblázat ismerteti. Az 1. és 4. sz. modell csak összehasonlítás céljából került feltüntetésre, a továbbiakban a 2. és 3. sz. modell vizsgálata történik.

=====				
Dependent variable:				

	kereslet			
	(1)	(2)	(3)	(4)

Beta1	-0.502 (0.375)	0.474*** (0.122)	0.398*** (0.117)	0.416*** (0.127)
Beta2	0.984** (0.412)	0.002*** (0.001)	-0.094** (0.038)	-0.0001 (0.0001)
Gamma1	-0.335 (0.374)	0.510*** (0.121)	0.493*** (0.121)	0.452*** (0.126)
Gamma2	0.849** (0.411)	0.002** (0.001)	0.002** (0.001)	-0.0001 (0.0001)
Delta	-4.143*** (0.366)	-4.169*** (0.360)	-4.130*** (0.363)	-4.092*** (0.373)
Epsilon	2.769*** (0.436)	2.817*** (0.427)	2.757*** (0.429)	2.615*** (0.444)
Constant	6.336** (2.553)	1.049 (2.782)	26.976*** (9.643)	3.815 (2.667)

Observations	92	92	92	92
R2	0.744	0.752	0.747	0.732
Adjusted R2	0.726	0.734	0.729	0.713
Residual Std. Error (df = 85)	0.973	0.958	0.968	0.995
F Statistic (df = 6; 85)	41.197***	42.878***	41.760***	38.691***
=====				
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01			

4. ábra: Az elérhetőségeket használó modellek eredménytáblája
(forrás: RStudio; a szerző összeállítása)

A 2. és 3. sz. modellek esetén megfigyelhető, hogy a népességszámok, valamint a generalizált utazási költségek kitevői továbbra is megfelelő előjellel rendelkeznek. Előbbi esetben az elérhetőségek kitevői is a várakozásnak megfelelően pozitívak, bár igen nulla közeli értékek, értelmezhető pozitív számok. Utóbbi modell alkalmazása során a kiinduló pont elérhetőségének kitevőjére negatív érték adódik, amely nem megfelelő, ezért a 3. sz. formula alkalmazását is el kell utasítani.

A fent említetteket figyelembe véve már csak a 2. sz. modell bizonyulhat megfelelőnek. A további vizsgálatok és az áttekinthetőség kedvéért az 5. ábrán a 2. sz. modell eredménytáblája látható.

```
Call:
lm(formula = Kereslet ~ Beta1 + Beta2 + Gamma1 + Gamma2 + Delta +
    Epsilon, data = modellZadat)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.5969 -0.5262 -0.1582  0.5198  2.7616

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.0485401  2.7820722   0.377  0.707193
Beta1        0.4739054  0.1218579   3.889  0.000199 ***
Beta2        0.0023815  0.0008511   2.798  0.006360 **
Gamma1       0.5095524  0.1214986   4.194  6.70e-05 ***
Gamma2       0.0020359  0.0008487   2.399  0.018636 *
Delta       -4.1694041  0.3604958 -11.566 < 2e-16 ***
Epsilon      2.8170800  0.4270048   6.597  3.39e-09 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.9582 on 85 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7517, Adjusted R-squared:  0.7341
F-statistic: 42.88 on 6 and 85 DF, p-value: < 2.2e-16
```

5. ábra: A 2. sz. modell eredménytáblája (forrás: RStudio; a szerző összeállítása)

Miután a változók előjelvizsgálata, valamint az elérhetőségi kitevő szenzitivitásvizsgálata során a 2. sz. modell megfelelőnek bizonyult, vizsgáljuk meg a változók szignifikanciáját. A népességszámok, valamint a generalizált árak kitevőinek szignifikanciaértéke megfelelő. Az elérhetőségek kitevőinek szignifikanciája az elfogadható kategóriába tartoznak. Egyedül a fajlagos üzemeltetési költség kitevője – azaz a tengelymetszet – nem szignifikáns, de ez bővebb említést igényel, hiszen értéke a különböző modellek alkalmazása során nagyon ingadozik.

A modellek vizsgálata során megfigyelhető, hogy a tengelymetszet értéke nagymértékben változik a többi változó értékéhez képest. Bár a becült értékből elméletileg visszszámolható lenne a vasúti járművek távolságegységre eső fajlagos üzemeltetési költsége, az a valóságban sokkal bonyolultabban adható meg, számtalan, a modell felállítása során figyelembe nem vett tényezőtől függ. Megjegyzendő, hogy a probléma a legkisebb négyzetek elvére alapuló

regressziószámítás alkalmazásában keresendő (Silva és Tenreyro, 2006), így a hivatkozott tanulmányban javasolt pseudo-poisson-maximum-likelihood módszer használata javasolt. Azonban ennek alkalmazása túlmutat a dolgozat korlátjain, emiatt a modell ilyen célra történő alkalmazásától tekintünk el.

Visszatérve a 2. sz. modell vizsgálatára, a kezdő és végpontok népességszámainak kitevői, valamint az elérhetőségek kitevői várhatóan nem térnek el egymástól jelentősen. Egyrészt ezt támasztja alá az alapmodell eredménye, valamint mivel a hálózat minden élén lehetőség van mindkét irányban utazni, ezért logikusan feltételezhetjük ezt. Az 5. ábrán látható becsült értékek alapján megállapítható, hogy az eredmények a várakozásoknak megfelelőek.

Mindezeket túl az R^2 és a módosított R^2 értékek vizsgálata is szükséges. Mivel a többi vizsgált modellen kívül más összehasonlítási alappal nem rendelkezünk, tekintjük elfogadhatónak a kapott értékeket. Az eredményekre támaszkodva, valamint a többi modell eredményeivel történő összehasonlítás elvégzése után a 2. sz. modell kerül a továbbiakban felhasználásra.

A regresszióanalízis elvégzése és a kapott eredmények vizsgálata után kijelenthető, hogy a felvetettek közül az alábbi gravitációs egyenlet becsüli legjobban a keresleti utasszámokat. Az egyenletben a 2. sz. modellben alkalmazott elérhetőségi formula kerül alkalmazásra, a kitevők a regresszióanalízis és a szenzitivitásvizsgálat eredményei.

$$Q_{ij} = M_i^{\beta_1} \left(\sum_{k \neq i} M_k e^{-\kappa d_{ik}} \right)^{\beta_2} M_j^{\gamma_1} \left(\sum_{l \neq j} M_l e^{-\kappa d_{jl}} \right)^{\gamma_2} c_{ij}^{\delta} c_{ij}^{\alpha \varepsilon} \quad (28)$$

$\alpha = 10$	$\beta_1 = 0,4739054$	$\gamma_2 = 0,0020359$
$\theta = 0,8$	$\beta_2 = 0,0023815$	$\delta = -4,1694041$
$\kappa = 1,1$	$\gamma_1 = 0,15095524$	$\varepsilon = 2,8170800$

Az egyenlet rendelkezésre állásával kiszámolhatóak a becsült utasszámok a vizsgált hálózaton. Az egyes viszonylatokhoz tartozó keresleti adatokat a 6. ábrán látható forgalomáramlási mátrix tartalmazza. A táblázatban csak a vizsgált közvetlen eljutást kínáló viszonylatok utasszámai láthatók. Bár ezek között szerepel három belföldi viszonylat is (a városok fontos hálózati szerepe miatt), az ezen esetben kapott eredményeket ne tekintjük elfogadhatónak, hiszen a modell alapvetően nemzetközi utazások adataira támaszkodik, amelyek jellemzői jelentősen eltérhetnek a belföldi utazások azonos jellemzőitől.

		Destination													
		VIE	BER	BUD	BUK	INN	LJU	MIL	MUN	BRA	PRA	WAR	VEN	ZAG	ZUR
origin	VIE	-	401	8687	211	1221	186	-	2862	3967	1992	672	173	145	2090
	BER	273	-	1769	-	-	-	-	3234	135	1133	2226	-	-	1081
	BUD	9053	1721	-	484	550	253	-	2745	4276	2234	219	-	98	989
	BUK	220	-	465	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	INN	1370	-	376	-	-	66	-	333	60	91	-	-	-	450
	LJU	195	-	288	-	72	-	-	-	-	-	-	-	250	96
	MIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4622	-	440
	MUN	2632	3540	2855	-	575	-	-	-	-	2377	-	192	-	772
	BRA	4132	148	4805	-	165	-	-	-	-	3076	97	-	-	137
	PRA	1657	1520	2700	-	67	-	-	1911	2648	-	1048	-	-	24
	WAR	735	2414	319	-	-	-	-	-	149	804	-	-	-	-
	VEN	468	-	-	-	-	-	5136	230	-	-	-	-	-	37
	ZAG	146	-	102	-	-	247	-	-	-	-	-	-	-	148
	ZUR	1817	1177	1014	-	413	86	467	455	129	27	-	33	138	-

VIE: Bécs; BER: Berlin; BUD: Budapest; BUK: Bukarest; INN: Innsbruck; LJU: Ljubljána; MIL: Milánó; MUN: München; BRA: Pozsony; PRA: Prága; WAR: Varsó; VEN: Velence; ZAG: Zágráb; ZUR: Zürich

6. ábra: A 2. sz. modell alkalmazásával becsült keresleti utasszámok
(Megj.: mértékegység: fő / nap) (a szerző összeállítása)

A 6. ábrán látható értékek közül érdemes első sorban azokra különös figyelmet fordítani, amelyeknek kiinduló vagy végpontja hálózati szempontból kiemelt helyzetben lévő város. Míg az olyan forrás- és nyelőpontokkal, amelyekből csak néhány kapcsolat indul ki, nem végezhető átfogó vizsgálat, addig a hálózat központjában elhelyezkedő városok esetén igen.

Az egy pontból kiinduló forgalmakat vizsgálva látható, hogy a közelben fekvő végpontok az utazások jelentős részeinek céljai. Bécs esetén megfigyelhető, hogy Budapest, München, Pozsony, Prága és Zürich felé van intenzív kapcsolat, míg a további desztinációk nem ennyire jelentősök. Budapest és Prága esetén hasonló megállapítások tehetők, kiemelve, hogy utóbbi jelentős utasforgalmat bonyolít a vele kapcsolatban álló szinte minden várossal. Ellentétben Zürichhel, amely szintén sok összeköttetéssel rendelkezik, viszont jellemzően alacsonyabb utasszámok mellett. A hálózat szélein fekvő városok esetében ne vonjunk le messzemenő következtetéseket, ezen viszonylatok vizsgálatához egy kibővített hálózati adatokkal rendelkező modell használata javasolt.

Fontos említést tenni arról, hogy láthatóan az egyes viszonylatok különböző irányokban a forgalmak nem egyeznek meg. Ez adódhat a becsült paraméterek kismértékű pontatlanságából, de a modellben megengedett egy oda-vissza utazás során különböző közlekedési módok

használata is, sőt a két utazás jellemzői (például a vasúti eljutási idő vagy jegyár) eltérőek is lehetnek. Emellett a felvázolt probléma a különböző városok különböző elérhetőségéből is adódhat, de mivel egy esetben sem mutatkozik jelentős eltérés a két irány forgalma között, ezért tekintjük a kapott értékeket megfelelőnek.

Érdemes felhívni a figyelmet néhány kiemelkedő eredményre. Látható, hogy a Budapest – Bécs viszonylat kiemelten nagy utasforgalommal rendelkezik, de hasonló mondható el a Budapest – Pozsony, valamint a Bécs – Pozsony viszonylatokról is. Az értékek feltételezhetően a központi hálózati szerep és a nagy elérhetőségi mutatók eredményei. Ellenben található viszonylag kis utasforgalmat bonyolító útvonalak is, ezek jellemzően a Zürichet és Innsbruckot érintő viszonylatok. Az eredményeket valószínűsíthetően az említett városok alacsony népességszáma eredményezi.

Miután láttuk, hogy a vizsgált hálózaton milyen keresleti utasszám jelentkezik naponta, érdemes ellenőrzést tenni, hogy a kiszámolt utasszámok milyen kihasználtságot eredményeznek az egyes viszonylatokon, a járműméretek ismeretében. Fontos megemlíteni, hogy a modellben a járműméretek nem jelentek meg, így a kihasználtság értékek független ellenőrzésnek tekinthetők. Az inverz kínálatoptimalizáció alkalmazásánál mindössze annyit feltételeztünk, hogy a szolgáltatók optimális kínálatot tartanak fenn, valamint mindenképpen 100% alatti kihasználtság értékeknek kell adódnuk.

Az említett ellenőrzés elvégzéséhez a 7. ábra nyújt segítséget, melyen az egy járatra vetített utasszám látható, minden vizsgált viszonylaton. Az eredmények a 6. ábrán látható értékek napi járatszámmal történő osztásával adódnak. (Ezzel feltételezzük, hogy az utasok egyenletesen oszlanak el a járatok között, ami természetesen nem feltétlen igaz, viszont az ellenőrzés elvégzéséhez elfogadható kitétel.) A hálózaton jellemzően 2 és 10 kocsis közötti hosszúságú szerelvények közlekednek, amely körülbelül 150-800 fő férőhelynek felel meg. Megfigyelhető, hogy néhány kiemelkedően magas és extrém alacsony utasszám kivételével értelmezhető kihasználtság értékek adódnak.

		Destination													
		VIE	BER	BUD	BUK	INN	LJU	MIL	MUN	BRA	PRA	WAR	VEN	ZAG	ZUR
origin	VIE	-	100	483	211	47	186	-	220	99	199	366	58	72	348
	BER	91	-	885	-	-	-	-	170	68	162	445	-	-	216
	BUD	503	860	-	121	275	253	-	457	475	248	219	-	98	495
	BUK	220	-	116	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	INN	51	-	188	-	-	66	-	42	60	91	-	-	-	50
	LJU	195	-	288	-	72	-	-	-	-	-	-	-	83	96
	MIL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	201	-	55
	MUN	239	169	476	-	72	-	-	-	-	340	-	96	-	129
	BRA	106	74	-	-	165	-	-	-	534	384	97	-	-	137
	PRA	166	217	300	-	67	-	-	273	331	-	349	-	-	12
	WAR	368	402	319	-	-	-	-	-	149	268	-	-	-	-
	VEN	156	-	-	-	-	-	223	115	-	-	-	-	-	37
	ZAG	73	-	102	-	-	82	-	-	-	-	-	-	-	148
	ZUR	303	235	507	-	46	86	58	76	129	14	-	33	138	-

VIE: Bécs; BER: Berlin; BUD: Budapest; BUK: Bukarest; INN: Innsbruck; LJU: Ljubljána;
MIL: Milánó; MUN: München; BRA: Pozsony; PRA: Prága; WAR: Varsó; VEN: Velence;
ZAG: Zágráb; ZUR: Zürich

7. ábra: A 2. sz. modell alkalmazásával becsült keresleti utasszámok
(Megj.: mértékegység: fő / járat) (a szerző összeállítása)

4.2. Alkalmazás

Miután a legjobban illeszkedő gravitációs egyenlet kiválasztásra került és a regresszióanalízis megadta a megfelelő kitevőket, lehetőség nyílik olyan viszonylatok vizsgálatára, amelyek az adatsorban nem szerepeltek, viszont földrajzi, gazdasági és társadalmi szempontból illeszkednek a modellbe. A fejlesztett módszer ilyen típusú felhasználásra való alkalmasságát legjobban egy olyan várospár vizsgálatával lehet bemutatni, ahol jelenleg nincs vasúti összeköttetés, azonban arra igény és szándék mutatkozik, de a részletes megvalósítás – nevezetesen a járatsűrűség – még nem eldöntött. Erre példának hozható a jelenleg is kivitelezés alatt álló Budapest – Belgrád vasútvonal, melynek esetében a gravitációs egyenlet alkalmazásához szükséges adatok már ismertek, így a különböző járatszámokhoz tartozó várható utasforgalom megadható. (Ebben az esetben már éljünk azzal a feltételezéssel, hogy a két irány forgalma megegyezik, valamint Belgrád esetében egy átlagos elérhetőségi értéket állítsuk be, hiszen ilyen értékkel a modell alapján nem rendelkezünk.) Az 1. táblázat a szerző által választott lehetséges járatsűrűségekhez tartozó keresletet szemlélteti.

1. táblázat: A Budapest – Belgrád vasútvonal becsült keresleti utasszáma különböző járatsűrűségek mellett (*a szerző összeállítása*)

Járatsűrűség [járat / nap]	Követési idő [óra]	Keresleti utasszám [fő / nap]	Keresleti utasszám [fő / járat]
3	8	1641	547
4	6	2103	526
6	2	1959	327
8	2	2612	327
16	1	3216	201

Megfigyelhető, hogy a járatsűrűség növelésével nem növekszik egyértelműen a napi keresleti utasszám, valamint nagyobb járatsűrűség mellett jellemzően csökken az egy járaton jelenlévő utasok száma, így kisebb méretű járművek is elegendők. A Budapest – Belgrád vasútvonal optimális járatsűrűségének beállításánál, más fontos közlekedésre jellemző adatok mellett, az ismertett értékek fontos szerepet játszhatnak.

A fenti példa rávilágít a fejlesztett módszer azon előnyére, hogy a gravitációs egyenlet és a járatsűrűség ismeretében a várható utasszám becsülhető anélkül, hogy az adott viszonylaton az utazási szokásokról és a felhasználók preferenciáiról ismeretekkel rendelkeznénk. A módszer csak elérhető és hivatalos forrásból is beszerezhető adatokra épít, így annak alkalmazása nem ütközik adatgyűjtési akadályokba.

Miután láttuk, hogy a módszer hogyan alkalmazható egy jelenleg építés alatt álló vasútvonal várható utasszámának becslésére, vizsgáljuk meg, hogyan reagál a kereslet egy működő viszonylaton a járatsűrűség változtatására. A korábban említett, az Európai Bizottság által koordinált projektre visszautalva, érdemes elemezni a Budapest és Bécs közötti vasúti utasszám változását a projekt megvalósulása esetén.

A modell által jelenleg becsült napi utasszám a Budapest – Bécs viszonylaton egy irányban (átlagolva) 8870 fő / nap. Az üzemidő és a menetidő jelentős változásával a projekt hatására nem számolhatunk, így annak vizsgálata érdemes, hogy a jelenlegi járatsűrűség (18 vonat/nap/irány) növelésére hogyan reagál a kereslet. A csúcsidőszakokban 30 perces követési idő alkalmazása esetén 24 vonatra kell naponta közlekednie a két főváros között, ami 9857 fő keresletet indukál, ez 11%-os növekedést jelent. A teljes üzemidőben félórás követés alkalmazása esetén 10103 fő utas várható, ami pedig 14%-os növekedésnek felel meg. A becsült utasszám-növekedést figyelembe véve meggondolandó, hogy a járatsűrűség növelésével járó drasztikus költségek kifizetődők-e?

5. Konklúzió

A nemzetközi vasúti személyszállítás liberalizációjának üteme az Európai Unióban egyelőre elmarad a várakozásoktól, így felmerül a kérdés, hogy valóban a versenypiac a legjobb gazdasági szerkezet a vasúton? A téma aktualitását az Európai Bizottság érdeklődése támasztja alá, hiszen a határokon átnyúló közszolgáltatások társadalmi hasznainak jobb kihasználásához rövid időn belül szabályozási beavatkozásra lehet szükség. A különböző piacszerkezetek vizsgálatához azonban a keresleti oldal jelenleg rendelkezésre nem álló adataira is szükség van.

A dolgozatban egy olyan utasszámbecslő módszer került kidolgozásra, amely a hálózat városainak szocio-ökonómiai adataira támaszkodva, valamint a hálózaton közlekedő járatok jellemzői alapján adja meg a várható keresletet. Optimális kínálatot feltételezve és a kínálatoptimalizáció invertálását alkalmazva lehetőség nyílt az utasszám kifejezésére a járatsűrűség függvényében. A módszer fontos lépéseként megbecsültem a vizsgált gravitációs egyenletek paramétereit, log-lineáris regressziószámítást alkalmazva. Végül pedig a hálózat egyes szakaszain meghatároztam az utasforgalmat.

A dolgozat bevezette az elérhetőség fogalmát, amely a hálózat nem szomszédos városai között utazó utasok forgalmát hivatott kifejezni. Ez alapján több gravitációs formulát vizsgáltam, melyek közül a (28) egyenlet illeszkedik legjobban a vizsgált adatokra és ezáltal becsüli legjobban a várható keresletet.

Az eredmények magukban foglalják a közép-európai vasúthálózat becsült forgalomáramlási mátrixát. Emellett a dolgozatban megvizsgáltam, hogy a Budapest – Bécs viszonylat kereslete hogyan reagál a járatsűrűség változtatására, valamint az építés alatt álló Budapest – Belgrád vasútvonalon különböző követési idők esetén milyen forgalom várható.

Összegezve a dolgozat kidolgozza a gravitációs egyenletek és az inverz kínálatoptimalizáció együttes alkalmazásával történő keresletbecslés módszertanát, így pótolja a szakirodalom ilyen területen érezhető elmaradottságát. A szerző célja a kapott eredmények további hasznosítása, nevezetesen a közép-európai vasúthálózat lehetséges piacszerkezeteinek összehasonlítása során. Emellett a felállított módszertan a közlekedési szakpolitikában széleskörűen felhasználható, kiemelve, hogy a keresletbecslő modell csak kínálati adatokra támaszkodik.

Felhasznált irodalom

- Becker, G.S., 1965. A Theory of the Allocation of Time. *The economic journal* 75, 493–517.
- Berechman, J., 2013. *Public transit economics and deregulation policy*. Elsevier.
- Bergantino, A.S., Capozza, C., Capurso, M., 2015. The impact of open access on intra- and inter-modal rail competition. A national level analysis in Italy. *Transport Policy* 39, 77–86.
- Berggren, U., Johnsson, C., Svensson, H., Wretstrand, A., 2019. Exploring waiting times in public transport through a semi-automated dedicated smartphone app survey. *Travel Behaviour and Society* 15, 1–14.
- Broman, E., Eliasson, J., 2019. Welfare effects of open access competition on railway markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 129, 72–91.
- Casullo, L., 2016. The efficiency impact of open access competition in rail markets: The case of domestic passenger services in Europe. *International Transport Forum Discussion Paper*.
- De Borger, B., Kerstens, K., Costa, A., 2002. Public transit performance: what does one learn from frontier studies? *Transport reviews* 22, 1–38.
- De Borger, B., Proost, S., 2012. Transport policy competition between governments: A selective survey of the literature. *Economics of Transportation* 1, 35–48.
- de Dios Ortúzar, J., Willumsen, L.G., 2011. *Modelling Transport*. Wiley.
- DeSerpa, A.C., 1971. A theory of the economics of time. *The economic journal* 81, 828–846.
- Erlander, S., Stewart, N.F., 1990. *The Gravity Model in Transportation Analysis: Theory and Extensions*. Taylor & Francis.
- Európai Bizottság, 2007. Az Európai Parlament és a Tanács 2007/58/EK Irányelve (2007. október 23.). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32007L0058> (letöltve: 2023. 11. 02.)
- Európai Bizottság, 2015. *Guide to cost-benefit analysis of investment projects: economic appraisal tool for cohesion policy 2014-2020*. European Union, Luxembourg.
- Európai Bizottság, 2021. *Long-distance cross-border passenger rail services. Final report*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/34244751-6ea3-11ec-9136-01aa75ed71a1> (letöltve: 2023. 07. 05.)
- Európai Bizottság, 2022. *Invitation to submit a proposal for cross-border pilot rail services. In the framework of the Commission Action Plan to boost long-distance and cross-border passenger rail*. https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/invitation-submit-proposals-cross-border-pilot-rail-services_en (letöltve: 2023. 07. 03.)
- Európai Bizottság, 2023. *Connecting Europe by train: 10 EU pilot services to boost cross-border rail*. https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/connecting-europe-train-10-eu-pilot-services-boost-cross-border-rail-2023-01-31_en (letöltve: 2023. 06. 28.)
- Fan, W., Machemehl, R.B., 2009. Do transit users just wait for buses or wait with strategies? Some numerical results that transit planners should see. *Transportation Research Record* 2111, 169–176.
- Gwilliam, K., 2008. A review of issues in transit economics. *Research in Transportation Economics* 23, 4–22.

- Head, K., Mayer, T., 2014. Chapter 3 - Gravity Equations: Workhorse, Toolkit, and Cookbook, in: Gopinath, G., Helpman, E., Rogoff, K. (Eds.), *Handbook of International Economics*. Elsevier, pp. 131–195.
- Horváth B., Koren Cs., Prileszky I., Tóth-Szabó Zs., 2006. *Közlekedéstervezés*.
- Hörcher, D., De Borger, B., Graham, D.J., 2023. Subsidised transport services in a fiscal federation: Why local governments may be against decentralised service provision. *Economics of Transportation* 34, 100312.
- Hörcher, D., Graham, D.J., 2018. Demand imbalances and multi-period public transport supply. *Transportation Research Part B: Methodological* 108, 106–126.
- Hörcher, D., Tirachini, A., 2021. A review of public transport economics. *Economics of Transportation* 25, 100196.
- Ingvardson, J.B., Nielsen, O.A., Raveau, S., Nielsen, B.F., 2018. Passenger arrival and waiting time distributions dependent on train service frequency and station characteristics: A smart card data analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 90, 292–306.
- Jara Diaz, S.R., 1982. The estimation of transport cost functions: a methodological review. *Transport Reviews* 2, 257–278.
- Jara-Díaz, S., 2007. *Transport economic theory*. Emerald Group Publishing Limited.
- Leibenstein, H., 1966. Suggestions for an International Economic Policy. *The Economic Journal* 76, 92–95.
- Mohring, H., 1972. Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review* 62, 591–604.
- Nash, C.A., 1982. *Economics of public transport*.
- Novy, D., 2013. International trade without CES: Estimating translog gravity. *Journal of International Economics* 89, 271–282.
- Oates, W.E., 2008. On The Evolution of Fiscal Federalism: Theory and Institutions. *National Tax Journal* 61, 313–334.
- Okawa, Y., van Wincoop, E., 2012. Gravity in International Finance. *Journal of International Economics* 87, 205–215.
- Oum, T.H., Waters II, W.G., 1996. A survey of recent developments in transportation cost function research. *Logistics and Transportation Review* 32, 423.
- Pels, E., Rietveld, P., 2007. Cost functions in transport, in: *Handbook of Transport Modelling: 2nd Edition*. Emerald Group Publishing Limited, pp. 381–394.
- Silva, J.M.C.S., Tenreyro, S., 2006. The Log of Gravity. *The Review of Economics and Statistics* 88, 641–658.
- Singh, R., Hörcher, D., Graham, D.J., Anderson, R.J., 2020. Decomposing journey times on urban metro systems via semiparametric mixed methods. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 114, 140–163.
- Small, K., Verhoef, E.T., 2007. *The economics of urban transportation*. Routledge.
- Tirachini, A., Hensher, D.A., Jara-Díaz, S.R., 2010. Restating modal investment priority with an improved model for public transport analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46, 1148–1168.

- Tomeš, Z., Kvizda, M., Jandová, M., Rederer, V., 2016. Open access passenger rail competition in the Czech Republic. *Transport Policy* 47, 203–211.
- Wardman, M., Chintakayala, V.P.K., De Jong, G., 2016. Values of travel time in Europe: Review and meta-analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 94, 93–111.

1. Melléklet: Jelölésmagyarázat

Jelölés	Mértékegység	Magyarázat
TSC_{ij}	EUR	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás teljes társadalmi költsége
Q_{ij}	fő	a hálózat két szomszédos pontja közötti utasszám
f_{ij}	járat/óra	a hálózat két szomszédos pontja közötti járatsűrűség
c_{ij}^u	EUR/fő	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás felhasználói költsége
C_{ij}^o	EUR	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás szolgáltatói költsége
f_{ij}^*	járat/óra	a hálózat két szomszédos pontja közötti optimális járatsűrűség
r	EUR/km	távolságra vetített fajlagos üzemeltetési költség
d_{ij}	km	a hálózat két szomszédos pontja közötti távolság
τ_{ij}	óra/nap	a hálózat két szomszédos pontja közötti vonalon a napi üzemidő
p_{ij}	EUR	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás monetáris költsége
α	EUR/óra	utazási időérték
t_{ij}	óra	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás ideje
t_{ij}^w	óra	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás várakozási ideje
θ	-	a várakozási idő kitevője
X_m	-	a gravitációs egyenletek tényezői
χ_m	-	a gravitációs egyenletek tényezőinek kitevői
M_i	fő	a viszonylat kezdőpontjában található város népessége
β, β_1	-	a viszonylat kezdőpontjában található város népességének kitevője
M_j	fő	a viszonylat végpontjában található város népessége
γ, γ_1	-	a viszonylat végpontjában található város népességének kitevője
c_{ij}	EUR/fő	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás generalizált ára
δ	-	a hálózat két szomszédos pontja közötti utazás felhasználói költségének kitevője
c_{ij}^a	EUR/fő	a hálózat két szomszédos pontja közötti személyautóval történő utazás generalizált ára
ε	-	a hálózat két szomszédos pontja közötti személyautóval történő utazás generalizált árának kitevője
t_{ij}^a	óra	a hálózat két szomszédos pontja közötti személyautóval történő utazás ideje
R_r^i	-	a viszonylat kezdőpontjában található város elérhetősége
R_r^j	-	a viszonylat végpontjában található város elérhetősége
κ	-	elérhetőségi kitevő
β_2	-	a viszonylat kezdőpontjában található város elérhetőségének kitevője
γ_2	-	a viszonylat végpontjában található város elérhetőségének kitevője