

Gráf alapú integrált díjképzési rendszer hazai alkalmazási lehetőségei

Németh András - Dr. Tóth Bence

Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
telefon: 1 / 432 9000 (29260)
e-mail: nemeth.andras.90@gmail.com, toth.bence@uni-nke.hu

Kivonat: A hazai közösségi közlekedés egyik legnagyobb hátránya az egyes közlekedési alágazatok számos pontban hiányos integrációja, amely a menetrend és az infrastruktúra mellett a tarifarendszerben is megjelenik. Kutatásunk célja egy olyan új díjképzési módszertan alapjainak kidolgozása, amellyel országos szinten bármely két pont között integrált utazási ajánlat képezhető.

A hazai közforgalmú közlekedési hálózat díjszabási szempontból történő modellezésére többféle, külföldön már beváltan alkalmazott módszertan létezik, ezek közül a jól programozható megállóhely-csoportosított modellt vettük kiindulási alapul. E tarifamodell alapja egy súlyozott gráf (hálózat), amely a valós környezetet oly módon egyszerűsíti le, hogy a csúcsok a településeket, mint az azon belül található megállóhelyek csoportját reprezentálják (logikai megállók), míg az élek a településeket összekötő közlekedési útvonalaknak feleltethetők meg. Az élek súlyozásával a logikai megállók (csúcsok) közötti távolságok nyernek értelmet.

A tarifamodell országos szintű felépítésének időigényessége miatt egy kisebb országrészen hajtottuk végre a vizsgálatokat. Erre ideálisnak bizonyult Vas megye területe, amelyet változatos topológiájú település- és közlekedéshálózat jellemez, ráadásul még a kisebb településekről is rendszerint legalább kettő különböző központ (járás) irányába ingáznak a lakosok, így még az egyszerűsített célforgalmi mátrix is változatos eredményeket mutat.

A tarifamodell tesztelése érdekében megvizsgáltuk, hogy az egyes fizikai megállók milyen légvonalbeli távolságra találhatók a hozzájuk kapcsolt logikai megállóktól, az eredményeket hisztogramon ábráztuk. Mindemellett három különböző módon végeztük el a gráf éleinek súlyozását: a csúcsok légvonalbeli távolsága, a csúcsok jelenlegi díjszabási távolsága, illetve képzett távolságok alapján. Az így létrejött három hálózatra távolságmátrixot generáltunk. E mátrixokat összehasonlítottuk egy olyan mátrixszal is, amelyben a csúcsok egymástól vett távolságát nem a hálózaton bejárt élek súlyainak összege, hanem egyszerűen a csúcsok légvonalbeli távolsága alapján határoztuk meg.

A létrejött négy távolságmátrixhoz hozzárendeltük a 2011. évi népszámlálás ingázással kapcsolatos, településenkénti adatbázisa alapján képzett célforgalmi mátrixot, így egy kivonatolt képet kaphattunk arról, hogy Vas megyén belül mekkora napi utaskilométer-teljesítmény keletkezik a lakosok megyén belüli ingázásából. Ezt tovább bontva megkaptuk azt, hogy jelenleg mennyi ingázó utazik adott kilométer-övezeten belül, amelyhez a jelenlegi bérletárakat rendelve egy összebevételt határoztunk meg. E bevételt fix összegűnek meghatározva árazási javaslatot tettünk a kilométer alapon meghatározott bérletekre.

Kulcsszavak: díjképzés, közösségi közlekedés, tarifarendszer, gráfelmélet

Bevezetés

A hazai közösségi közlekedés egyik legnagyobb hátránya az egyes közlekedési alágazatok számos pontban hiányos integrációja, amely a menetrend és az infrastruktúra mellett a tarifarendszerben is megjelenik. Problémát jelent, hogy az autóbuzsós és a vasúti tarifarendszer csak a menetdíjak táblázatait tekintve egységes, ráadásul ez a menetdíj-táblázat önmagában is elavult, hiszen 5, 10, majd 20, illetve 50 km-es övezeti lépcsőkkel számol, kilométer pontosságú árazás helyett. A díjképzés szinte kizárólag a megtett távolságtól függ, ennek díjszabási szempontból történő számítása során azonban számos kivételt és egyedi esetet kell figyelembe venni (pl. ha az autóbuzs nem a legrövidebb úton, hanem betérésekkel közlekedik), ami jelentősen megnehezíti egy egyszerűen programozható, országos szintre kiterjesztve működtethető, rugalmasan módosítható, integrált tarifarendszer létrehozását. A több tízezer pontból (megállóhelyből) és megannyi élből (vonalszakaszból) összeálló hazai közforgalmú közlekedési hálózat tehát díjszabási szempontból egyszerűsítésre szorul, amelyre több, külföldön bevált tarifamodell ad példákat.

Jelen cikkben a megállóhely-csoportok képzésén alapuló tarifamodell [1] alapján készítettük el a hazai közforgalmú közlekedési hálózat matematikai leképezését. A munka során a területi lehatárolást egy megyére szűkítettük, e területen belül ugyanakkor számos vizsgálatot, tesztet hajtottunk végre a modell gyakorlati használhatóságának bizonyítása érdekében. A létrehozott matematikai modell forgalmi ráterheléses vizsgálat végrehajtására, illetve bérletárzási függvények generálására, árazási javaslat megfogalmazására is alkalmasnak bizonyult.

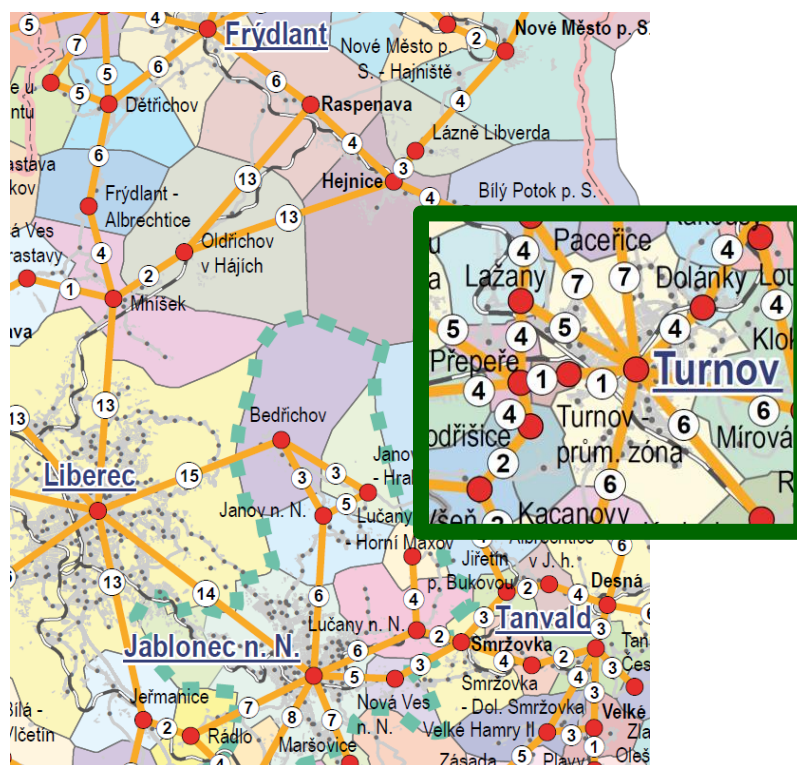
1. A megállóhely-csoporti modell

A szomszédos Ausztria területén valamennyi tartománynak saját belső tarifarendszere működik, ez alól csak a keleti régió három tartománya (Wien, Niederösterreich, Burgenland) képez kivételt, ők ugyanis 2016 óta közösen üzemeltetnek egy közlekedési szövetséget (Verkehrsverbund Ost-Region, VOR), ahol ma már az ún. Haltestellengruppenmodell, azaz megállóhelycsoport-modell a díjképzés alapja.

Ennek a modellnek az a lényege, hogy egy-egy tarifapontba (ún. logikai megállóba) néhány fizikai megállóhelyet integrálnak. Bármely két tarifapont (logikai megálló) közötti utazás során az utas szabadon eldöntheti, hogy mely járatokat veszi igénybe, a tarifát pedig az határozza meg, hogy a két logikai megálló között mekkora távolság van. Bizonyos esetekben szükséges lehet megadni azt is, hogy útközben mely egyéb tarifapontokat érint az utas. A legkisebb díjtételt a tarifaponton belüli utazás jelenti, amikor az adott tarifapont (logikai megálló, avagy megállóhely-csoport) két fizikai megállója között történik az utazás (például egy adott településen belül található két fizikai megállóhely között).

Korábban a Verkehrsverbund Kärnten (VVK) is ilyen rendszert alkalmazott, majd egy ideig egyedül a Verkehrsverbund Niederösterreich-Burgenland (VVNB) alkalmazta ezt a modellt, viszont a VVNB és a VOR 2016 nyarán történt összeolvadását követően az utódként megmaradt VOR tovább vitte e modell alkalmazását. Az átállást hosszas munka előzte meg, ugyanis már 1999 és 2001 között elkészültek az első tanulmánytervek a keleti régióban akkor még működő SBV, valamint a VVNB és a VOR tarifarendszereinek összehangolására, és a területen belül egységes, átjárható és átlátható tarifarendszer létrehozására. [2]

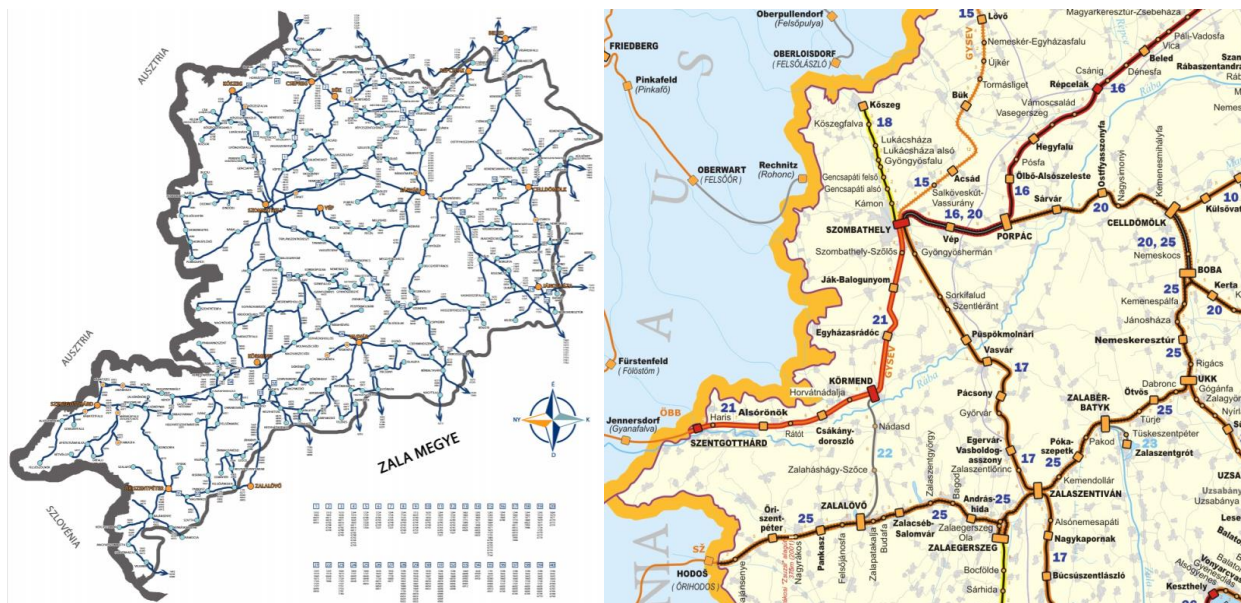
A megállóhely-csoporti modellt Csehország négy északi megyéjében ugyancsak alkalmazzák. Ústi nad Labem megyéje 2016-ra tért át a megállóhely-csoporti modell alkalmazására [3], emellett Pardubice és Hradec Králové megyéje közös, megyehatáron átnyúló tarifarendszert vezetett be. Az 1. ábra szemléletesen ábrázolja Liberec megyéjének tarifarendszerét.



1. ábra: A csehországi Liberec megye tarifahálózati térképe [4]

1.1 A vizsgált terület lehatárolása

A jelen cikkben bemutatott kutatás – a korábbi vizsgálatokat [5] folytatva – Vas megye területére és egyes szomszédos településekre terjed ki. A területválasztás indokául szolgál az is, hogy Vas megye közlekedési hálózata kifejezetten ideális feltételeket teremt különféle modellek tesztelésére, összefüggések kimutatására, hiszen megyén belül is változatos sűrűségű és topológiájú közlekedés- és településhálózat jellemzi, ráadásul három nagy közlekedési közszolgáltató társaság is (MÁV-Start Zrt, GYSEV Zrt, Volánbusz Zrt.) aktívan részt vesz a közforgalmú közlekedés lebonyolításában.



2. ábra: Vas megye autóbusz-hálózati, illetve vasúti térképe [6][7]

Ugyancsak szempontként szolgált, hogy a 2011-ben lezajlott népszámlálás eredményei alapján Vas megyében volt tapasztalható országos szinten az egyik legnagyobb mértékű ingázási hajlandóság, csak a szombathelyi agglomerálódó térségben naponta 20 ezer fő ingázott a munkahelyére. [8] Mindösszesen egy olyan Vas megyei település (Nemesmedves) található, amelyről a KSH nem tudott közölni ingázási adatokat az Adatvédelmi Szabályzatban [9] foglaltak miatt. A fennmaradó 215 Vas megyei település, valamint a vizsgálatba vont további 18 település lakosai közül összesen 26 963 fő ingázott a lakóhelye és valamelyik Vas megyén belüli település között. A vizsgált terület ingázási adatainak kivonatát az 1. táblázat tartalmazza. Az adatok legyűjtéséhez az Országos Területfejlesztési és Területrendezési Információs Rendszer (TeIR) internetes felületét vettük igénybe, ahol a 2011. évi népszámlálásról települési szinten érhetőek el a jelen cikk szempontjából kulcsfontosságú forgalmi adatok.

Célpont \ Kiindulási pont	Acsád	Adorján-háza	Alsószőlők	Alsóújlak	Andrásta	...	Vönöck	Zalalövő	Zsédény	Zsenyve	Zsira
Celldömölk		47				..	132				
Körmend			3			..		57			
Kőszeg						..					11
Sárvár		3		14		..	23		29		
Szentgotthárd			59			..		7			
Szombathely	112			51		..	7	11	3	13	9
Vasvár				38	4	..					

1. táblázat: A vizsgált terület belső ingázó forgalmának célforgalmi mátrixa (adatok forrása: TeIR)

A vizsgált terület ingázási adatainak összegzése alapján Vas megye centralizáltságára utal, hogy az ingázók 58%-ának a központi, Szombathelyi járás területén volt a munkahelye, ugyanakkor a változatosságot növeli, hogy a települések kétharmadáról 2 vagy annál több különböző járás irányában ingáznak a lakosok. A vizsgált 233 településből mindössze 13 olyan település található, amelynek egyetlen Vas megyén belüli pontra ingázó lakosa sem volt a 2011-es népszámlálás szerint.

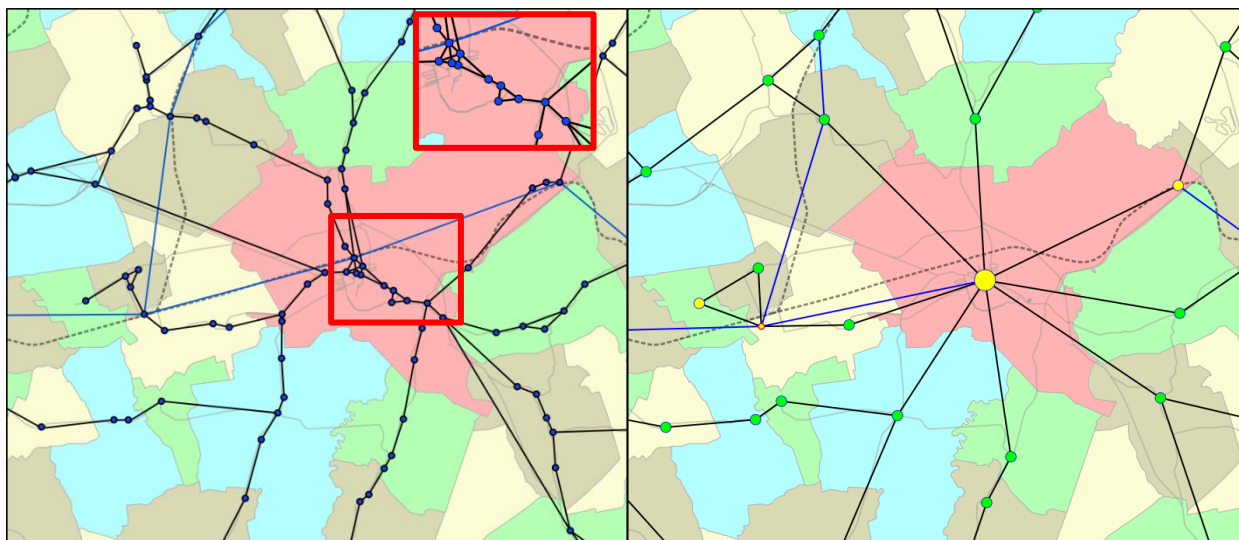
2. Vas megye közforgalmú közlekedési hálózatának gráfmodellje

A következőkben bemutatjuk a modellezéshez használt matematikai apparátust és az alkalmazott számítási módszereket.

2.1 Fizikai és logikai állomások

Fizikai állomásoknak tekintjük az összes közforgalmú autóbusz- és vasúti megállóhelyet, állomást. A vizsgált területen összesen 964 ilyen állomás található, amelyből 42 a GYSEV Zrt, 18 a MÁV Zrt, a fennmaradó 904 pedig a Volánbusz Zrt. üzemeltetése alatt áll. A 3. ábra bal oldalán szereplő, Sárvár környékét illusztráló metszetben összesen 83 fizikai állomás található, melyek egymással való kapcsolatát egyes esetekben (pl. piros keretes részlet) csak bonyolult összeköttetésekkel lehet leírni, hiszen az autóbuszjáratok a városon belül sokszor nagyon változatos útvonalvezetéseket követhetnek.

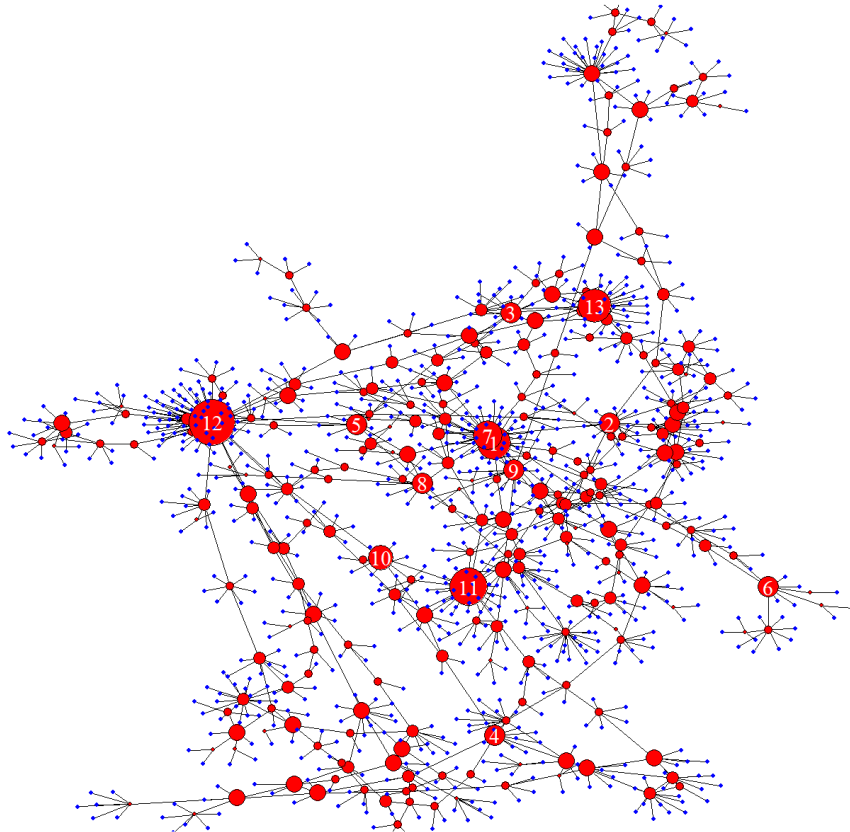
A logikai állomások (avagy megállóhelycsoportok) e fizikai állomások szisztematikus összevonásából képződnek. Egy ilyen megállóhelycsoport földrajzi elhelyezkedésének többnyire az adott település helyközi menetrendben szereplő „autóbusz váróterem” nevű megállóját, illetve a településhez tartozó fő megállót feleltettük meg, de emellett minden egyes megállóhely-csoporthoz földrajzi koordinátákat is rendeltünk. Az egyszerűsítésnek köszönhetően a vizsgált területen mindössze 251 logikai állomás maradt, a példaként szolgáló, 3. ábra jobb oldalán szereplő metszetben pedig már csak 21 logikai állomás található.



3. ábra: Fizikai állomások és az összevonásukkal képzett logikai állomások Sárvár térségében

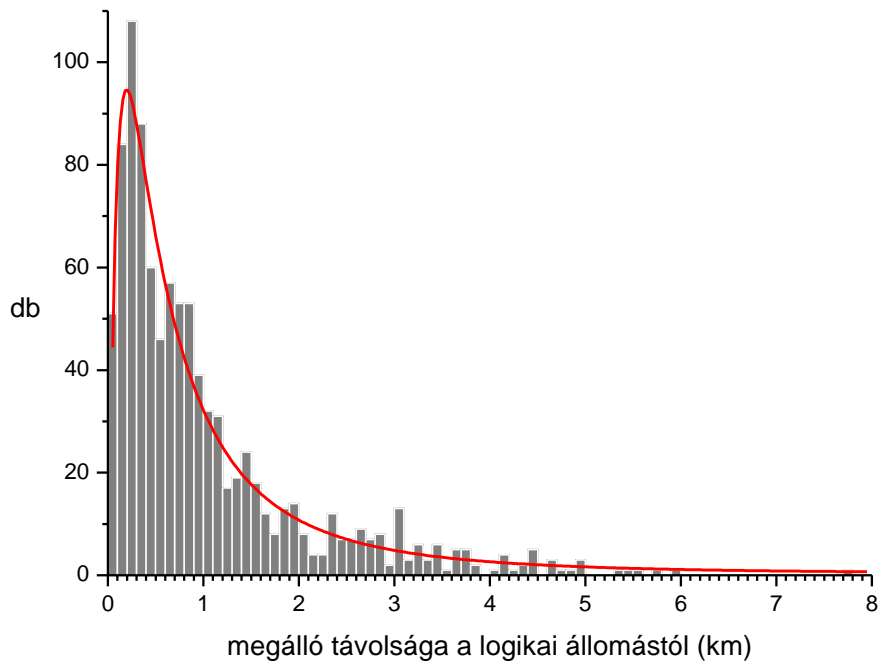
Harmincöt esetben megkülönböztettünk egy adott település közigazgatási határán belül további logikai állomás(oka)t is, amennyiben ezt az adott településrész jelentős elkülönülése (pl. Celldömölkön belül Alsóság vagy Szentgotthárdon belül Farkasfa) vagy egy külterületen, településközponttól távol elhelyezkedő vasútállomás (pl. Acsád vá. vagy Porpác vá.) ezt indokolta.

Felvettünk emellett 18, nem Vas megye területén található települést is logikai állomásnak a széleffektusok kiküszöbölése végett: több esetben szomszédos megyén keresztül rövidebb az eljutás két Vas megyei település között, mely útvonalak figyelmen kívül hagyása torzította volna kapott eredményeinket. Az egyes logikai állomásokba aggregált megállóhelyek számát a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: Az egyes logikai állomásokba aggregált megállóhelyek számának szemléltetése. A számozott csúcsok ötnél több másik logikai állomással vannak kapcsolatban. 1: Celldömölk, 2: Csákánydoroszló, 3: Gersekarát, 4: Hegyfalu, 5: Hegyhátsál, 6: Jánosháza, 7: Körmend, 8: Nádasd, 9: Óriszentpéter, 10: Porpác VÁ, 11: Sárvár, 12: Szombathely, 13: Vasvár

Ezt követően megvizsgáltuk, hogy az egyes fizikai állomások és a hozzájuk rendelt logikai állomások egymástól vett légvonalbeli távolsága milyen eloszlást mutat (5. ábra). Az találtuk, hogy a fizikai és logikai állomások egymástól vett távolsága lognormális eloszlást mutat és a fizikai megállóhelyek közel kétharmada kevesebb, mint 1 kilométerre esik a hozzá rendelt logikai állomástól, így a választott tarifamodell jó pontosság mellett egyszerűsíti a valós – fizikai megállóhelyekből összeálló – környezetet.



5. ábra: Fizikai és logikai állomások egymástól vett távolságának sűrűségfüggvénye

2.2 A modellezéshez használt gráf

Az így képzett logikai állomásokat és a köztük levő kapcsolatokat egy élsúlyozott gráffal, a közlekedési hálózatok és azok viselkedésének leírására általánosan használt matematikai struktúrával modelleztük. A gráf egyes csúcsainak az egyes logikai állomásokat, az éleknek a köztük levő közlekedési kapcsolatokat (és nem a köztük található közutakat) feleltettük meg. A számításokhoz használt gráf az egyes logikai állomásokkal a 6. ábrán látható, mely összesen tehát a 251 logikai állomásnak megfelelő csúcsot és 326, a köztük levő közlekedési kapcsolatnak megfelelő élt tartalmazott.



6. ábra: A számításokhoz használt gráf Vas megye térképén.

2.3 Útkeresés

A gráfot az *R* programozási nyelv és környezetben [10], a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett *igraph* csomaggal kezeltük [11]. Az *igraph* csomagban egy gráfot egy ún. éllistával lehet definiálni, mely gyakorlatilag egy kétszlopos mátrix. Először a gráf minden csúcsának meg kell feleltetni egy pozitív egész számot. Ekkor az éllistában egy sor egy gráfbeli élnek, azaz két csúcs kapcsolatának felel meg úgy, hogy az első és a második oszlopbeli számoknak megfelelő csúcsok között található az adott él. Irányított gráf esetében jelentősége van, melyik csúcs szerepel az első, melyik csúcs a második oszlopban, ugyanis ez definiálja az adott él irányítottságát, esetünkben azonban erre nincs szükség, a logikai állomások sorszáma tetszőleges sorrendben szerepelhet egy adott élt kódoló sorban.

Az egyes gráfbeli élekhez hozzárendelhetők súlyok is, minden élhez egy súly. Két csúcs közötti legrövidebb út keresésekor az érintett élek súlyainak összege adja az adott út hosszát. A gráfbeli csúcspárok közötti legrövidebb utak hossza egyszerűen kiszámíthatóak az *igraph* csomag *distances()* függvényének segítségével, mely a Dijkstra-algoritmust [12] használja ehhez. Ugyanakkor a pontos útvonal, az érintett élek is meghatározhatóak a csomag *shortest_paths()* függvényének segítségével.

2.4 Logikai állomások távolságainak mérőszámai

Az egyes logikai állomások egymástól vett távolságának meghatározását négy különböző mérőszámmal jellemeztük. Az egyes mérőszámokat a modell jóságának jellemzésére is felhasználtuk.

2.4.1 Légvonalbeli távolság

Légvonalbeli távolság ($d_{\text{légvonal}}$) alatt két logikai állomást összekötő, a Föld felszínén futó gömbi ív hosszát értjük. Ennek meghatározásához az ún. Haversine-formulát használtuk:

$$d_{\text{légvonal}}(V_1, V_2) = 2R \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_2) \cos(\varphi_1) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right), \quad (1)$$

ahol R a Föld sugara; φ_1 és λ_1 a V_1 , φ_2 és λ_2 az V_2 logikai állomás földrajzi szélessége, illetve hosszúsága.

2.4.2 GPS távolság

A gráfban két szomszédos, azaz éllel összekötött logikai állomás közötti élhez súlyként hozzárendelhetjük a két logikai állomás légvonalbeli távolságát, melyet ebben az esetben GPS távolságnak (d_{GPS}) nevezünk. Ezen távolságmérték abban különbözik a légvonalbeli távolságtól, hogy amikor két olyan gráfbeli csúcs, azaz logikai állomás távolságát keressük, melyek között nincs közvetlen él, akkor ezen két logikai állomás GPS távolságát a gráfbeli éleken haladva az útvonal összsúlya adja meg:

$$d_{GPS}(V_0, V_n) = \sum_{i=1}^n d_{légvonal}(V_i, V_{i-1}), \quad (2)$$

ahol V_0 az $n+1$ érintett logikai állomásból álló utazás kiindulási állomása, V_i pedig az egyes érintett logikai állomások úgy, hogy V_{i-1} és V_i szomszédosak.

2.4.3 Díjszabási távolság

Két szomszédos logikai állomás díjszabási távolsága ($d_{díjszabási}$) alatt az adott állomások menetrendben található távolságát értjük. Két tetszőleges logikai állomás díjszabási távolságát úgy határozhatjuk meg, ha a két logikai állomást jellemző gráfbeli csúcs között megkeressük az ezen távolságértékekkel súlyozott gráfban a legrövidebb utat. Ennek az útvonalnak az összsúlyát értjük ezen két logikai állomás díjszabási távolsága alatt.

2.4.4 Logikai távolság

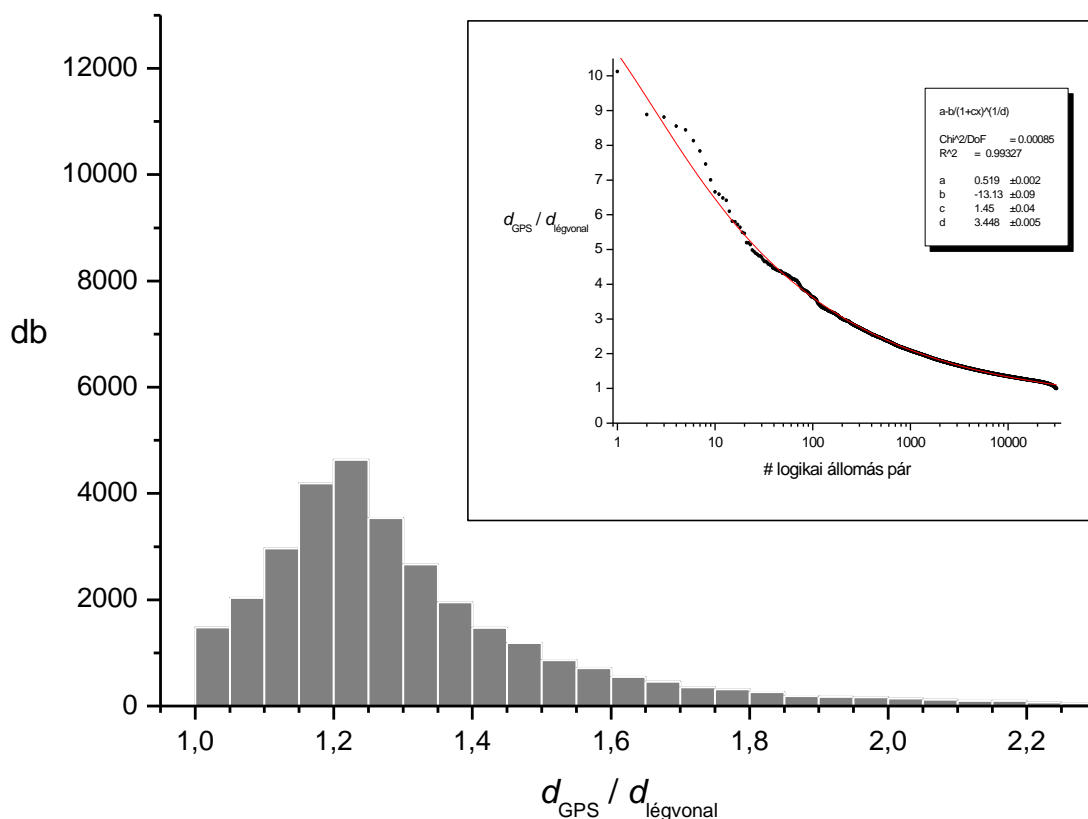
Minden, a gráfban szereplő élhez meghatároztunk egy ún. logikai távolságot is ($d_{logikai}$). Két tetszőleges logikai állomás logikai távolsága alatt az őket ezzel a súlyozással összekötő legrövidebb út összsúlyát értjük.

3. Díjképzési (távolságszámítási) módszerek

A következőkben az egyes logikaiállomás-párok egymástól vett távolságát hasonlítjuk össze a különböző távolságmértékek szerint.

3.1 Légvonalbeli és GPS távolság

Az egyes logikaiállomás-párookra kiszámítva a légvonalbeli és a GPS távolságot, ezek arányát képezve minden állomáspárra és meghatározva ezek gyakoriságát a 7. ábrán látható hisztogramot kapjuk.



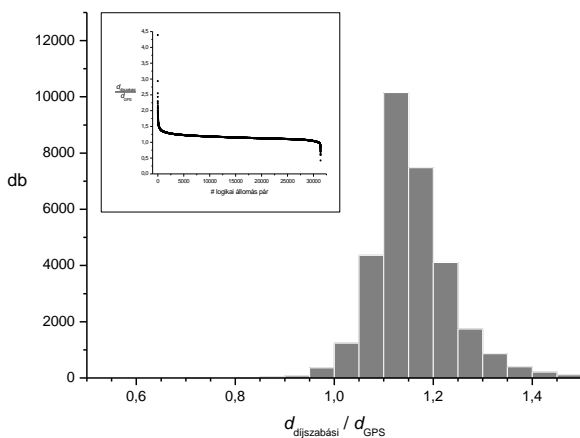
7. ábra: Az egyes logikaiállomás-párok közötti GPS távolság és légvonalbeli távolság arányok gyakorisága. A betétábrán az egyes értékek láthatók csökkenő sorrendbe rendezve és lin-log skálán ábrázolva. Az adatpontokra egy négyparaméteres, $a-b/(1+cx)^{1/d}$ alakú hiperbola illeszthető, ahol x a független változó.

A hisztogram maximuma 1,22-nél található, azonban az adatok mediánja, azaz amely értéknél az adatok fele kisebb, fele nagyobb, 1,255. Ez azt jelenti, hogy a logikai állomások között a gráfon mozogva az utazások átlagosan negyedükkel lesznek hosszabbak, mintha légvonalban tudnánk közlekedni közöttük.

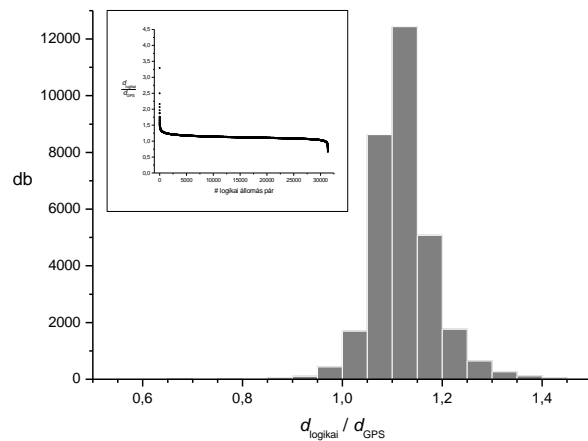
Az egyes hányadosértékeket csökkenő sorrendbe állítva kapjuk a 2. ábra betétábráján látható viselkedést, melyre egy négyparaméteres, $a-b/(1+cx)^{1/d}$ alakú hiperbola illeszthető, ahol x a független változó. A legnagyobb érték (10,12) a Gyanógeregye–Rábatöttös útvonalhoz tartozik, melyek 34,81 km-es GPS távolsága mellett a légvonalbeli távolságuk mindössze 3,44 km. Ez a legszélsőségesebb, azonban korántsem egyetlen példája annak a helyzetnek, hogy bár szomszédos települések, a köztük található 8702-es úton nincs helyközi autóbusz-forgalom, ezért a két település közösségi közlekedéssel csak Vasváron át érhető el.

3.2 GPS távolság és díjszabási távolság

Az 8. ábrán látható az egyes logikaiállomás-párok díjszabási távolságának és GPS távolságának aránya és az ezekből az adatokból képzett hisztogram. A hisztogram maximuma 1,15-nél van, azaz a díjszabási távolság alapú hosszai a legrövidebb utaknak átlagosan 15%-kal nagyobbak, mint a GPS távolságból számoltak. Ez a TeIR adatbázis forgalmi adatai alapján az utaskilométerekben 17%-kal magasabb értéket jelent.



8. ábra: Az egyes logikaiállomás-párok közötti díjszabási távolság és GPS távolság arányok gyakorisága. A betétábrán az egyes értékek láthatók csökkenő sorrendbe rendezve.



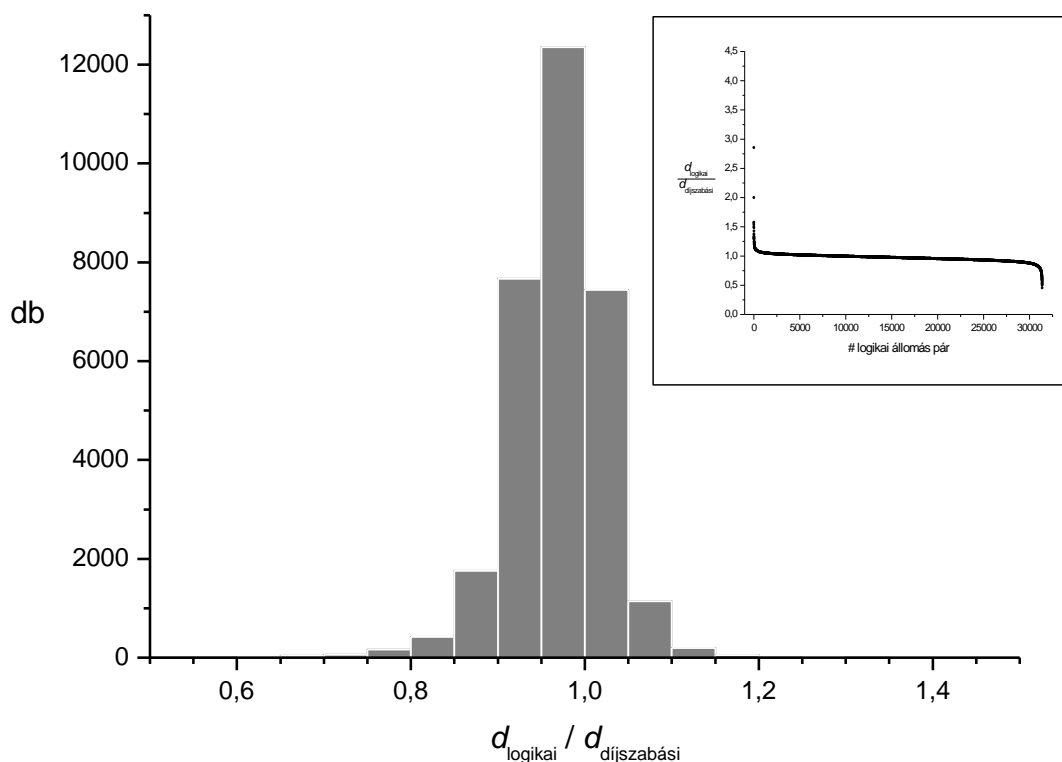
9. ábra: Az egyes logikaiállomás-párok közötti logikai távolság és GPS távolság arányok gyakorisága. A betétábrán az egyes értékek láthatók csökkenő sorrendbe rendezve.

3.3 GPS távolság és logikai távolság

A 9. ábrán látható az egyes logikaiállomás-párok logikai távolságának és GPS távolságának aránya és az ezekből az adatokból képzett hisztogram. A hisztogram maximuma 1,11-nél van, azaz legrövidebb utak logikai távolság alapú hosszai is nagyobbak, átlagosan 11%-kal, mint a GPS távolságból számoltak. Ez a TeIR adatbázis forgalmi adatai alapján az utaskilométerekben 12%-kal magasabb értéket jelent.

Mivel mind a díjszabási távolság, mind a logikai távolság közel azonos arányban ad nagyobb távolságértékeket a GPS távolság értékeknél, érdemes megvizsgálni a jelenleg alkalmazott díjszabási és az általunk javasolt logikai távolság összefüggését is.

3.4 Díjszabási távolság és logikai távolság



10. ábra: Az egyes logikaiállomás-párok közötti logikai távolság és díjszabási távolság arányok gyakorisága. A betétábrán az egyes értékek láthatók csökkenő sorrendbe rendezve.

A 10. ábrán látható az egyes logikaiállomás-párok logikai távolságának és díjszabási távolságának aránya és az ezekből az adatokból képzett hisztogram. A hisztogram maximuma 0,96-nál van, azaz a logikai távolság alapú hosszai a legrövidebb utaknak átlagosan 4%-al kisebbek, mint a díjszabási távolságból számoltak. Ugyanez az érték jelenik meg a forgalmi adatok felhasználásával kapott utaskilométer-értékek csökkenésében is, vagyis az egyes települések egymástól vett távolságának a logikai távolság segítségével történő meghatározása a díjszabási távolság helyett az össz-utaskilométert sem befolyásolta jelentős mértékben.

3.5 Ráterhelés a logikai távolságokkal súlyozott hálózatra

Az 1.1 pontban ismertetett, TeIR adatbázis alapján összeállított célforgalmi mátrix alapján forgalom-ráterheléses vizsgálatot végeztünk el a létrehozott hálózat mindhárom, előzőekben bemutatott módon súlyozott változatára. A három forgalom-terhelési ábra közül az bizonyult a leginkább életszerűnek, amely a logikai távolságokkal súlyozott hálózatra terhelte rá az ismert utasforgalmat (11. ábra).

Tekintettel arra, hogy a két pont között ingázó összes utast az első legrövidebb útra tereltünk, egyes esetekben, bizonyos éleken alul- illetve felülreprezentáltság mutatkozhat. Erre az egyik legjobb példa a Szombathely-Vasvár tengely, ahol a 11. ábra szerint a nyílegyenesen futó vasútvonal „elviszi” az utasokat (a Sorokpolány-Rábahidvég szakasz kvázi 0 terhelést kapott), holott a valóságban a párhuzamos közúton is jelentős utasforgalom zajlik a két város között. A vasút ugyanakkor „hátrányba is kerülhet”, hiszen pl. a Porpác-Ölbő vasútvonal-szakaszra elhanyagolható mértékű utasforgalom terhelődött, miközben a valóságban ennél erőteljesebb az itt áthaladó utasforgalom – igaz, az itt utazók többsége nem napi ingázó, miközben az összeállított célforgalmi mátrix csak az ismert ingázó forgalmat számszerűsíti.

A 11. ábrán Bük és Répcelak térsége annak ellenére mutat alacsony terheltségű éleket, hogy e településeken több nagyfoglalkoztató is működik, és jelentős az ide irányuló, napi ingázó forgalom. Mindeközben viszonylag nagy terheltséget mutat pl. a Sárvár-Rábatyó vonalszakasz. Ennek oka az lehet, hogy a 2011. évi népszámlálás során felvett ingázási adatok nem a céltelepülésre, hanem a céltelepülés járásközpontjára vonatkoznak. Emiatt az összeállított célforgalmi mátrix és az abból generált forgalom-ráterhelési térkép nem teljes mértékben tudja tükrözni a valós állapotot, egy Szombathelyről Bükre ingázó utas a Szombathely-Kőszeg tengelyt fogja erősíteni, egy Rábatyóról Répcelakra ingázó utas pedig ugyanúgy a Rábatyó-Sárvár tengelyt fogja tovább terhelni, mint az, aki e településről Sárvárra jár dolgozni.



11. ábra: A TEIR adatbázis forgalmi adatainak ráterhelése a logikai állomások grájára. Az egyes élek vastagsága arányos az utasforgalommal.

4. Várható költségfüggvények

Az előző fejezetben részletezettek miatt az 1. táblázatban szereplő célforgalmi adatbázis, illetve az az alapján generált, 11. ábrán látható forgalmi ráterhelés nem pontosan tükrözi a valóságot, ráadásul arról sincsenek megbízható információk, hogy az egyes településeken milyen arányban használják a közforgalmú, illetve az egyéni közlekedési módokat. Mindazonáltal, ha azt feltételezzük, hogy az egyes települések közlekedési módváltási hajlandósága között nincs nagy különbség, és az ingázók által megtett út nem lényegesen különbözik, ha a járásközpont helyett valamely másik, adott járáson belüli településre ingáznak, akkor a TeIR adatbázisból kinyert adatok a bérlet-árazással kapcsolatos vizsgálatok folytatására alkalmasnak tekinthetők. A vizsgált területen belüli, napi ingázások viszonylatának a négy távolságmérték alapján meghatározva a hosszát, majd ezt az értéket (a jelenlegi szabályok alapján) a következő 5, illetve 10 kilométeres értékre felkerekítve az alábbi utasszámokat kapjuk (2. táblázat):

utazás hossza (km) →	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90
távolságmérték ↓														
légvonal	1210	9989	5362	3716	3043	800	519	265	346	39	34	0	0	0
GPS	996	9328	5517	3666	2534	1618	726	368	288	117	131	24	10	0
díjszabási	255	6884	6163	4519	2565	2399	1015	647	283	278	166	119	16	14
logikai	191	7980	5342	3725	3438	2515	777	517	303	280	180	45	23	7

2. táblázat: A vizsgált területen ingázók által megtett utazási távolságok kilométer-övezetek szerinti eloszlása, a négy távolságmérték esetén

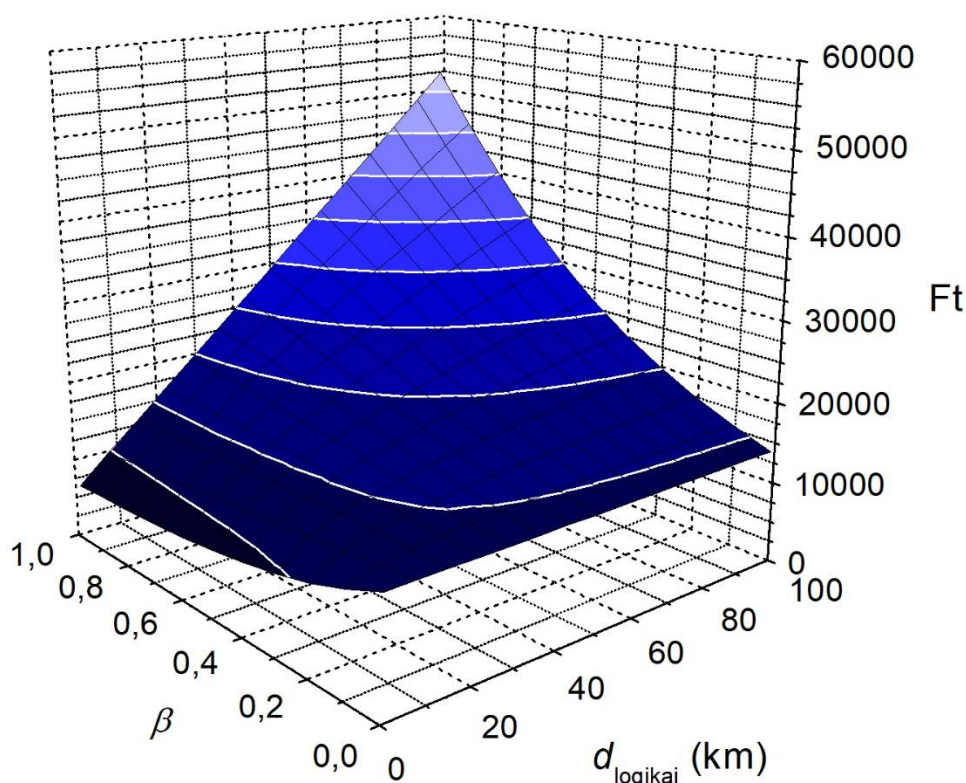
A jelenlegi, övezetesen emelkedő összegű bérletárakkal kalkulálva meghatároztuk, hogy mennyi bevétel keletkezne, ha a táblázatban szereplő valamennyi ingázó utas bérletet váltana. Minden utasra egy bérlet megváltását feltételeztük, tehát nem kívántuk azzal bonyolítani a végösszeg számítását, hogy ma az ingázók

egy részének két, egyenként rövidebb szakaszra vonatkozó bérlet vásárlásával kell megoldania ingázását, mert két közlekedési társaság szolgáltatását is igénybe veszi. A négy távolságmérték közül a díjszabási távolságmérték alkalmazása esetén bizonyult a legmagasabb értékűnek az ingázók által vásárolt bérletekből eredő összes bevétel (379,55 millió Ft).

Az eredő bevétel ismeretében meghatároztuk, hogy a jelenlegi, övezetes bérletár-képzéshez képest milyen más, kilométer-alapú bérletár-képzéssel lehet a „jelenlegivel” megegyező összebevételt elérni. Továbbra is konstans, 5940 Ft-os alapidíjat feltételeztünk, és ehhez egy, a logikai távolság kerekítetlen, pontos értékének hatványfüggvényével változó értéket adtunk. Az egyes bérletek árát így az

$$\alpha d_{\text{logikai}}^{\beta} + 5940 \quad (3)$$

képlet alapján számítottuk. Az α és β paraméterek értékét úgy állítottuk be, hogy a modell a jelenlegi összebevételt adja eredményül, amiből az $\alpha(\beta)$ függvény meghatározható és ennek segítségével felrajzolható az egyes utazási távolságokhoz tartozó bérletárak függése az alkalmazott β hatványfüggvény-kitevőtől. (12. ábra)



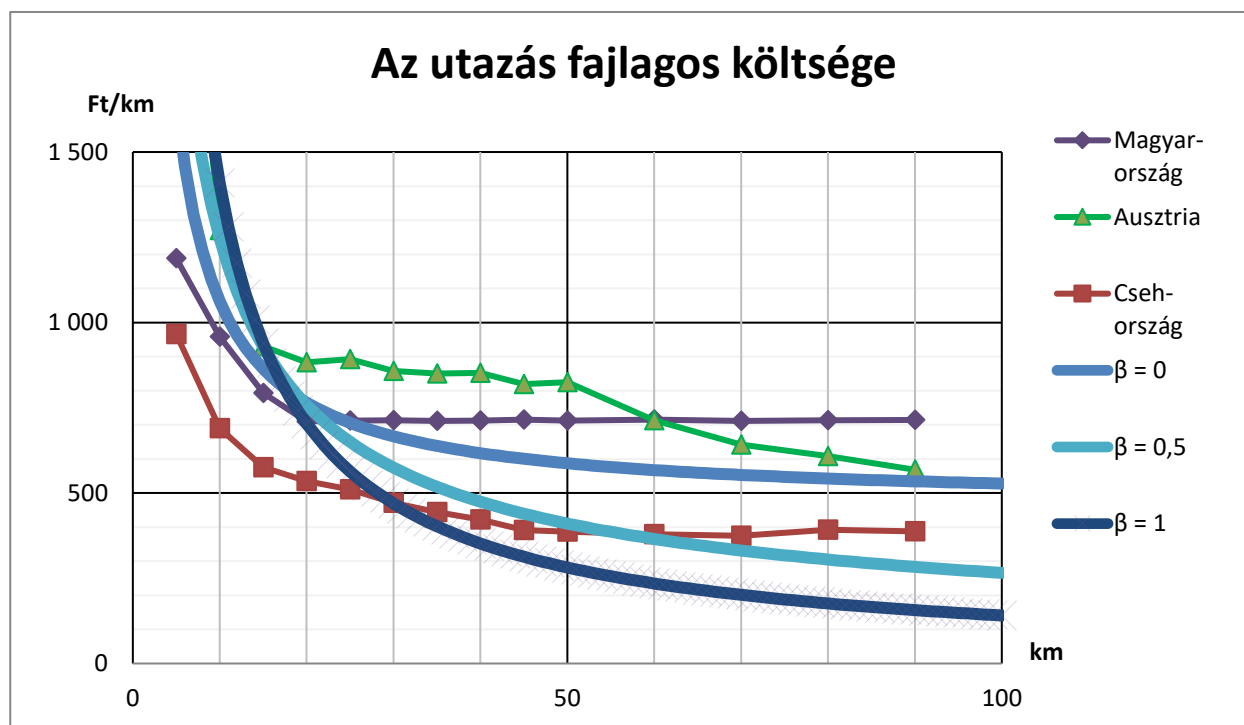
12. ábra: A jelenlegi bérletár-bevételt eredményező díjszabás kerekítetlen logikai távolságok figyelembevételével különböző távolságfüggések esetén.

A β paraméter értéke 0 és 1 között változott. A 0 érték azt jelenti, hogy minden bérlet azonos árú, azaz ez egy egész megyére érvényes bérletet modellez távolsági és viszonylati megkötés nélkül. Ezen bérlet ára 14084 forintnak adódott. A β paraméter 1 értéke az utazási távolsággal egyenesen arányos bérletárat jelent: a bérlet árának alapidíjon felüli része kétszer akkora logikai távolságra váltva kétszer annyi.

Ha a bérletár-képzéshez kapcsolódó korábbi cikkben [5] szereplő 7. ábrát a fenti árazási függvénnyel kiegészítjük, akkor $\beta = 0..1$ kitevős függvényekkel képzett bérletárak fajlagos – kilométerre vetített – költsége a 13. ábrán látható függvény szerint fog alakulni a távolság függvényében. A $\beta = 0..1$ kitevők alapján vett függvények metszéspontja egymáshoz közel, a 17-18 kilométeres sávban található, és közel ugyanezen a ponton metszik a „Magyarország” elnevezésű görbét is, amely 20 km övezetig hasonló meredekséggel bír, utána azonban kvázi konstans (710 Ft/km) értéket vesz fel.

Egyrészt megállapítható, hogy a különböző β kitevőkre képzett árazási függvények metszéspontjai nagyon jól közelítik a TeIR adatok alapján felvett ingázó utasok által megtett átlagos utazási távolságokat (ami törvényszerű is). Másrészt viszont az a tény, hogy az egyes árazási függvények egymással és a „Magyarország” elnevezésű görbével közös metszéspontjai ilyen közel esnek egymáshoz, alátámasztja,

hogy az általunk alkalmazott tarifamodell és a hozzá kapcsolódó árazási függvények a jelenlegi valós körülményeket jó közelítéssel reprezentálják. Fontos különbség azonban, hogy valamennyi β paraméterű árazási függvény lényegesen nagyobb költségeket terhel a rövid távon ingázókra, miközben a távolabbról ingázókat „nagyvonalúan támogatja”, ugyanis pl. a 90 km-es sávban még a $\beta = 0$ árazási függvény esetén is mintegy negyedével kedvezőbb Ft/km értékkel árazza be a bérleteket.



13. ábra: Az ismert bérletár-képzési módszerek összehasonlítása három különböző β kitevős árazási függvényvel

Konklúzió

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a cikkben bemutatott, Vas megye közforgalmú közlekedési hálózatát díjszabási szempontból modellező súlyozott gráf segítségével jelentősen egyszerűsíthető a fizikai állomások és az azokat összekötő viszonylatok sokaságából összeálló hálózat, oly módon, hogy az igénybe vevő utasok számára igazságos, az értékesítési rendszert üzemeltető számára pedig hatékony és rugalmasan módosítható tarifamodellt hozunk létre.

Az alkalmazott megállóhely-csoporti modell külföldön beváltan alkalmazott példákra alapul, a fizikai megállókat logikai megállók alá vonja össze, amely logikai megállók többnyire településeknek vagy külterületi településrészeknek, vasútállomásoknak feleltethetők meg. Az összevonás során a vizsgált területen mintegy negyedére csökkent a csúcsok száma, annak ellenére, hogy a fizikai megállók túlnyomó többsége 1 km-en belüli légvonalbeli távolságban maradt a hozzá rendelt logikai megállótól.

A logikai megállók egymástól vett távolságát négyféle módon határoztuk meg. Először csak bármely két pont légvonalbeli távolságát vettük, majd három különböző módon súlyoztuk a gráfot, ezt követően a csúcsok (logikai megállók) közötti legrövidebb távolságot a súlyozott gráfokon is kiszámítottuk.

A vizsgált területre célforgalmi mátrixot határoztunk meg a 2011. évi népszámlálási adatok alapján, így forgalmi ráterheléses vizsgálatot végeztünk az eltérő súlyozású gráfokra. Ezek közül a logikai távolságokkal súlyozott gráf bizonyult a valósághoz leginkább közel állónak, ezért e gráfra vetítve határoztuk meg, hogy az egyes kilométer-övezetekben mekkora utasforgalom jelenik meg.

A jelenleg érvényes, övezetes bérletárakat véve kiszámítottuk, hogy az összes utas mekkora bevételt „termel”, majd meghatároztuk, hogy kilométer-alapú bérletár-képzés esetén milyen árazási függvény alkalmazása mellett érhető el a meghatározott összbevétel. Ezután az eredményül kapott árazási függvényekkel bérletárakat képeztünk, melyek fajlagos – kilométerre vetített – költségét a távolság függvényében ábrá-

zolva arra jutottunk, hogy a fajlagos költségeket ábrázoló görbék közel ugyanazon pontban metszik egymást, amely pont rendkívül közel esik a hazánkban jelenleg alkalmazott árazáshoz kapcsolódó görbe töréspontjához.

A logikai megállók képzésével, majd a gráf súlyozásával tehát egy olyan modellt hoztunk létre, amelynek valóságot jól reprezentáló mivoltát teszteléssel is alá tudtuk támasztani. A célforgalmi mátrix hálózatra történő ráterhelésével, majd a bázis összebevételt célul kitűző árazási függvényekkel olyan eredményekre jutottunk, amelyek a jelenleg alkalmazott megoldásokat jól közelítik. Ebből kifolyólag a gráf alapú integrált díjképzés reális alternatívának tűnik a hazánkban jelenlegi alkalmazott tarifamodellek leváltása, új és egyéges tarifarendszer bevezetése esetén.

Irodalomjegyzék

- [1] <http://doprovni.net/mhd/17392/integrovaný-dopravní-system-ceske-republiky/>
- [2] <https://www.herry.at/index.php/verkehrsmodellierung/137-modellrechnung-verbundtarifsystem-fuer-die-ostregion-vorbereitung-einer-umstellung-des-verbundtarifsystems-fuer-die-ostregion>
- [3] <https://slideplayer.cz/slide/11137512/>
- [4] <http://www.iidol.cz/stranky/3:mapy-idol.html>
- [5] Kovács Máté – Németh András: Elővárosi tarifarendszer bevezetésének lehetőségei Szombathely vonzaskörzetében. Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, 2018. március 22-23.
- [6] <https://www.volanbusz.hu/hu/menetrendek/vonalhalozati-terkep>
- [7] <http://ballal.gofree.hu/G/Fali/MAV2011V1S.jpg>
- [8] Magyarország településhálózata 1. Agglomerációk, településegységek 82-91. o. Központi Statisztikai Hivatal, 2014. ISBN 978-963-235-460
http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/mo_telepuleshalozata/agglomeracio.pdf
- [9] https://www.ksh.hu/docs/szolgáltatások/adatigenyles/ksh_adatvedelmi_szabalyzat_2017.pdf
- [10] R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- [11] Csardi G. – Nepusz T.: The igraph software package for complex network research, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>
- [12] Dijkstra E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik 1/1, 269-271, 1959, DOI: 10.1007/BF01386390