



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedési és Járműmérnöki Kar

Országos Tudományos Diákköri Konferencia 2025

Budapest közösségi közlekedési
hálózatának gráf alapú vizsgálata

Marozsán Antal Patrik

Konzulens:
Varga Balázs

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
2. Felhasznált irodalom, módszertan	6
2.1. A közösségi közlekedés arányai a jelenkorban	6
2.2. Egységes forgalmi modell (EFM)	13
2.2.1. Területi modell	13
2.2.2. Hálózati modell	14
2.3. GTFS	16
2.4. A 4 lépcsős forgalmi modell és az attól való eltérés	17
2.4.1. A modell lépései	18
2.4.2. Modell(ek) az útvonalak kiválasztására	19
2.4.3. A forgalom szétosztása	20
2.5. A maximális-minimális útvonal-kapacitás probléma	20
3. A módszertan megvalósítása	22
4. Eredmények és kiértékelésük	28
5. Konklúzió, a projekt folytatásának lehetőségei	39
A. Melléklet	43

Nyilatkozat a generatív mesterséges intelligencia alkalmazásáról

Én, Marozsán Antal Patrik, kijelentem, hogy ebben a tudományos munkában generatív mesterséges intelligenciát (AI) használtam. Én, mint a dokumentum szerzője, teljes felelősséget vállalok a dokumentum tartalmáért, állításaiért és hivatkozásaiért. Az alábbiakban áttekintést adok a generatív mesterséges intelligencia alkalmazásáról:

AI-t a program kódolásához és fordításra használtam többféle módon:

- használtam egyszerűbb, de hosszabb kódok megíratására a saját elképzeléseim alapján
- függvények, ábrák generálására adott input mellett
- meglévő kód módosítására, kódok kombinálására
- kód debuggolásra
- szövegek fordítására

Kivonat

A klímaváltozás és a környezetvédelem korában a károsanyag-kibocsátás csökkentése egyre sürgetőbbé válik, és a tömegközlekedés használata az egyik leghatékonyabb eszköz erre. Azonban ahogy minden infrastruktúra, a tömegközlekedési hálózat kapacitása is korlátozott, és nem mindenki számára érhető el vagy használható optimális módon. Budapest esetében a jelenlegi rendszer bizonyára jó kihasználtsággal működik, de van lehetőség további utasok szállítására is. A kérdés tehát az, hogy milyen mértékben lenne képes a közösségi közlekedési rendszer több utast befogadni, és milyen feltételek mellett.

Dolgozatomban ennek a kérdésnek járok utána a budapesti tömegközlekedési hálózat elemzésével. Az elemzés során a hálózatot egy kapacitásokkal súlyozott irányított gráffá alakítom, amely lehetővé teszi, hogy részletesen vizsgáljam a kapacitásbeli többleteket és hiányokat a meglévő forgalmi adatok alapján. Megvizsgálom, hogy hol vannak a hálózat szűk keresztmetszetei és javaslatot teszek arra, hogy milyen beavatkozásokkal lehet ezen javítani. Ezt követően módváltást feltételezve a személygépjármű forgalom egy részét hozzáadom a tömegközlekedési forgalomhoz, és megnézem, milyen változásokat eredményez ez a hálózat terheltségében. Az eredményeket összehasonlítva választ kaphatunk arra, hogy Budapest tömegközlekedési rendszere mennyire lenne képes megbirkózni a személygépjármű-használat radikális csökkentésével. A gráf előállításához és az egyes viszonylatok kapacitásához a BKK, a MÁV, és a Volán GTFS (General Transit Feed Specification) adatai, az utazási igények meghatározásához az EFM (Egységes Forgalmi Modell) lett felhasználva.

A feladat Python nyelven lett implementálva.

Abstract

In an era of climate change and environmental protection, reducing emissions is becoming increasingly urgent and using public transport is one of the most effective ways to do so. However, like all infrastructure, the public transport network has limited capacity and is inaccessible or cannot be utilized effectively. In the case of Budapest, the current system is certainly well utilised, but there is also potential for further passengers. So the question is to what extent the public transport system could accommodate more passengers and under what conditions.

In this paper, I explore this question by analysing the public transport network in Budapest. In the analysis, I transform the network into a capacity-weighted directed graph, which allows me to examine the capacity surpluses and deficits based on existing traffic data. I will examine where bottlenecks in the network exist and propose suggestions to improve them. Then, assuming a modal shift, I will add a part of the car traffic to the public transport traffic and analyze the effects of these modifications in network load. By comparing the results, we can see how well Budapest's public transport system could cope with a radical reduction in car use. The GTFS (General Transit Feed Specification) data of BKK, MÁV, and Volán were used to generate the graph and the capacity of each route, while the EFM (Uniform Traffic Model, Egységes Forgalmi Modell in hungarian) was used to determine the travel demand.

The task was implemented in Python.

1. Bevezetés

A matematikában gyakran találkozunk a "Tegyük fel, hogy..." és a "Mi lenne, ha..." típusú kérdésekkel, amelyek segítségével különböző elméleti forgatókönyveket vizsgálunk. Ezek a feltételezések lehetőséget adnak arra, hogy komplex rendszereket egyszerűbbé tegyünk és az elképzelések mentén új perspektívából lássuk a valóságot. Ez a dolgozat is egy ilyen gondolat kíséretén alapul: "Mi lenne, ha Budapesten minden személygépjárművet használó közösségi közlekedésre váltana?"

Első pillantásra talán egy kaotikus helyzetre, például a nyári időszakban tapasztalható MÁV-os összeomlásra gondolhatnánk, amikor a rendszer nem képes megbirkózni a megnövekedett forgalommal. Viszont ha mélyebben belegondolunk, egy még izgalmasabb kérdés is felmerülhet: "Mekkora részét tudná a jelenlegi közösségi közlekedési hálózat kezelni a személygépjárművet használó lakosságnak?"

Ez a kérdés különösen időszerű, hiszen a klímaváltozás és a környezetvédelem korában a károsanyag-kibocsátás csökkentése egyre sürgetőbbé válik, és a közösségi közlekedés használata az egyik leghatékonyabb eszköz erre. Azonban, ahogy minden infrastruktúra, a közösségi közlekedési hálózat kapacitása is korlátozott, és nem mindenki számára érhető el vagy használható optimális módon. Budapest esetében a jelenlegi rendszer bizonyára jó kapacitás kihasználtsággal működik, de adódhat lehetőség további utasok szállítására is. A kérdés tehát az, hogy milyen mértékben lenne képes a hálózat több utast befogadni, és milyen feltételek mellett.

Dolgozatomban ennek a kérdésnek járok utána a budapesti közösségi közlekedési hálózat elemzésével. Az elemzés során a hálózatot egy kapacitásokkal súlyozott irányított gráffá alakítom, amely lehetővé teszi, hogy részletesen vizsgáljam a kapacitásbeli többleteket és hiányokat a meglévő forgalmi adatok alapján. Ezt követően a személygépjármű forgalom egy részét hozzáadom a közösségi közlekedési forgalomhoz, és megvizsgálom, ez milyen változásokat eredményez a hálózat terheltségében. Az eredményeket elemezve választ kaphatunk arra, hogy Budapest közösségi közlekedési rendszere mennyire lenne képes megbirkózni a személygépjármű-használat radikális csökkentésével.

A dolgozat felépítése a következő: először ismertetem a projekthez kapcsolódó irodalmat és módszertant, közben részletesen tárgyalva olyan elemeket, mint az Egységes Forgalmi Modell, a 4 lépcsős forgalmi modell és a GTFS. Ezt követően bemutatom, hogyan lehetséges GTFS adatok

segítségével megalkotni egy közösségi közlekedési hálózatot, majd azt egy irányított gráffá transzformálni. A gráf és az adott közösségi közlekedési forgalmi igények alapján meghatározom, hogy Budapest mely részein található szabad kapacitás és hol nem, továbbá ellenőrzöm az egyes megállók forgalmát a szabad kapacitások keresése érdekében. Ezt követően a közösségi közlekedési igényeket bővíttem a személygépjármű forgalommal, majd vizsgálom a kapott eredmények eltéréseit és ezek okait. Az eredmények kiértékelése és a konklúziók levonása után végül ajánlásokat fogalmazok meg, hogy mik lehetnek a projekt folytatási lehetőségei.

2. Felhasznált irodalom, módszertan

2.1. A közösségi közlekedés arányai a jelenkorban

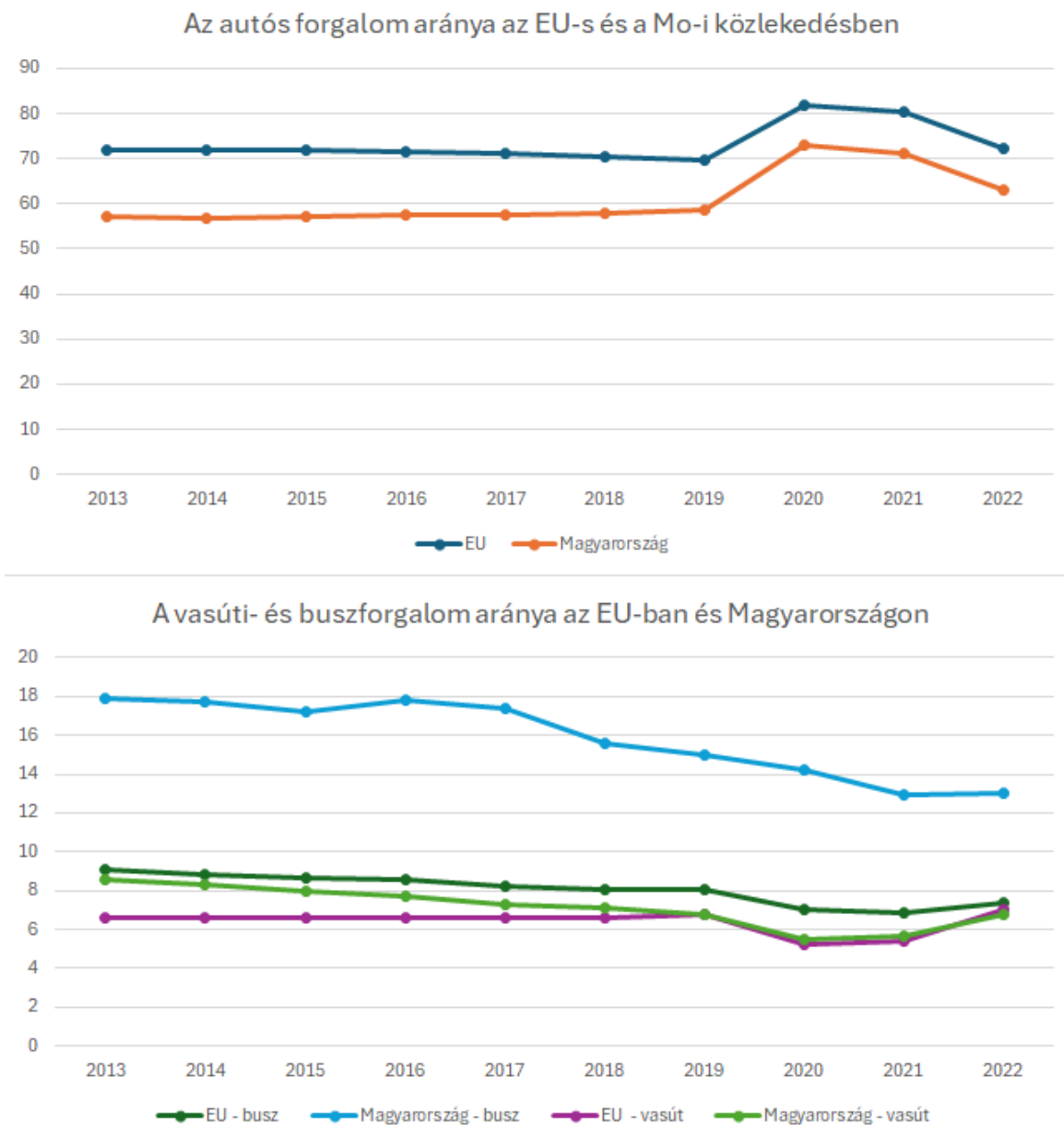
Első lépésként érdemes utánajárni a közösségi közlekedés kihasználtságának a teljes forgalomhoz képest országos szinten[1], ez látható az 1. ábrán.

2013 és 2019 között az EU-ban az autóval való közlekedés aránya fokozatosan 72%-ról 69.8%-ra csökkent. 2020-ban azonban hirtelen 81.8%-ra emelkedett. Ez a 2020-as COVID-19 világjárványnak tulajdonítható, amely valószínűleg megzavarta a tipikus utazási szokásokat, és a lezárások és korlátozások miatt a személygépkocsi-használat növekedéséhez vezetett. Magyarország az EU-hoz hasonló mintázatot mutatott a közlekedési eszközök használatának folyamatos növekedésével 2019-ig. A 2020-as évben hirtelen emelkedés (73%), majd 2021-ben és 2022-ben csökkenés következett be. A COVID-19 hatása itt is látható, Magyarországon 2022-ben az EU-hoz képest nagyobb relatív csökkenés volt tapasztalható (72.2% vs. 63.1%).

Az EU-ban az autóbuszos közlekedés aránya fokozatosan csökkent, a 2013-as 9.1%-ról 2020-ra 7%-ra esett vissza, majd 2022-re 7.4%-ra módosult az arány. Ez azt jelezheti, hogy a tömegközlekedés más közlekedési módok felé tolódik el, vagy pedig a személygépkocsikra támaszkodik. Magyarországon az autóbuszok használata jelentősen meghaladja az uniós átlagot, 2013-ban 17.9% volt, ez az arány azonban folyamatosan csökkent és 2022-re elérte a 13%-ot. Ez a buszfüggőség csökkenését mutatja, ami az egyéb közlekedési módok javulásának vagy az ország buszjárataival kapcsolatos problémáknak tudható be.

A vasúti közlekedés használata az EU-ban 2019-ig stabilan 6.6%-os volt, majd 2020-ra 5.2%-ra

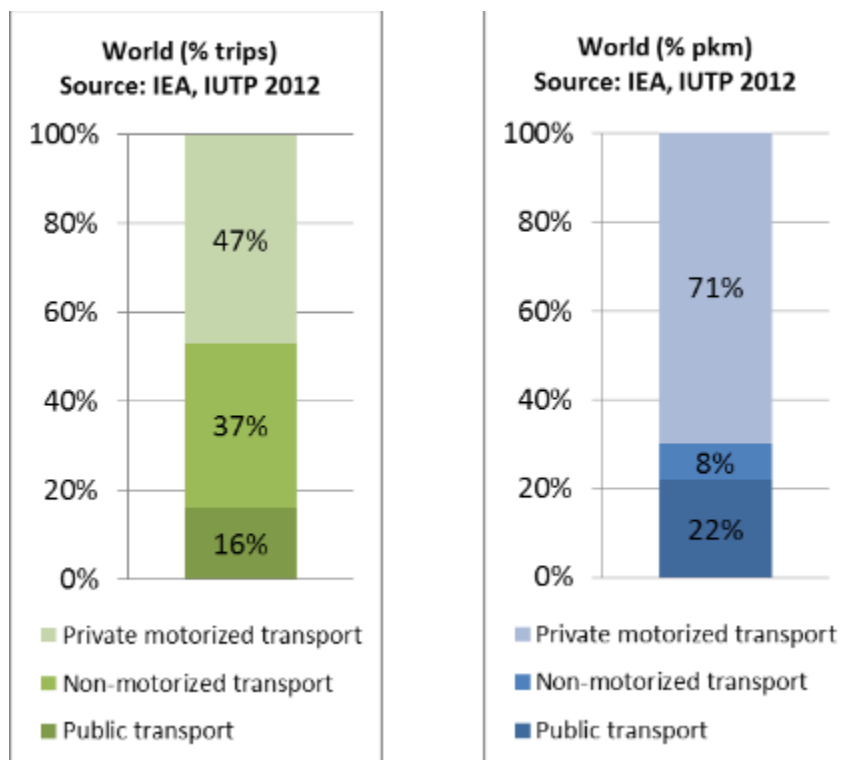
csökkent, valószínűleg a világjárvány miatt. 2022-ben a vasúti közlekedés használata 7%-ra emelkedett, ami a járvány utáni fellendülést és a vasúti közlekedés felé való esetleges visszarendeződést jelzi. Magyarországon a vasúti közlekedés kihasználtsága az EU-nál erőteljesebben csökkent, a 2013-as 8.6%-ról 2021-re 5.7%-ra esett vissza. Azonban 2022-ben enyhe fellendülés volt tapasztalható, 6.8%-ra. Magyarországon a vasúti közlekedés használata folyamatosan magasabb volt, mint az uniós átlag, bár a különbség az elmúlt években csökkent.



1. ábra. A különböző közlekedési módok aránya 2013 és 2022 között

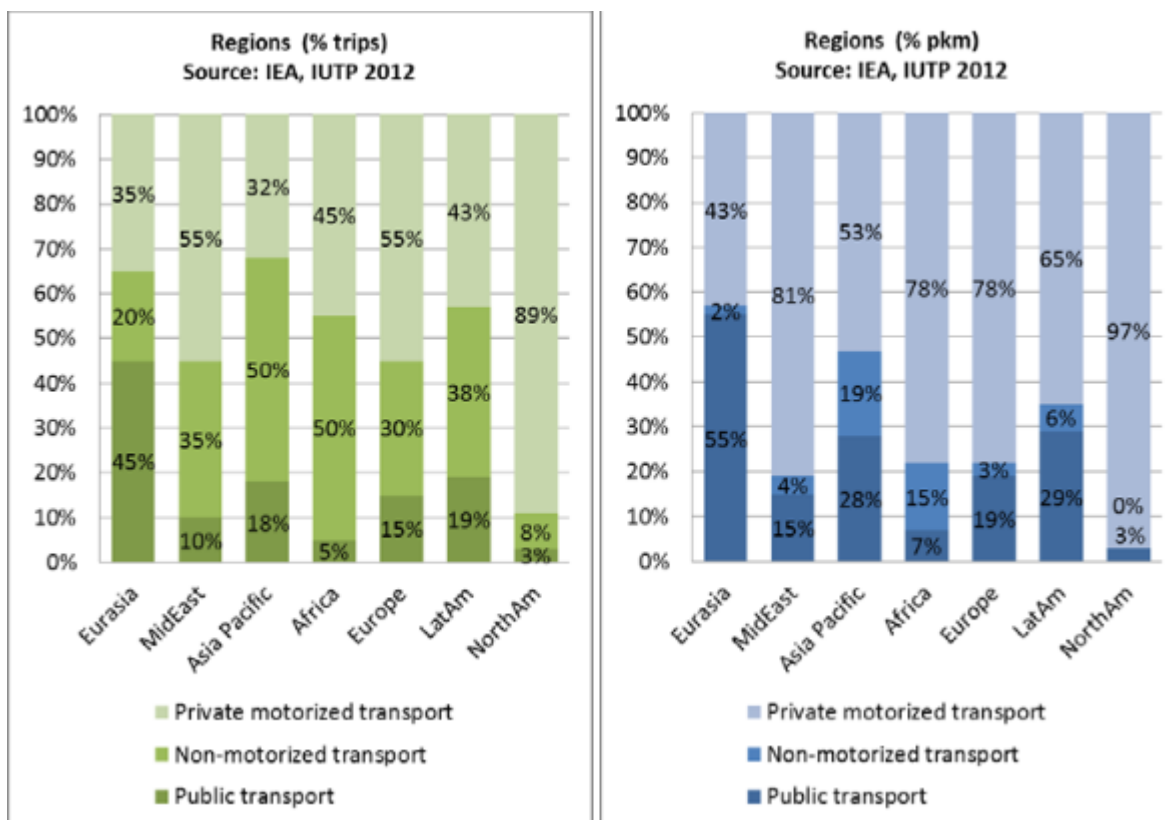
forrás: [1]

Az országos szintű adat viszont nagyban különbözhet a települési (városi) adatoktól, hiszen az egyes módok elérhetősége és az utazási igények fajtája (pl. városon belüli ingázás) is eltér, ezért a következő lépés városszintű adatok keresése és elemzése a közlekedési módok arányairól (modal split); az alábbiakban előbb globális, majd európai adatok figyelhetők meg.



2. ábra. Közlekedési módok aránya a világ városaiban (2012)

forrás: [2]



3. ábra. Városi közlekedési módok aránya a világon régiók szerint (2012)

forrás: [2]

A 2. ábrát vizsgálva elmondható, hogy világszerte a személygépjármű dominál, különösen Észak-Amerikában, ahol az utazások 89%-át és az utaskilométerek 97%-át teszi ki. A tömegközlekedés világszerte a napi utazásoknak átlagosan csak 16%-át teszi ki és az utaskilométerek 22%-át. Az egyes kontinenseket vizsgálva – a 3. ábra szerint – a közösségi közlekedés szempontjából Euráziában a legjobb a helyzet, ott az utaskilométerek 45%-át adja a tömegközlekedés; szemben Észak-Amerikával, ahol mindösszesen 3% ez az arány.

Város	Kerékpár (%)	Gyaloglás (%)	Közösségi közlekedés (%)	Személygépjármű (%)
Amszterdam	22	4	30	44
Berlin	9.9	7.2	41	38.5
Firenze	4.04	7.68	19.1	66.82
Koppenhága	36.12	5.84	29.23	26.4
Milánó	2.05	8.82	35.2	51.53
München	10.1	6.6	45.2	37.4
Róma	0.25	7.37	23.3	68.34
Stockholm	7	15	43	33
Torinó	1.47	10.3	24.2	64.07
Bécs	7	27	39	26.97

1. táblázat. Közlekedési munkamegoszlás európai nagyvárosokban (2019)

Forrás: [3]

A 1. táblázat szerint a kerékpárosok aránya Koppenhágában (36.12%) és Amszterdamban (22%) a legmagasabb, máshol nagyon alacsony ez az arány, például Rómában (0.25%) és Milánóban (2.05%). Koppenhágában a legalacsonyabb az autóhasználat (26.4%), ami a nem személygépjárművel történő közlekedést támogató politikára utal.

Magas autófüggőség figyelhető meg a dél-európai városokban, ilyen Firenze (66.82%), Róma (68.34%) és Torino (64.07%). A tömegközlekedés aránya itt sokkal alacsonyabb az észak-európai városokhoz képest, ami azt jelzi, hogy a tömegközlekedési infrastruktúrában vannak hiányosságok. Az alacsony kerékpáros arány és a magas autófüggőség kombinációja azt mutatja, hogy ezekben a városokban nincs alternatívája az autóhasználatnak.

Ezzel szemben az északi városokban magasabb a közösségi közlekedés aránya: Berlinben 41%, Münchenben 45.2%, Stockholmban 43%, Bécsben pedig 39%. Ezekben a városokban viszonylag alacsony a gépkocsihasználat, bizonyára nagyobb beruházások történtek a tömegközlekedési hálózatokba. Stockholm kiemelkedik a gyalogosok magas arányával (15%), ami gyalogosbarát városi környezetre utal.

2. táblázat: Közlekedési módok aránya Londonban

Év	Közösségi közlekedés (%)	Személygépjármű (%)	Kerékpár (%)	Gyaloglás (%)
1995	31	46	1	22
1996	31	46	1	22

Év	Közösségi közlekedés (%)	Személygépjármű (%)	Kerékpár (%)	Gyaloglás (%)
1997	32	45	1	22
1998	33	45	1	22
1999	33	44	1	22
2000	34	43	1	21
2001	35	43	1	22
2002	35	42	1	21
2003	37	41	1	21
2004	38	39	1	21
2005	38	39	2	21
2006	39	39	2	21
2007	41	37	2	20
2008	42	36	2	21
2009	42	35	2	21
2010	43	35	2	21
2011	43	34	2	21
2012	44	33	2	21
2013	45	33	2	21
2014	45	32	2	21
2015	45	32	2	21

Forrás: [4]

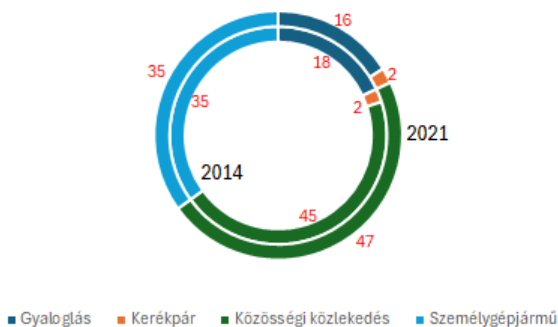
Londonban 1995 és 2015 között a személygépkocsi-használat folyamatosan csökkent a 2. táblázat szerint, az 1995-ös 46%-ról 2015-re 32%-ra. A tömegközlekedés használata az 1995-ös 31%-ról 2015-re 45%-ra nőtt, ami a fenntarthatóbb közlekedési módok felé történő sikeres elmozdulást jelzi. Ez olyan módszereknek tulajdonítható, mint a tömegközlekedési szolgáltatások javulása és az olyan szakpolitikának, mint a dugódíj bevezetése és a tömegközlekedési infrastruktúra bővítése.

A kerékpározás aránya viszonylag alacsony, de enyhe növekedést mutat, az 1995-ös 1%-ról a 2015-ös 2%-ra. Ez ugyan előrelépés, de szerény az olyan városokhoz képest, mint Amszterdam vagy Koppenhága. A londoni kerékpárosok számának alacsony növekedése arra utal, hogy erő-

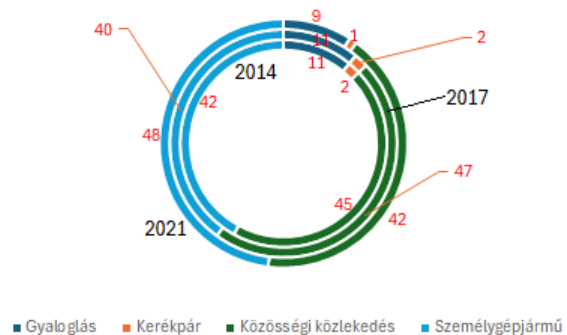
teljesebb kerékpárosbarát politikára van szükség, például kiterjedtebb kerékpáros infrastruktúrára, továbbá fejlesztésekre a kerékpárt használók biztonságáért.

A gyaloglás aránya az évek során stabil maradt, 20-22% körül mozog. Ez arra utal, hogy a gyalogos szokások nem változtak jelentősen, a tömegközlekedés használatának növekedése és a gépkocsihasználat enyhe csökkenése ellenére.

Közlekedési munkamegoszlás utazásszám szerint



Közlekedési munkamegoszlás utaskm szerint



4. ábra. Közlekedési munkamegoszlás Budapesten

az ábra az [5][6] források alapján készült

A 4. ábra alapján Budapesten a gyaloglás aránya utazásszám szerint a 2014-es 11%-ról 2021-re 9%-ra csökkent. A kerékpározás változatlanul alacsony maradt, 2%-ról 1%-ra csökkent. A tömegközlekedés aránya a 2014-es 45%-ról 47%-ra nőtt 2017-re, de 2021-re 42%-ra csökkent, valószínűleg a COVID-19 tömegközlekedéssel kapcsolatos aggályai miatt. A személygépkocsi-használat a 2014-es 42%-ról 2021-re 48%-ra nőtt, ami a személygépkocsi-függőség növekedését jelzi, feltehetően szintén a világjárvánnyal kapcsolatos viselkedésváltozások és a személygépjárművel történő közlekedés vélt biztonsága miatt.

Az utaskilométereket vizsgálva a gyaloglás aránya a 2014-es 18%-ról 2021-re 16%-ra csökkent, ami a várostervezésben, illetve az életmódban bekövetkezett változásokat vagy a világjárvány hatását tükrözheti. A kerékpározás aránya a fenti időszak alatt végig 2%-os maradt. A tömegközlekedés használatában enyhe növekedés volt tapasztalható, a 2014-es 45%-ról 47%-ra 2021-ben, ami a világjárvány ellenére a fenntartható közlekedési módok felé mutató tendenciát jelez. Az autóhasználat 35%-os szinten maradt, ami azt jelzi, hogy a tömegközlekedésbe történő beruházások ellenére a személygépkocsi-használat nem csökkent jelentősen az EU egészében.

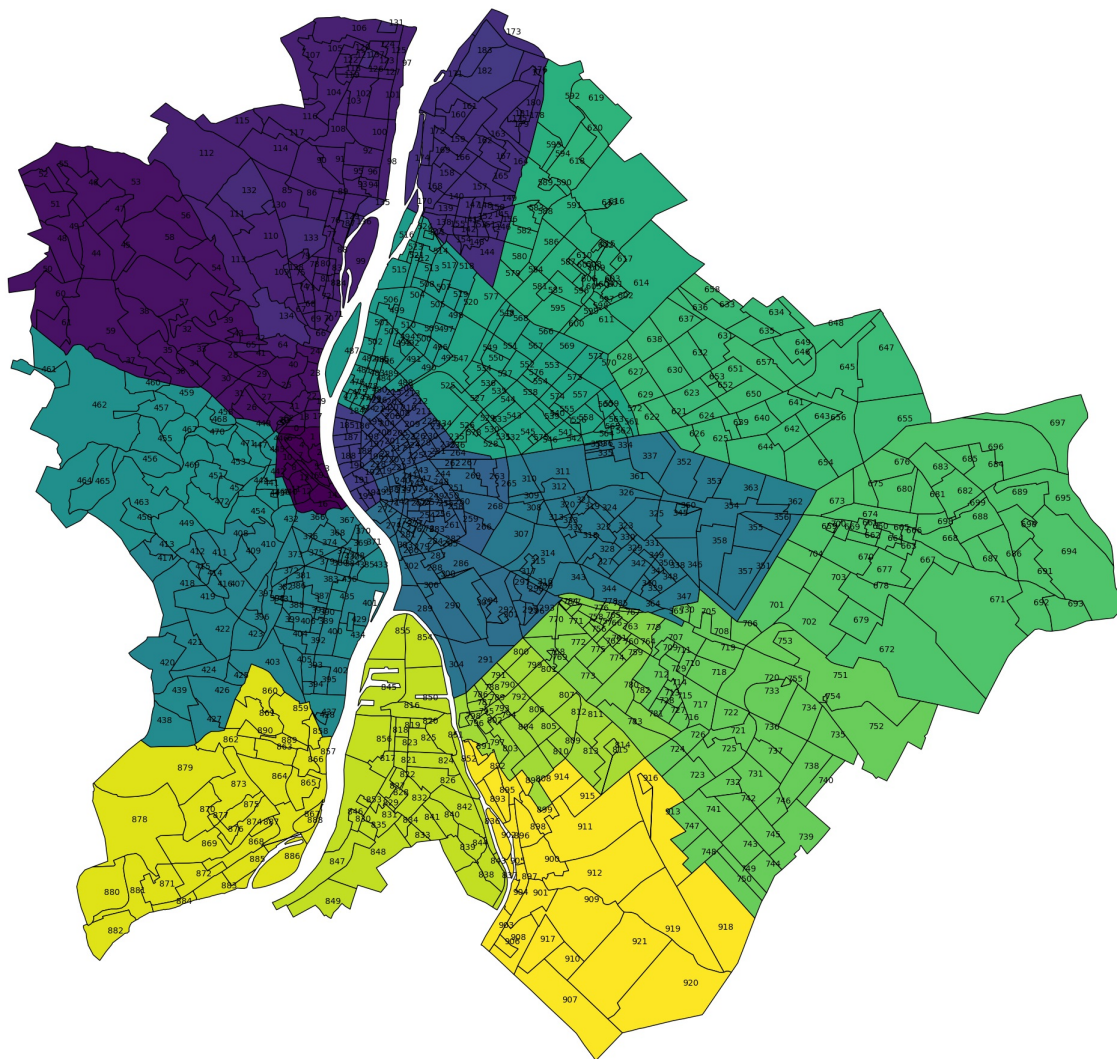
2.2. Egységes forgalmi modell (EFM)

2.2.1. Területi modell

A területi modell Budapestet és annak agglomerációját fedi le. Biztosítja az EFM-modell[7] határait és tartalmazza a közlekedési igények keletkezési helyének területi vonatkoztatási egységeit, a forgalmi körzeteket és az azokat összekötő közlekedési hálózatokat.

A vizsgált térségben fellépő forgalmi igényeket a forgalmi modell koncentrálna körzetekhez rendeli, miközben a forgalom a kialakított kiinduló és célkörzetek között jelentkezik. A modell a fővárost és környékét 1201 forgalmi körzetre osztja, ezen belül 922 budapesti körzetre. A budapesti körzetbeosztás hierarchikus szintjei között 23 kerület, 164 alkerület és 520 városrendezési körzet található. A fővároson kívül, az agglomerációban 186 településen 255 körzet található: a községek jellemzően egy körzetként szerepelnek, a nagyobb városok 2-8 körzetre bomlanak fel. Ezen felül 24 külső körzetet (kordonpont, modellhatáron) is megkülönböztetünk. Önálló körzetként szerepel továbbá (a megfelelő területi egység alatt):

- 40 bevásárlóközpont/hipermarket
- 48 logisztikai központ és ipari körzet
- 2 speciális körzet: Ferihegyi repülőtér I és II terminál



5. ábra. Budapest felosztása zónákra

megjegyzés: az ábra színezése figyelemfelkeltő célt szolgál, nincs egyéb szerepe

2.2.2. Hálózati modell

A hálózati modell olyan adatállomány, amely a közúti és vasúti hálózatot számítógépes programok számára kezelhető formában, megfelelő paraméterekkel írja le.

A közúti közlekedési hálózat fő elemei a szakaszok (linkek), csomópontok (node-ok), valamint a csomópontokban definiált kanyarodási mozgások (turn-ök).

A csomópontok az úthálózati elemek önállóan is értelmezhető alaprétegei. Forgalomtechnikai szempontból többféle csomópont létezik:

- jelzőlámpával irányított
- körforgalom
- autópálya gyűjtő pályáit bekötő
- elsőbbségadás kötelező
- egyenrangú (ahol a jobbkéz-szabály érvényesül)
- technikai csomópont (vasúti átjáró)

A modellben mintegy 10 700 csomópont található. A csomópont kapacitása, a kereszteződés elméleti órás maximum forgalma, nem egyezik meg a kanyarodó irányok kapacitásának összegével.

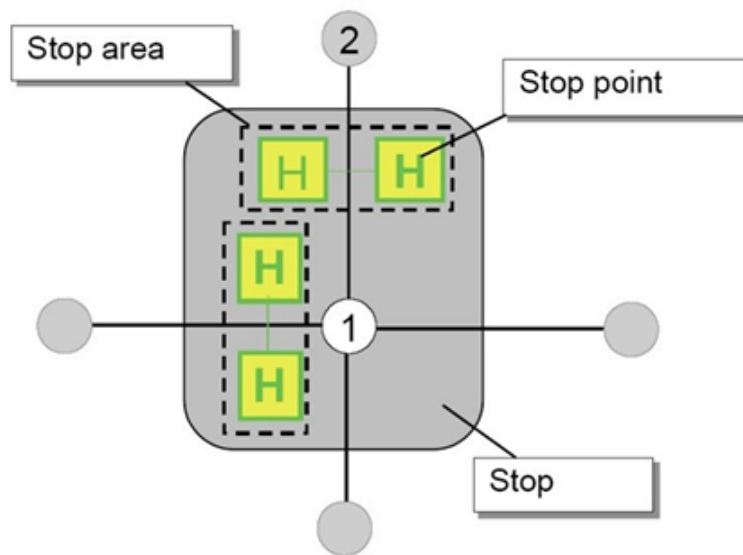
A szakasz a modellezett terület úthálózatát reprezentáló réteg, amely csomópontokat köt össze. Szakaszok közötti kapcsolat csak csomópontokban értelmezhető, vagyis szakaszok csak csomópontok között lehetségesek. Kezdő- és végcsomópontja egyértelműen meghatározza a szakaszt, így módon két csomópont között minden esetben két, esetenként eltérő tulajdonságú szakasz hozható létre. A szakaszok főbb paramétereik alapján típusokba lettek sorolva. Az úttípus határozza meg a szakasz kapacitását, az engedélyezett járműrétegeket, a járműrétegek szabadáramlási sebességét, a sávszámot, valamint az egyes szakaszok alá-fölé rendeltségét meghatározó rangot.

A közösségi közlekedési hálózati modellből elegendő a megállóhely és gócpont definíciókat felhasználni.

A megállóhelyek háromrétegű, egymásra épülő rendszert alkotnak, melyet a 6. ábra mutat be:

1. Megállóhely (StopPoint): a járművek konkrét megállópontjainak leképezése. A modellben minden táblával jelölt budapesti megállópont külön megállóhelyként szerepel, melyek fizikai elhelyezkedését az adatállomány koordinátahelyesen tartalmazza.
2. Megállóhely-csoport (StopArea): egy vagy több StopPoint területi alapú csoportosítása. A jellemző megállóhely-csoportok közé tartozik egy útszakaszon lévő megállópár, vagy egy kereszteződés négy megállópontja. Nagyobb és összetettebb közlekedési csomópontok esetében, területi alapon lehatárolva akár 10-20 megállópont is tartozhat egy megállóhely-csoporthoz, például egy nagyobb autóbusz-decentrum.

3. Gócpont vagy megállóhely-góc (Stop): a területi alapon összetartozó megállókat, illetve azok körzeteit fogja össze. Lehetővé teszi a megállóhelyekre és megállóhely-csoportokra vonatkozó adatok összevont kinyerését, illetve a gócponton belüli területek közötti gyaloglások kezelését. Jelenthet nagyobb területen különböző módú megállókat, vagy egyszerűen sok megállót nagy csomópontokban. Ide tartozik – az ábrának megfelelően – az egy csomópont körzetében lévő megállóhelyek együttese is.



6. ábra. Megállóhely struktúra

forrás: [7]

A modellezés során az EFM modellből a megállóhely struktúra, a különböző forgalomnagyságok (OD mátrix) és a forgalmi körzetek kerültek felhasználásra, a modell egyéb részei nem; vagyis a modell nem rendelkezik komolyabb szereppel a vizsgálatokban. Ezért a modellt nem volt szükséges makroszkopikus forgalommodellező szoftverrel (VISUM) vizsgálni. Összefoglalva, a dolgozat teljesen független a VISUM-tól, az EFM modellt csak adatforrásként használtam fel.

2.3. GTFS

A GTFS (General Transit Feed Specification)[8] egy nyílt szabvány, amelyet a tranzitrendszerrel kapcsolatos releváns információk utasok számára történő terjesztésére használnak. Lehetővé

teszi, hogy a közösségi közlekedési ügynökségek olyan formátumban tegyék közzé a közlekedési adataikat, amelyet a legkülönbözőbb szoftveralkalmazások használhatnak. Két fő részből áll: GTFS Schedule és GTFS Realtime.

A GTFS Schedule a statikus közösségi közlekedési információk közös formátumát határozza meg. Egyszerű fájlok gyűjteményéből áll, többnyire szöveges fájlokból (.txt), amelyeket egyetlen ZIP fájl tartalmaz. Minden fájl a közlekedési információk egy adott aspektusát írja le, mint például a megállók, útvonalak, utazások, stb. A GTFS menetrendi adatkészlet a legegyszerűbb formában 7 fájlból áll:

- agency.txt
- routes.txt
- trips.txt
- stops.txt
- stop_times.txt
- calendar.txt
- calendar_dates.txt

Ezen alapfájlok mellett további (opcionális) fájlok is csoportosíthatók, hogy más szolgáltatási elemekről, például viteldíjakról, fordításokról, átszállásokról, megállóhelyi útvonalakról, stb. adjanak információt. Jelenleg több mint 15 opcionális fájl létezik, amelyek kibővítik a GTFS alapelemeit, köztük a locations.geojson, amely a szöveges fájlok mellett egy új formátumot vezetett be, ez a földrajzi területek ábrázolására használható.

A dolgozat során a BKK, a Volán és a MÁV GTFS adataival dolgoztam, amelyek 2024.09.06-áról származnak. Az aktuális menetrendi adatokat a vállalatok adott időközönként frissítik és közzéteszik, valamint az utazástervező applikációk is ezen adatok alapján működnek.

2.4. A 4 lépcsős forgalmi modell és az attól való eltérés

A négylépcsős modell (4SM – 4 Step Model)[9][10] az elsődleges eszköz egy közlekedési rendszer jövőbeli igényeinek és kapacitásainak előrejelzésére, amelyet jellemzően regionális vagy

szubregionális léptékben határoznak meg (kisebb léptékben gyakran egyszerűsített modelleket alkalmaznak).

2.4.1. A modell lépései

1. A modell első lépése az utazások generálása, amely során egy adott közlekedési elemzési zónából induló vagy oda irányuló utazások számának becslése történik.
2. Az utazások elosztása a modell második eleme. Ebben a lépésben az utazók kiindulási- és célállomásait összevetik, hogy kialakítsák az „utazás táblázatot”; egy mátrixot, amely az egyes kiindulási helyekről az egyes célállomásokra irányuló utazások számát mutatja. Az utazáselosztási lépést a honnan-hová mátrix (a továbbiakban OD (origin-destination) mátrix) bevezetése indítja el. A mi esetünkben ez adott, az EFM-modellből származik; a továbbiakban a Budapest és környékéhez tartozó utazási igényekkel dolgozom.

A lépéshez kötődő fontos definíció a link impedancia, amely a hálózatban az egyik csomóponttól a másikra való átjutás nehézsége. A modellezéshez a link impedancia távolságként is kifejezhető, de az utazási idő vagy a látszólagos költségek általában jobb mérőszámok. A különböző közlekedési tevékenységek esetében a mérőszámok eltérőek lehetnek.

A feladat 2 jelentős pontban tér el a klasszikus, járműforgalmi ráterheléstől: egyrészt nem úthálózatot vesz figyelembe, hanem a tömegközlekedés kapcsolatait; másrészt általános esetben ez a mérőszám az utazás ideje. Azonban a feladat során nem ezt, hanem az úgynevezett szállítási kapacitást használtam, vagyis hogy 2 csomópont között hány fő elszállítása lehetséges, ennek következtében az impedanciák sem értelmezhetőek forgalomfüggő módon (erről még esik szó a későbbiekben a 3. fejezetben).

3. A módválasztási elemzés, avagy módválasztás a harmadik lépés, amikor adott kiindulási és célállomás közötti utazásokat felosztanak közlekedési eszközökkel történő utazásokra, vagyis hogy mely utazók melyik közlekedési módot (mely járműve(ke)t) fogják használni a közlekedésre. A dolgozat alapfeltevése, hogy minden közlekedő a közösségi közlekedést választja.
4. Az útvonal kijelölés, forgalomkiosztás vagy útvonalválasztás a közlekedési hálózatokban a kiindulási és a célállomások közötti útvonalak (alternatív nevükön útvonalak) kiválasztásá-

ra vonatkozik. Ez a negyedik, egyben utolsó lépése a hagyományos közlekedéstervezési modellnek. A folyamat során először ki kell számítani a legrövidebb utat minden egyes kiindulási helyről az összes célállomásra (általában a legrövidebb idő alatt megtett utat használják, én ezzel szemben a legnagyobb kapacitású utat preferálok). Ezután az egyes OD párok utazásait hozzárendelik a minimális útvonal linkjeihez, és az utazásokat összegzik az egyes linkekre. A hozzárendelt utazási mennyiséget összehasonlítva a kapcsolat kapacitásával megállapítható, hogy az nem túlterhelt-e. Mivel a legrövidebb útvonal megváltozhat, ezért az egész folyamatot többször meg kell ismételni (iterálni), amíg az utazási kereslet és az utazási kínálat között egyensúly nem alakul ki.

2.4.2. Modell(ek) az útvonalak kiválasztására

Az útvonalak kiválasztására számos modell létezik[11]. Én a "mindent vagy semmit" elnevezésű modellt használtam, amely a következő tulajdonságokkal rendelkezik: a módszer a kiindulási zónából bármely célzónába tartó utat egyetlen, minimális költségű útvonalra terhel.

Általánosságban véve a modell irreális, mivel minden OD pár között csak egy útvonal kerül felhasználásra, még akkor is, ha van másik útvonal is, amelynek utazási költsége azonos vagy közel azonos. Emellett a csomópontokon a forgalom elosztása annak figyelembevétele nélkül történik, hogy van-e megfelelő kapacitás. Ellenben a modell ésszerű lehet olyan ritka és nem túlterhelt hálózatokban, ahol kevés alternatív útvonal van, és ezek utazási költségei nagymértékben különböznek egymástól. Mivel most kapacitások a költségek (impedanciák, 2.4.1. fejezet), továbbá a különböző járművek kapacitása jelentősen eltérhet egymástól, ez teljesül. A modell az "ideális" útvonal azonosítására is használható: az az útvonal, amelyen a járművezetők szívesen közlekednének torlódás nélkül. Valójában ennek a modellnek a legfontosabb gyakorlati alkalmazása az, hogy építőelemként szolgál más típusú hozzárendelési technikákhoz. Korlátozása, hogy figyelmen kívül hagyja azt a tényt, hogy az útszakasz utazási ideje a forgalomnagyság mennyiségének függvénye. Az utazási időt az utasszám csak az utascserék idején keresztül befolyásolja, de ez a dolgozatban elhanyagolásra kerül, ennél fogva a modell alkalmazható.

2.4.3. A forgalom szétoztása

Tételezzük fel, hogy 2 csúcs között nem 1, hanem több út is vezet (ez a gyakorlatban ritkán nem teljesül). A cél a forgalom megosztása az utak között úgy, hogy a ráterhelés "optimális" legyen valamilyen szempontból. Ehhez nagy valószínűséggel a forgalmat meg kell osztani az utak között valamilyen arányban, a felosztást pedig az úgynevezett (makroszkopikus) fundamentális diagramok határozzák meg.

Ez azért lényeges a feladat szempontjából, mivel ezek közúti forgalom esetén használatosak. Én azonban tömegközlekedéssel dolgozom, ott pedig ezek nem feltétlenül teljesülnek, például bizonyos mértékig az utasok ráterhelése egy járműre (pl. busz) nem szükségszerűen jár az utazási idő növekedésével. A feladat ebben speciális: ahogy majd a későbbiekben olvasható, 2 csúcs között a teljes forgalmat egyetlen, a legnagyobb utaskapacitással rendelkező útra terhelem.

2.5. A maximális-minimális útvonal-kapacitás probléma

A maximális-minimális útvonal-kapacitás probléma[12][13] élsúlyozott gráfokkal foglalkozik. Adott (G, s, t, c) , ahol $G = G(V, E)$ irányított gráf, s és t forrás- és célcsúcsok; $c: E \rightarrow \mathbb{R}^+$ élsúlyozás, az adott él súlyát tekintjük a kapacitásának. A cél a maximális kapacitású út megtalálása az összes s - t út közül, amennyiben egy úton a legkisebb kapacitású él képezi az adott útvonal kapacitását.

A feladat megoldására létezik Dijkstra algoritmusának egy módosított változata, amelyhez az eredeti algoritmus alábbi változtatásai szükségesek:

- Távolság tömb helyett egy kapacitás tömböt használ, elemei formálisan így írhatóak fel:

$$\text{kapacitás}[v] = \max_{\pi \in \Pi(s, v)} \left\{ \min_{e \in \pi} c(e) \right\}, \quad (1)$$

ahol $\Pi(s, v)$ az összes s -ből v -be vezető út halmaza.

- Dijkstra algoritmusában minden csúcs távolságát ∞ -nel kell inicializálni. Itt a forrás esetében továbbra is ez a helyzet (a forráscsúcs korlátlan kapacitással rendelkezik önmagához), a fennmaradó esetekben azonban a kapacitásmezők inicializálása $-\infty$ -nel történik.
- Egy u csúcs szomszédainak meglátogatásánál a szomszédos csúcsok kapacitásának frissítési

koncepciója eltér Dijkstra algoritmusától:

$$\text{kapacitás}[v] = \max[\text{kapacitás}[v]; \min\{\text{kapacitás}[u]; c(u, v)\}], \quad (2)$$

ahol v kapacitását az u -n keresztül vezető út alapján kell frissíteni.

- Minden egyes lépésben a legkisebb költséggel rendelkező csúcs helyett a legnagyobb kapacitással rendelkező csomópontot kell választani.

Algorithm 1 Maximális-minimális útvonal-kapacitás

```
1: Részalgoritmus 1: KeresMaxMin (G, forrás, előző)
2: Input: G = a tárolt gráf, forrás = kiindulási csúcs, előző = az egyes csúcsok elődjének tárolására szolgáló tömb
3: Output: Visszaadja a maximális-minimális kapacitást a forrásból kiindulva.
4: kapacitás  $\leftarrow -\infty$ 
5: előző  $\leftarrow$  nem definiált
6: kapacitás[forrás]  $\leftarrow \infty$ 
7: Q  $\leftarrow$  a gráf minden csúcsa
8: while Q nem üres do
9:   u  $\leftarrow$  a Q-beli csúcsok közül a maximális kapacitású csúcs
10:  if kapacitás[u] =  $-\infty$  then
11:    STOP
12:  for v in u szomszédai do
13:    új_kapacitás  $\leftarrow \min(\text{kapacitás}[u], (u, v) \text{ kapacitása})$ 
14:    if új_kapacitás > kapacitás[v] then
15:      kapacitás[v]  $\leftarrow$  új_kapacitás
16:      előző[v]  $\leftarrow$  u
17:      Q frissítése v-vel
18: return kapacitás
19:
20: Részalgoritmus 2: KeresMaxMinÚt (G, forrás, cél)
21: Input: G = a tárolt gráf, forrás = kiindulási csúcs, cél = a csúcs, amit el akarunk érni (lehet akár az összes nem forrás csúcs)
22: Output: Visszaadja a maximális minimális kapacitású útvonalat a forrás csúcsból a cél csúcs-hoz.
23: KERESMAXMIN(G, forrás, előző)
24: u  $\leftarrow$  cél
25: út  $\leftarrow []$ 
26: while u  $\neq$  nem definiált do
27:   úthoz hozzáadni u-t
28:   u  $\leftarrow$  előző[u]
29: return megfordított út
```

Az első algoritmus a Dijkstra algoritmushoz hasonlóan $\mathcal{O}(|E| \cdot \log(|V|))$ komplexitású, a második pedig $\mathcal{O}(|V|)$. Optimális voltának bizonyítéka, hogy mindig a legnagyobb kapacitású csúcsot dolgozzuk fel, tehát amikor elérjük a célcúcsot, az adatszerkezeten belül megmaradó összes csúcsnak kisebb kapacitással kell rendelkeznie. Ezért a megtalált útvonal lesz az, amelyik a maximális-minimális kapacitással rendelkezik.

3. A módszertan megvalósítása

Ahogy azt a 2.4.1. fejezetben említettem, impedanciaként az úgynevezett szállítási kapacitást használtam. Erre azért volt szükség, mivel amikor a feladat megfogalmazásán dolgoztam, a következő kérdés merült fel bennem: "Tegyük fel, hogy a személygépjármű forgalommal való bővítés után valamely viszonylaton kapok egy extrém nagy igény értéket, például az M4-es metró esetén a Bikás park és Újbuda-központ között 200 000 utast az egyik irányba reggel 8 és 9 óra között (megjegyzés: csak a probléma illusztrálására használom ezt a szükségtelenül nagy számot). Ekkor számít-e bármit is, hogy a tömeg miatt a le- és felszállási idők varianciája miatt kialakulhat egy instabilitás, ami miatt a le- és felszállások ideje megnő(het), tehát a teljes menetidő is növekszik?" A válaszom pedig a nem volt, mivel lényegtelen a menetidőnövekedés, ha az adott viszonylat fizikailag képtelen kezelni a kapott igényt. A példa esetén, ismerve az M4-es metró vonalán közlekedő Alstom szerelvények kapacitását, egy egyszerűbb számolás után $(200\,000 / 807 \approx 248)$ metró az 1 órás időintervallum alatt, $248 / 60 = 4.133$, vagyis 5 metró percenként) megállapítható, hogy a metrók ebben az esetben fizikailag képtelenek lennének a közlekedésre.

Ezért egy szokatlan modell kidolgozásába kezdtem, amelyben rendhagyó módon direkt figyelmen kívül hagyom az utazási időt, vagyis a közlekedést nem az utazási idő optimalizálása mellett modelleztem. Ehelyett a korábban említett szállítási kapacitást akartam használni azért, hogy egy olyan modellel dolgozzak, amellyel egyszerűen tudom vizsgálni a hálózat fizikai korlátait (lásd. fenti példa). Mivel a szállítási kapacitás mellett nem kívántam mást figyelembe venni, megállapítottam, hogy egy egyszerű, gráfként történő felírása a hálózatnak jó irány lehet, amennyiben a gráf súlyozott, a szállítási kapacitásokkal súlyként.

Fontos észrevétel, hogy a modell használata során az a feltételezés érvényesül, hogy a kapacitáskihasználtság elmehet a fizikai értelemben vett legvégső határig anélkül, hogy bármi negatív

hatása lenne a rendszer hatékonyságára. Ez természetesen a valóságban nem igaz, viszont a probléma esetén elfogadható, hogy eme tényt nem veszem figyelembe, mert a vizsgálat csak a fizikai korlátok megváltozására terjed ki, arra nem, hogy változás esetén hogyan kellene a rendszeren módosítani, hogy kezelni tudja a módosult korlátokat.

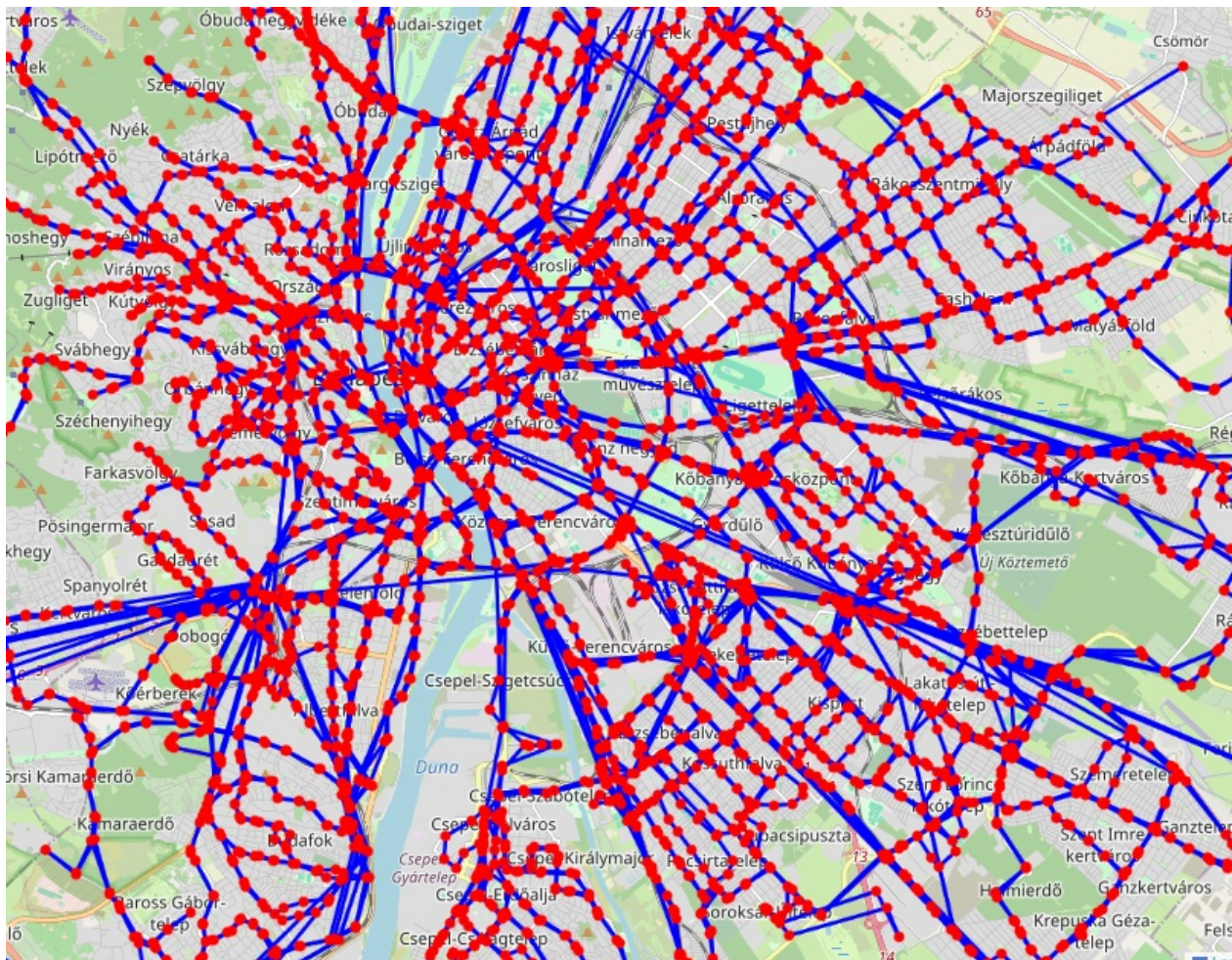
Az volt tehát a célom, hogy a budapesti közösségi közlekedési hálózatot egy elsúlyozott irányított gráfként tudjam felírni, majd ezen gráfot vizsgálva megpróbáljak következtetéseket levonni a hálózat kapcsán.

Ehhez először megvizsgáltam a rendelkezésre álló adatokat: a 3 nagy szolgáltató (BKK, Volán, MÁV) közlekedési adatai nyilvánosan elérhetőek[14] napi lebontásban a GTFS modell szerint, ezek alkotják a modell kiindulópontját. A BKK adatait teljesen felhasználtam, a Volán adataiból csak azon járatok voltak szükségesek, amelyek Budapesten közlekednek. A MÁV esetén viszont szükséges volt egy további lépés a fővárosra való szűrés mellett: csak az elővárosi vonalakhoz tartozó adatokat használtam fel, mivel ahogy az alább olvasható, szükség van az egyes vonalak kapacitás értékeire; az elővárosi vonalakat leszámítva pedig nehézségekbe ütköztem, ugyanis nem csak azt kellett tudni egy viszonylat esetén, hogy hány szerelvény közlekedik ott egy adott órában, hanem azt is, hogy mely szerelvény hány fő befogadására képes. Ez az információ sajnos nem érhető el nyilvánosan, ha egyáltalán elérhető bárhol.

Tehát szükség volt az egyes járművek kapacitására, befogadóképességére; sajnos az adatok nem érhetőek el egyetlen nyilvános (online) adatbázisban, ezért az adatokat több forrásból szereztem be: a Winmenetrend online felületén[15] a legtöbb járat esetén elérhető a jármű típusa, ezen információk alapján a forrásokból összeállítottam egy "adatbázist", amelyben az egyes járatokhoz kapacitásokat rendeltem attól függően, hogy milyen típusú járművek közlekednek az adott vonalon. Ha egy járat nem szerepel az adatbázisban, akkor internetes keresések segítségével a hiányzó adatokat kipótoltam (kivéve persze a MÁV esetén az elővárosi vonalakat leszámítva). Az összeállítás során azon konvenciót követtem, miszerint egy adott vonalhoz az elérhető legmagasabb kapacitásérték tartozzon; vagyis ha egy vonalon több eltérő kapacitású jármű is közlekedik, akkor a legnagyobb férőhelyszámút rendeljük az adott vonalhoz. A fenti adatok segítségével megalkottam az egyes szolgáltatók hálózatait.

Ezt követően a következő szabályok szerint transzformáltam át a hálózatot egy súlyozott gráffá: a gráf csúcsai az egyes megállók, 2 csúcs között pedig akkor fut él, ha a nekik megfelelő 2 meg-

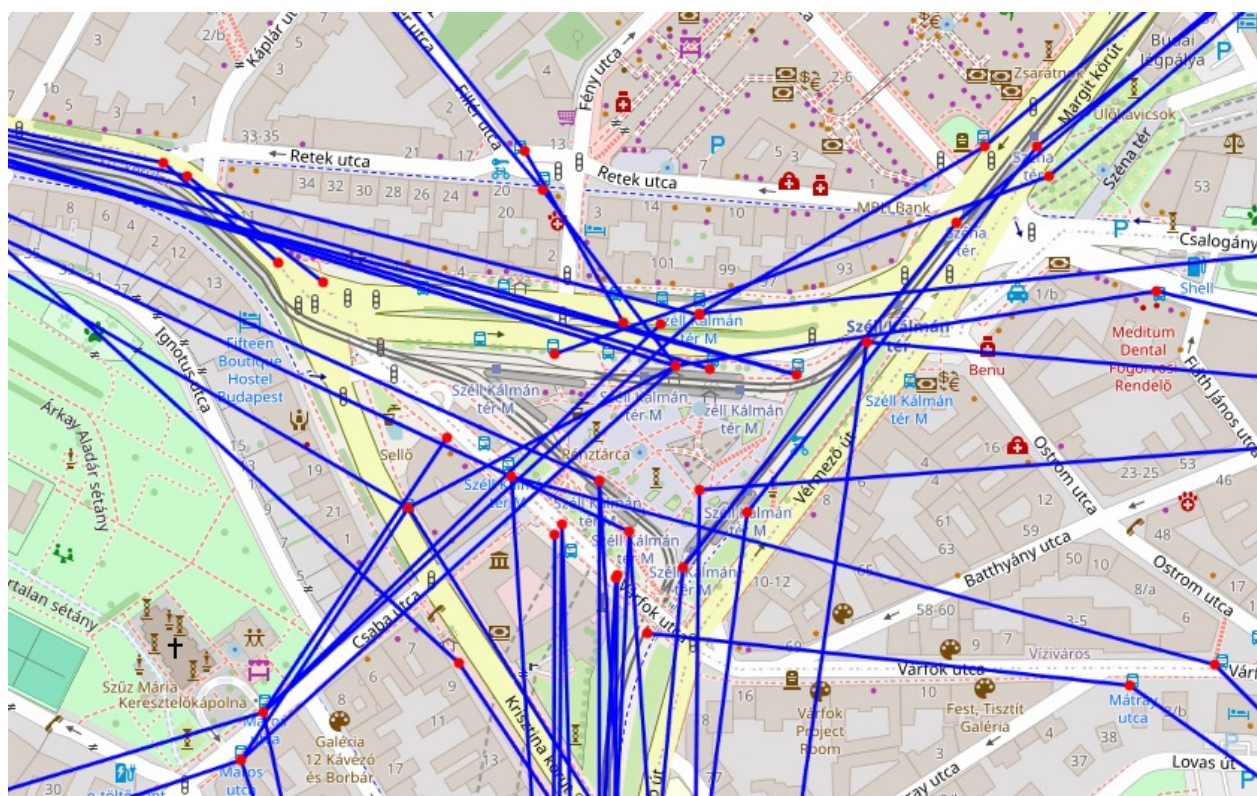
álló között közlekedik valamilyen tömegközlekedési eszköz. Az élek súlyát a (járművek száma * az egyes járművek kapacitása) szorzat adja, majd ezeket összegeztem az adott viszonylatra járat szerint; tehát a végeredmény a hálózathoz tartozó irányított gráf, ahol az éleken a csúcsok között fellépő összes kapacitás található meg (egy adott időintervallumon értelmezve, hiszen a járművek száma időfüggő). A transzformációt elvégeztem a 3 szolgáltató esetén, a gráfok unióját véve megkaptam a "nagy" gráfot, amelyhez már a tényleges budapesti közösségi közlekedési hálózat tartozott.



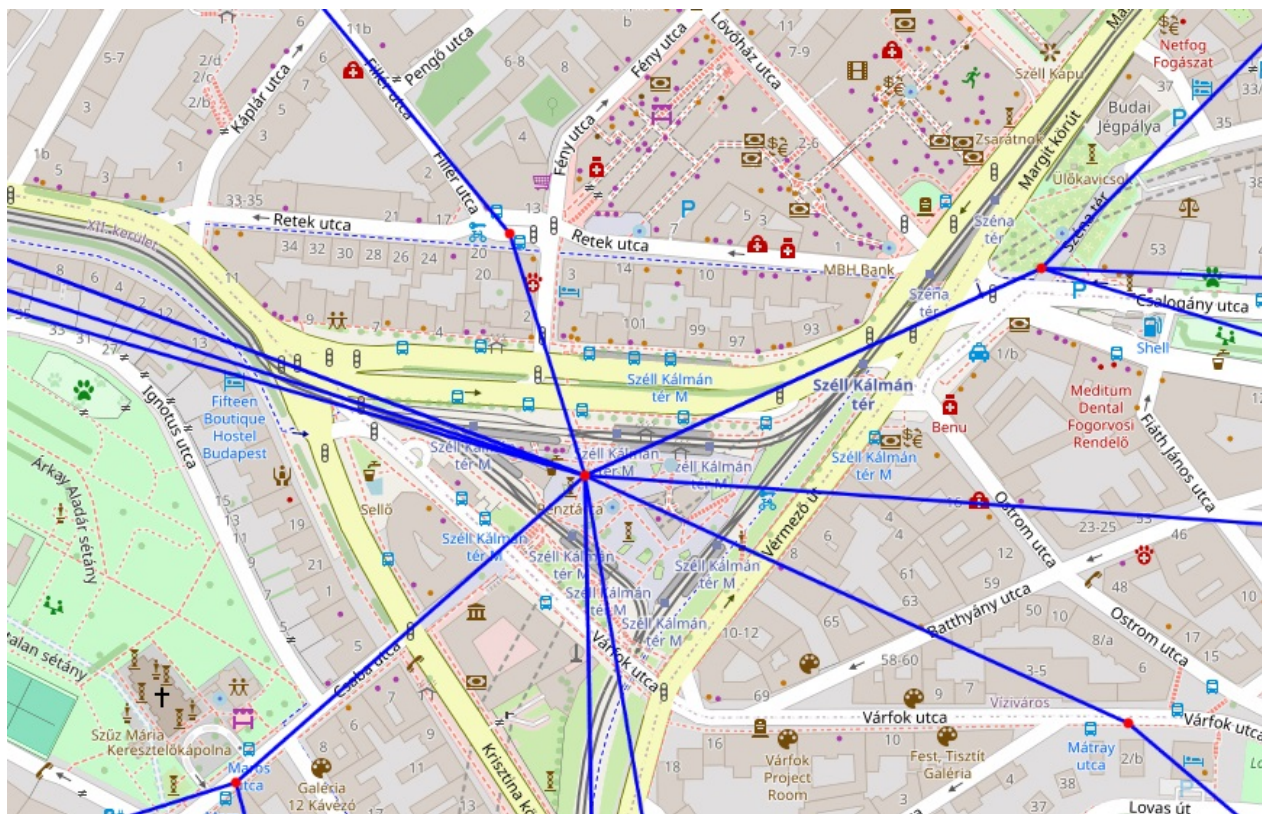
7. ábra. A hálózathoz tartozó gráf

Ezt a gráfot jelen állapotában 3 gráf (diszjunkt) uniója alkotta és mivel a GTFS adatok az egyes megállókhöz pontos koordinátákat rendelnek (kivéve MÁV), ebben a pillanatban nem tudtam volna modellezni az átszállást például metróról vasútra. Ezért módosítani kellett a gráfot, mégpedig oly módon, hogy az "azonos helyekhez tartozó csúcsokat" összevontam; másképp fogalmazva, nem

megállóhelyeket kívántam csúcsként kezelni, hanem gócpontokat (például a Széll Kálmán téren – ahogy az a 8. és 9. ábrákon látható majd – számos megálló található, de ezeket egy csúcsba szerettem volna összevonni). Az összevonást a következő módon végeztem: feltettem, hogy (közel) azonos nevű megállók tartoznak egy góchoz, feltéve, hogy elég közel vannak egymáshoz. Ezért a megállókats megszürtém a neveik szerint, majd csoportosítottam őket szintén név szerint. Ezután a csoportokon belül tovább csoportosítottam az egymástól vett távolságok szerint: egy (al)csoportba olyan megállók kerültek, amelyeknek nem csupán azonos a (megszűrt) nevük, hanem az egymástól vett távolságuk kisebb, mint egy adott threshold, a mi esetünkben ez 1 km. Ez azért szükséges, mert előfordulhat, hogy azonos nevű megállók találhatók Budapest különböző kerületeiben. Az egyes alcsoportokra kiszámítottam egy átlag koordinátát, innentől ez tartozott az alcsoport elemeihez. A módosított koordinátákat az eredeti csúcsokhoz rendelve felírtam az új gráfot.



8. ábra. A Széll Kálmán tér összevonás előtt



9. ábra. A Széll Kálmán tér összevonás után

Fontos megemlíteni, hogy a megállóhelyek gócponttá való összevonására nem a legegyszerűbb és legjobb megoldást választottam. Ugyanakkor létezik alternatíva: ahogy az a BKK Futár alkalmazásból kiderül, a BKK rendelkezik adatokkal a városban elhelyezkedő gócpontokról; sajnos ez az adat nem szerepel a nyilvános GTFS adatok között, ezért kényszerültem egy alternatív megoldás használatára.

Ezt követően meghatároztam, hogy a megállók mely forgalmi körzetben vannak, majd összeállítottam egy "OD mátrixot" aszerint, hogy a gráf élei mely forgalmi körzetről mely forgalmi körzetbe mentek. A mátrix sorait és oszlopait a diagonális elemek (azaz a zónán belüli "közvetlen" kapacitások) kivételével felösszegeztem, megkapva az egyes zónákhoz tartozó aggregált bemenő és kimenő kapacitás értékeket. Ezeket a kapott EFM modellen alapuló OD igénymátrix megfelelő elemeivel hasonlítottam össze; az OD igénymátrix adott mind a közösségi közlekedés, mind a személygépjármű forgalom részére napi adatokkal. Az összehasonlítás során 2 esetet vizsgáltam:

- Milyen viszonyban állnak a közösségi közlekedési OD mátrixból vett aggregált értékek és a becsült kapacitás (arány és különbség).

- Az első pontot ezután úgy módosítottam, hogy a közösségi közlekedési OD mátrix értékeihez hozzáadtam a személygépjármű forgalom OD értékeit.

Ezután a gráfon futtattam a módosított Dijkstra algoritmust, amellyel megkaptam bármely 2 csúcs között a legnagyobb kapacitású utat (ezért kellett a gráfot módosítani, az eredeti gráfon ugyanis ezt nem lehet megtenni a diszjunktság miatt). Az utak kezdő- és végpontjaira meghatároztam, hogy mely zónákban helyezkednek el, majd minden út esetén megállapítottam a végpontoknak megfelelő igény értéket, ezt az út minden csúcsához hozzáadtam. A folyamat végén tehát minden csúcsra adott, hogy mi az a maximális igény, aminek a csúcson keresztül kell haladnia. Az igények mellett bemeneti és kimeneti kapacitásokat határoztam meg az egyes megállókra; bemeneti kapacitás alatt az adott megállóba beérkező járművek összkapacitását értjük, kimeneti kapacitás alatt ugyanezt, csak a megállót elhagyó járművekkel.

Ezen 2 érték ismeretében a zónaszintű vizsgálathoz hasonló elemzést végeztem megállósinten:

- Vizsgáltam a bemeneti/kimeneti kapacitás és az igény arányát és különbségét, továbbá utóbbi esetben a gráf segítségével visszakövettem, hogy mely megálló kapacitása negatív és meghatároztam az ezeken keresztülhaladó járatokat.
- Ezt elvégeztem mind magára a közösségi közlekedési adatokra, mind a személygépjármű forgalommal megnövelt adatokra.

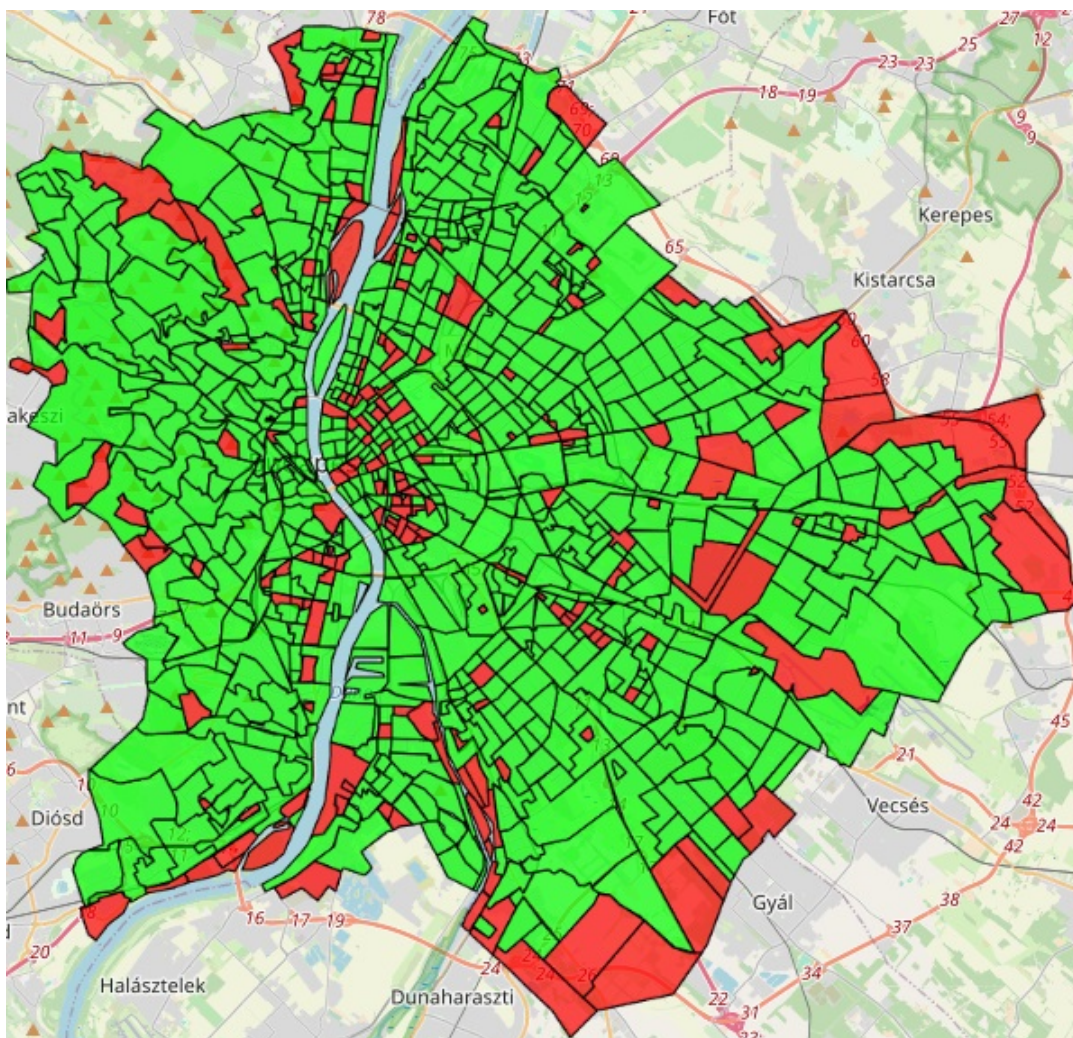
A folyamatot a gráffá transzformálással bezárólag az alábbi specifikációk mellett hajtottam végre:

- Az adatok 2024.09.06-áról származnak.
- Időtartamnak a reggel 6 és 7 óra közötti időszakot adtam meg azért, hogy ne legyen nagy a program futási ideje; természetesen tetszőleges időintervallumokra működik a módszer.
- Mivel ez az időintervallum a reggeli csúcsidőszakba esik, ezért az igénymátrix értékeit előbb le kell osztani 24-gyel, mivel napi értékekről van szó, majd szorozni 1.1-del $\omega = 10\%$ -os csúcsidőtényezőt feltételezve [16].
- A személygépjármű forgalmi igénymátrix nem az utazói igényt tartalmazza, hanem a megfelelő zónák között haladó autók számát; ezért az adatokat be kell szorozni az egy autót átlagosan használó utasok számával, ami 1.5 [17].

4. Eredmények és kiértékelésük

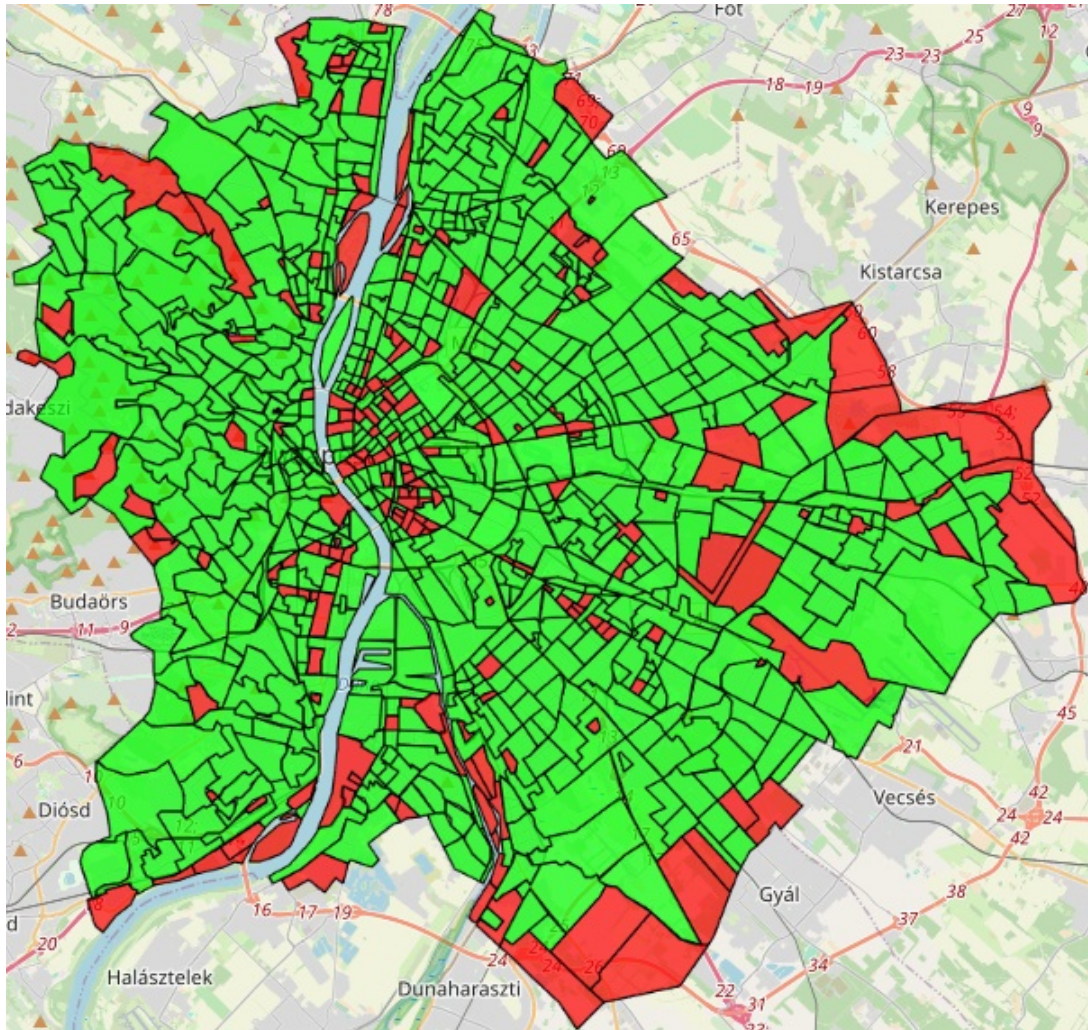
Először ábrázoltam a közösségi közlekedési OD mátrixból vett aggregált (zónaszintű) értékek és a (zónaszintű) becsült kapacitás arányát a következő színkódolás segítségével (a kimenő oldalt figyelembe véve, ez a további ábrák esetén is így lesz, a bemenő oldal ábrái megtalálhatóak a mellékletben (A)):

- Zöld színnel jelöltem azokat a zónákat, ahol az arány kisebb, mint 1, vagyis ott van szabad kapacitás.
- Piros színnel jelöltem azokat a zónákat, ahol az arány nagyobb, mint 1, vagyis ott a hálózat túlterhelt.



10. ábra. Az igény és a becsült kapacitás aránya az egyes zónák esetén

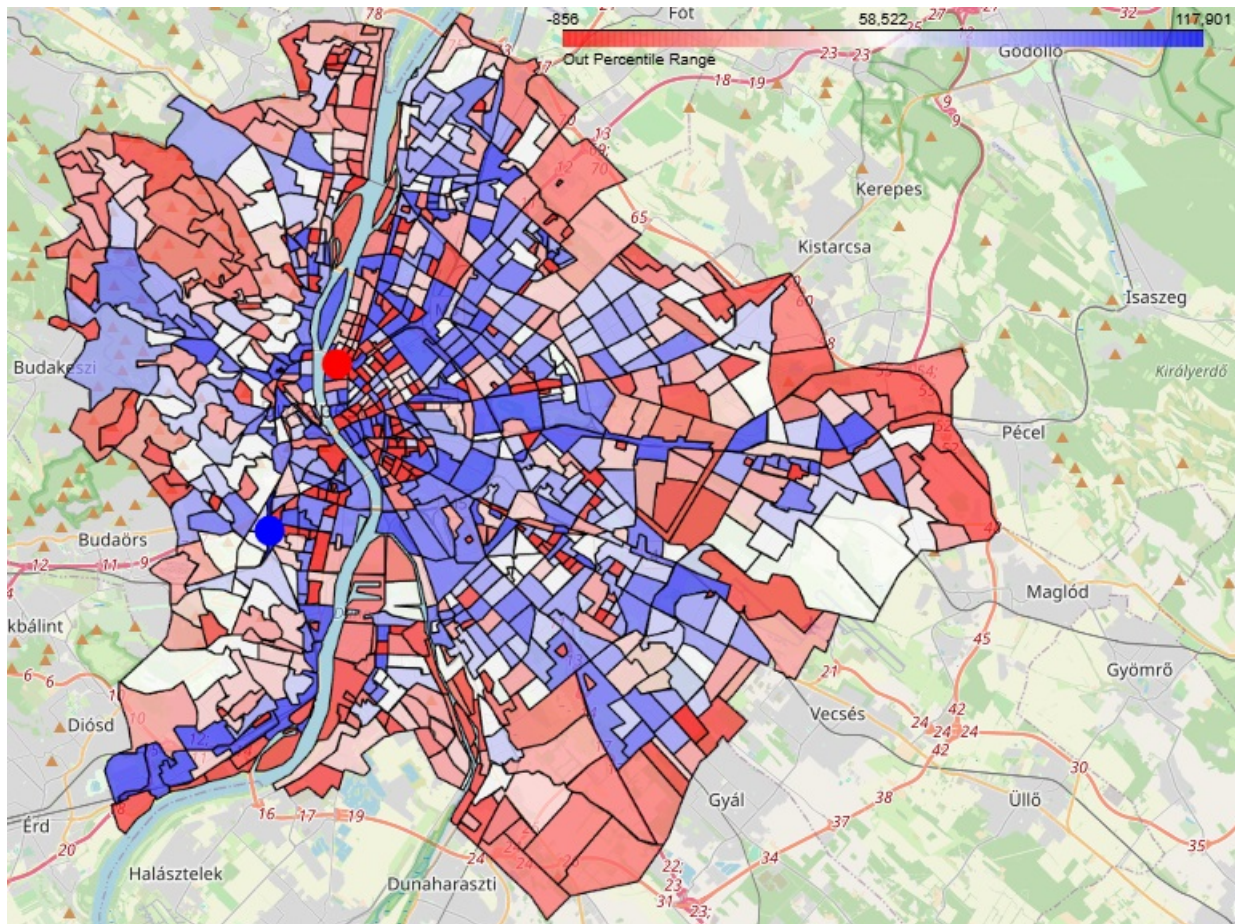
Ezt követően megfigyeltem a teljes személygépjármű forgalommal megnövelt ábrát:



11. ábra. A megnövelt igény és a becsült kapacitás aránya az egyes zónák esetén

A 10. és 11. ábra alapján megállapítható, hogy a jelenlegi közösségi közlekedési rendszer a legtöbb zónában képes lenne kezelni a megnövekedett forgalmat (az aggregált adatok szerint).

Azért, hogy pontosabb képet kapjak a látottakról, áttértem a különbségek vizsgálatára. A különbségek vizsgálatához 2 ábrát készítettem, az elsőt a különbség értékeket 10 percentilisenként csoportosítottam, az azonos csoportba eső értékeknek megfelelő zónák azonos színt kaptak. A (minél inkább) negatív értékeket pirossal, a (minél inkább) pozitív értékeket kékkel jelöltem, valamint a 2 szélsőértékhez, a minimumhoz és a maximumhoz tartozó zónák fölé egy nekik megfelelő színű pontot emeltem:



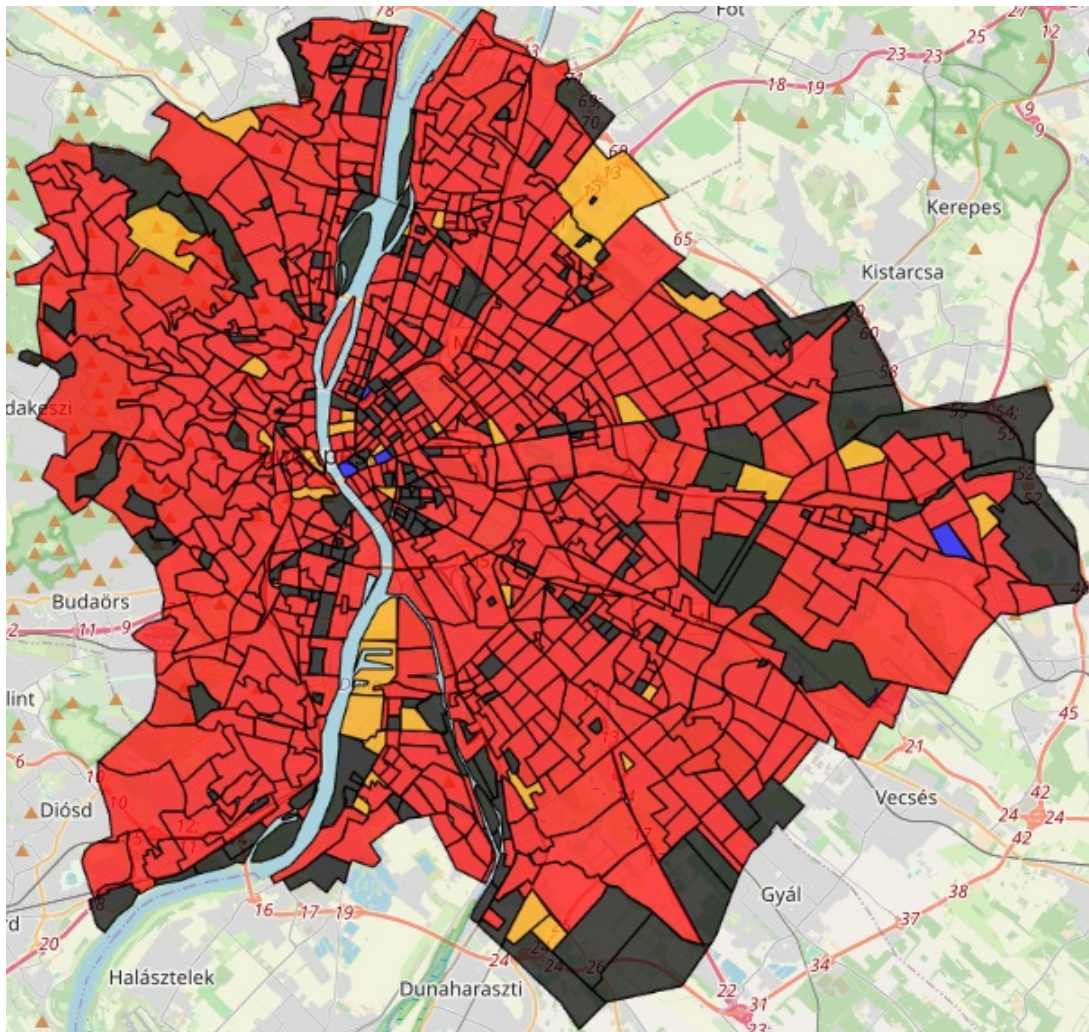
12. ábra. Zónák percentilisenként a minimális és maximális értékkel

A 12. ábra szerint az alacsony percentilisekhez tartozó zónák többsége (a 10. ábrának nem ellentmondva) a város központjában, valamint a város peremén találhatóak.

A másodikhoz létrehoztam egy intervallumokon alapuló rendszert, amiben az egyes zónákat kategorizáltam és színekkel jelöltem aszerint, hogy a hozzájuk tartozó érték mely intervallumba esik. A szín és érték kategóriák a következők:

- Lila, ha az érték kisebb -450-nél.
- Kék, ha $-450 < \text{érték} < 0$.
- Sárga, ha $= 0$ (nem valószínű, hogy ez előfordulna a gyakorlatban).
- Narancssárga, ha $0 < \text{érték} < 450$.
- Piros, ha több 450-nél.

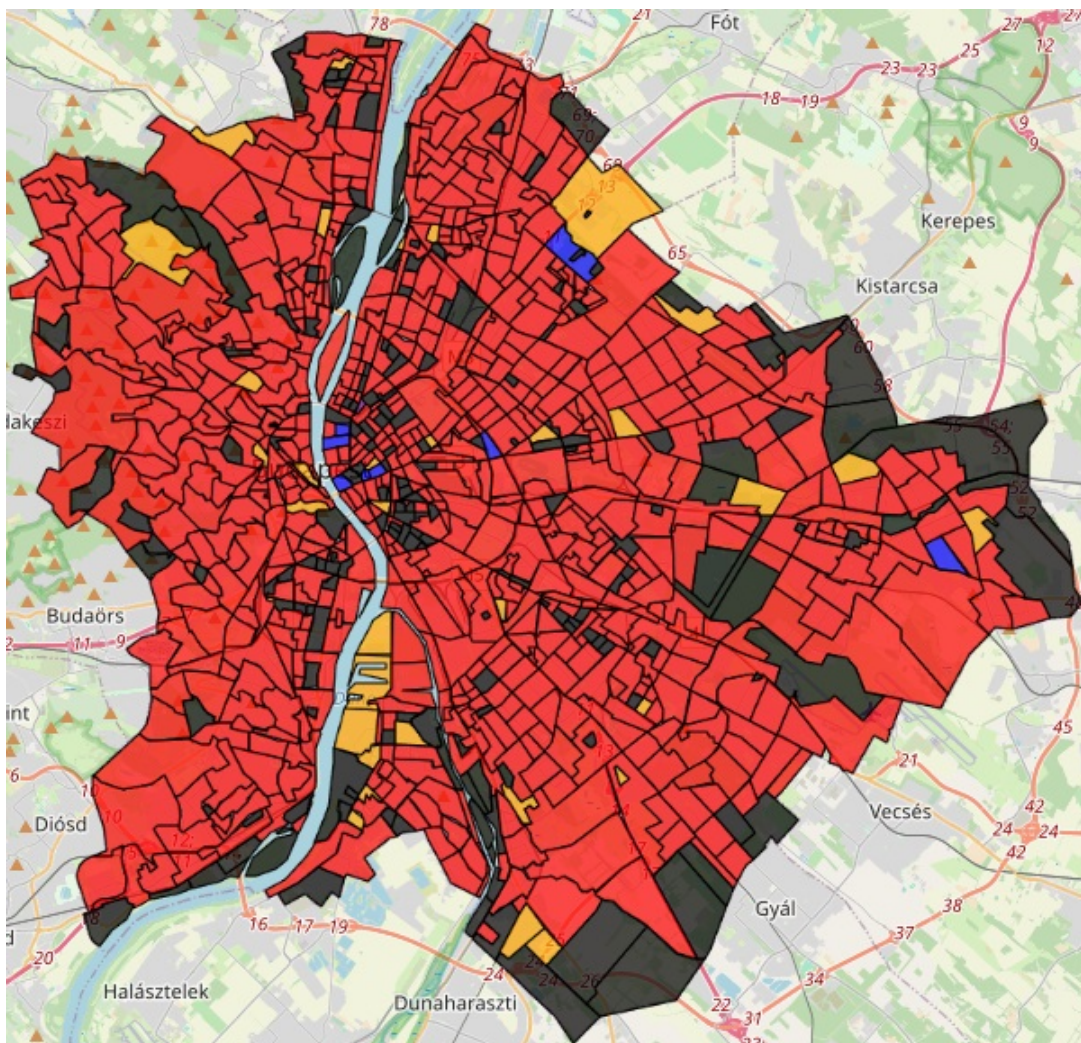
- Fekete, ha az adott zónából/zónába nem vezet út, azaz közösségi közlekedéssel nem elérhető.



13. ábra. Zónák terhelés előtt

Azért ± 450 -es intervallumhatárral dolgoztam, mivel ez a szám ~ 3 csuklós vagy ~ 4 sima autóbusz kapacitásának felel meg; tehát esetlegesen könnyen bővíthető vele a rendszer.

Az utóbbi ábrát érdemes megnézni a személygépjármű forgalommal terhelt esetre is:

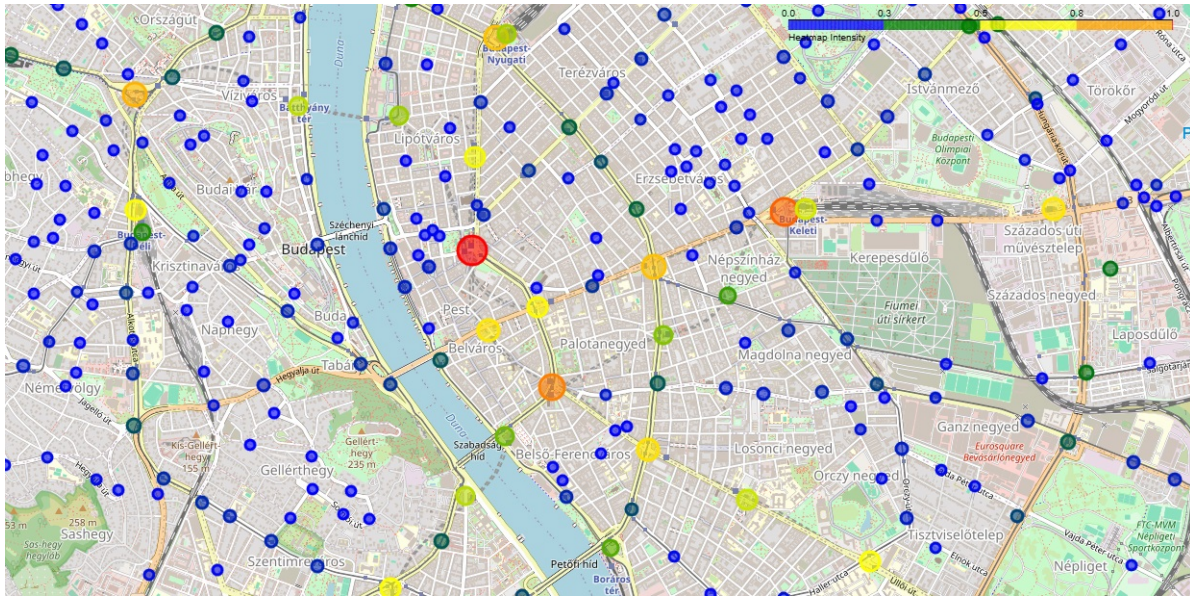


14. ábra. Zónák terhelés után

A 13. és 14. ábra alapján jól látható, hogy vannak olyan zónák, amelyek nem elérhetőek közösségi közlekedéssel. Ide tartoznak például speciális esetként a bevásárlóközpontok. Ez nem baj, mivel az EFM modellben a bevásárlóközpontok külön zónát képeznek, ezért még ha van is hozzájuk telepítve valamilyen közösségi közlekedési eszköz, az nem a zónájukhoz fog tartozni, hanem egy szomszédos zónába. Ezért ezekkel nem kell törődni, azzal viszont igen, hogy a szomszédos zóna kapacitása elég legyen a bevásárlóközpontnak is. Ha egy zóna lila vagy kék színnel rendelkezik, az utal a negatív kimenő kapacitáskülönbségre. Ebben az esetben a zóna további vizsgálata nem szükséges, hiszen a megállónkénti vizsgálathoz a pozitív aggregált kapacitáskülönbség szükségeltetik.

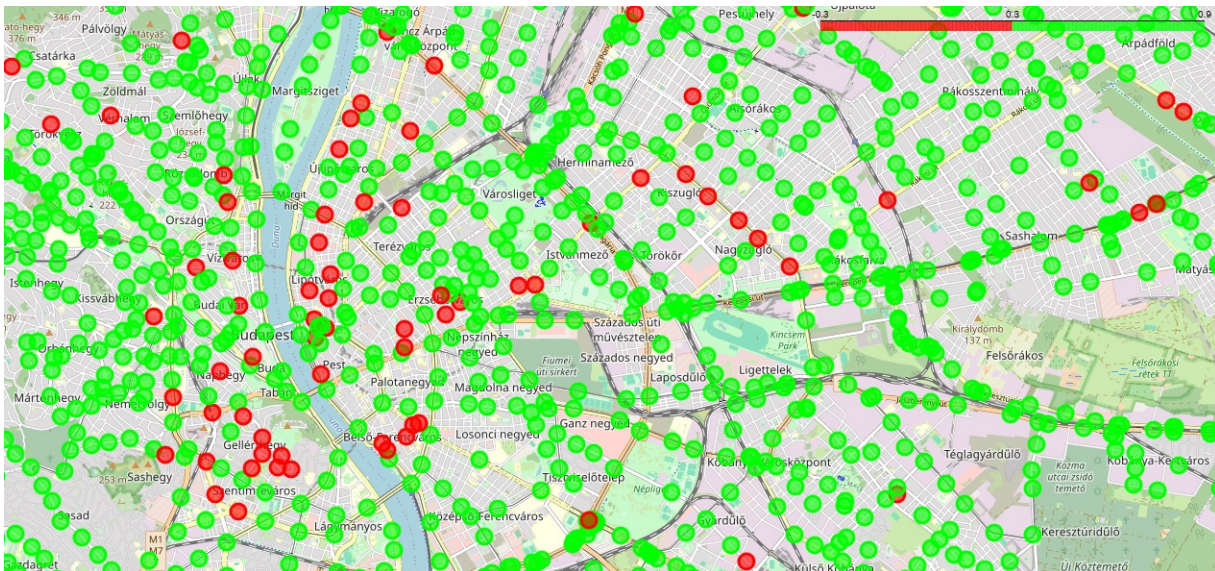
Ezek után rátérhettem az egyes megállók kimenő kapacitásának vizsgálatára, alább a kimenő

kapacitásokat ábrázoltam egy hő térkép jellegű ábrán:



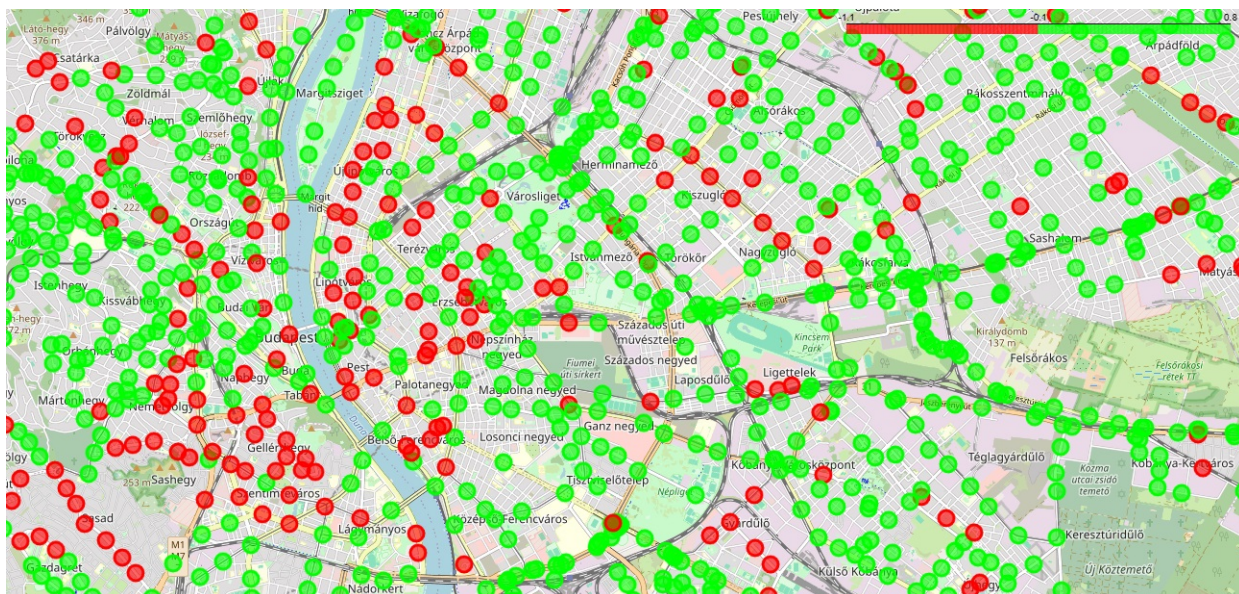
15. ábra. Az egyes megállók kimenő kapacitásai

Ezen kapacitásokból kivontam az egyes csúcsokon fellépő maximális igényt, majd egy, az árnyok vizsgálatához hasonló ábrát készítettem (tehát zölddel jelöltem a pozitív, pirossal a negatív kapacitáskülönbséget):



16. ábra. Az kimenő kapacitáskülönbségek terhelés előtt

Továbbá az ábrát az autós forgalommal terhelt esetre is megcsináltam:



17. ábra. Az kimenő kapacitáskülönbségek terhelés után

A 16. és 17. ábrából az alábbi következtetéseket vontam le: az összesen 2776 csúcsból (góc-pont) az első esetben 200 negatív csúcsot figyeltem meg, többségük a belvárosban, a XVII. és XXI. kerületekben helyezkedik el. Megfigyelhető, hogy bizonyos vonalak mentén különösen sok ilyen csúcs található: a 15, 27, 71, 98, 98E, 152 és 198 jelzésű autóbuszok által meghatározott 4 vonal jól kivehető.

A bővített esetben már nem ennyire egyszerű a helyzet: a negatív kapacitású csúcsok száma 200-ról 500-ra emelkedett. Ezek továbbra is a fenti városrészekre koncentrálódtak, viszont jóval nagyobb arányban, mint a megelőző esetben. Ezen felül nagyobb negatív csoportok jelentek meg a XXII. kerület Budafoki részén, a XX. és XXIII. kerületekben és a XVIII. kerület lakótelepein. Újabb negatív vonalak is előkerültek, mint például az Üllői út, a Sasadi út vagy a Nagy Lajos király útja mentén; ezzel számos új járatot az előzőekhez csatolva.

Ezután azt vizsgáltam meg, hogy mely vonalak haladnak át negatív kapacitáskülönbségű csúcs, az alábbi táblázat ezt mutatja:

3. táblázat: Vonalak negatív kapacitáskülönbségű csúcsokon

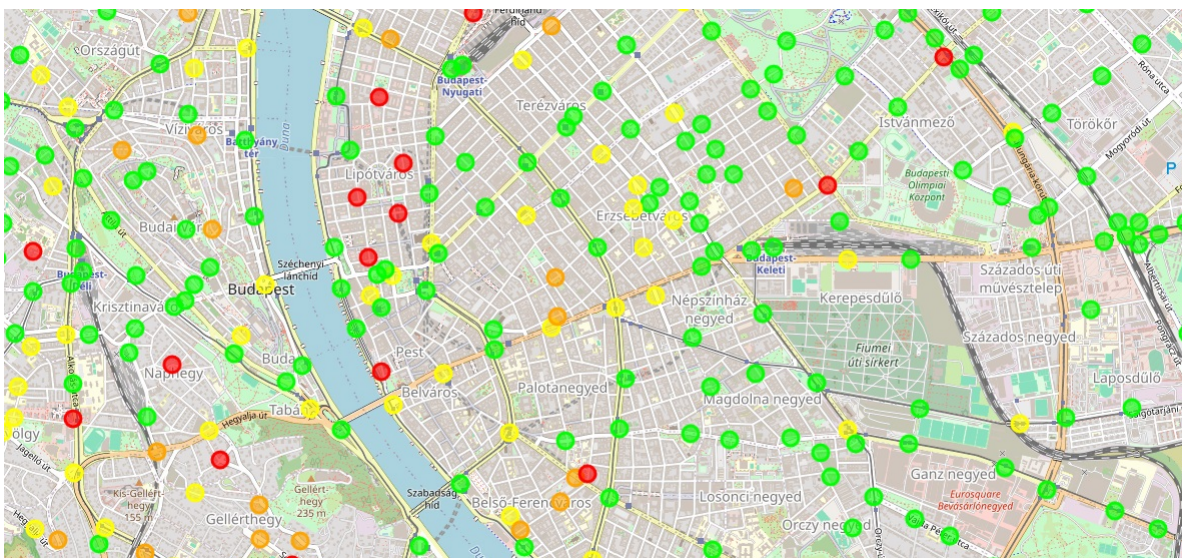
Szolgáltató		A közösségi közlekedés önmagában	Személygépjármű forgalommal való bővítés után
BKK	Busz	5,7,7E,8E,11,15,16,16A,27,29,30,30A,32,34,35,36,39,44,45,46,53,58,65,66B,66E,67,68,71,85,85E,87,91,93,93A,97E,98,98E,99,100E,106,108E,110,111,112,114,120,123A,124,125,125B,128,129,130,133E,134,137,139,140,140A,146,146A,147,148,149,150,150B,151,152,154,155,159,161,161A,161E,165,166,168E,169E,170,174,175,176E,178,181,184,185,191,194B,195,198,200E,202E,204,212,212A,212B,214,217,217E,219,221,224,224E,225,231,236A,237,244,260,261E,262,268,269,275,276E,277,284E,291,296,297,298	5,7,7E,8E,9,10,11,15,16,16A,20E,25,26,27,29,30,30A,31,32,33,33A,34,35,36,39,44,45,46,53,54,55,58,65,65A,66,66B,66E,67,68,71,77,85,85E,87,91,92,92A,93,93A,95,96,97E,98,98E,99,100E,102,104A,105,106,107,108E,110,111,112,114,117,118,119,120,123A,124,125,125B,126,128,129,130,131,132E,133E,134,135,136,137,139,140,140A,141,142E,144,146,146A,147,148,149,150,150B,151,152,153,154,155,158,159,160,161,161A,161E,165,166,168E,169E,170,174,175,176E,178,179,181,182,182A,183,184,185,187,191,193E,194,194B,195,196,196A,197,198,200E,202E,204,210,212,212A,212B,213,214,217,217E,219,220,221,223E,224,224E,225,231,236A,237,240,244,250,250B,251A,251E,254E,255E,260,261E,262,266,268,269,275,276E,277,282E,284E,291,296,297,298
	Villamos	1,1A,2B,3,17,42,52,61,62,62A,69	1,1A,2,2B,3,4,6,14,17,19,23,24,28A,37,37A,41,42,47,49,50,51,51A,52,56,56A,59,61,62,62A,69

	Troli	72,73,74,74A,75,76,77,79,80,82,82A,83	70,72,73,74,74A,75,76,78,79,80,81,82,82A,83
	Metró		M1,M2,M3,M4
	Hév		H5,H7
	Egyéb	60	60
VOLÁN		300,314,318,400,410,411,480,505,575,576,578,580,608,616,630,631,635,636,650,656,673,674,676,689,690,700,710,725,760,789,795,800,830,872,880,1115,1120	300,308,310,314,315,316,318,319,321,400,410,411,480,484,505,575,576,578,580,608,616,630,631,635,636,650,656,673,674,676,689,690,700,710,720,722,725,760,789,795,800,830,872,880,1115,1120
MÁV		S50,Z50,S60,S80	S21,G43,S50,Z50,S60,S80

A táblázat fontos felismeréssel szolgál: a személygépjármű forgalom ráterhelése után a nagyobb kapacitású vonalakon (egyes vonatok, a 4 metró) megjelentek a negatív kapacitások. A vasút esetén viszont meg kell jegyezni, hogy csak az elővárosi vonalak vannak figyelembe véve, emiatt elképzelhető, hogy a vasúti érintettségű megállók amúgy nem negatív kapacitásúak.

A 17. ábrán úgy módosítottam, hogy az egyes csúcsok esetén nem különbséget néztem, hanem a $\frac{\text{kalkulált igény}}{\text{csúcs kapacitása}}$ arányt; majd egy, a 14. ábrához hasonló, intervallum szerint színezett ábrát készítettem az alábbiak szerint:

- Egy megálló zöld színt kapott, ha az arány 0 és 1 közötti, vagyis a megállóban szabad kapacitás lépne fel.
- Sárgát, ha az arány 1 és 2 közötti.
- Narancssárgát, ha 2 és 4 közötti.
- Pirosat, ha 4 feletti az arány.



18. ábra. Az egyes megállók igény/kapacitás arányai

A 18. ábra segítségével elkészítettem az alábbi táblázatot, amely az 5 legnagyobb és legkisebb átlagos kapacitással rendelkező vonalat tartalmazza:

Maximális arány		Minimális arány	
Járat	Arány	Járat	Arány
67	3.49	280	0.00001
98E	3.31	Z60	0.0013
27	3.22	S40	0.0028
152	2.49	S42	0.0028
261E	2.42	Z30	0.0039

4. táblázat. Vonalak minimális és maximális átlagos arányokkal

2 fontos következtetést tudtam levonni a táblázatból: a maximális arányok ismerős vonalakon jelentkeztek, a 17. ábránál pont ezen vonalakat figyeltem meg az ábrából. A minimális arányú vonalakat nézve pedig feltűnhet, hogy az 5 vonalból 4 vasút, ez utal a vasúti közlekedésben jelenleg is meglévő hatalmas szabad kapacitásokra. Meg kell említenem viszont, hogy nem vettem figyelembe a 0 és a ∞ értékeket, 0 akkor lehet egy arány, ha nincs fellépő igény; ∞ pedig akkor, ha nincs kapacitás, másképp fogalmazva, ha az adott időintervallumban nem közlekedik semmilyen jármű az adott megállón keresztül.

Ezen kívül feltűnő, hogy a minimális arányok, bár nem egyenlőek 0-val (mert kikötöttem), mégis igen közel vannak a 0-hoz. Ez utalhat arra, hogy más vonalak elvonják tőlük a forgalmat.

Az 5 felsorolt vonalból csupán egyetlen nem vasút, a másik 4 az. A 280-as autóbusz a szigetszentmiklósi Auchan áruház és Szigetszentmiklós között közlekedik, de mivel nem megy be a fővárosba, legalább Csepel központjáig, nem lehet arról beszélni, hogy a járat elől más elvenné a forgalmat. Egyszerűen a vonal egyetlen igény kielégítésére alkalmas: tömegközlekedéssel el lehet érni vele Szigetszentmiklós felől az Auchant. Ez az igény viszont kicsi, mivel egy nagy bevásárlóközpontba, ami ráadásul félreeső helyen van, az emberek a személygépjárművel való eljutást preferálják praktikus okokból (nem a buszon kell cipekedni, ha sokat vásárol az ember; gyorsabb; stb.). Épp ezért a vonal véleményem szerint kiváltható lenne a VOLÁN közreműködésével, konkrétan nem a bekötő útnál kellene a VOLÁN járatainak megállniuk, hanem behajtani az áruházakig. Ezzel a lépéssel nem csupán a 280-as vonalat lehet "kiküszöbölni", hanem a 38,38A,138 és 238-as vonalakról is terhet lehetne levenni (nem kellene mindnek a bevásárlóközponthoz behajtania).

A vasútvonalakra áttérve a 4-ből 3 a Déli pályaudvarról közlekedik Dél-Buda irányába, a maradék 1 pedig a Keleti pályaudvarról a XVII. kerület irányába. A Z60-as vonal esetén arra tudok következtetni, hogy a XVII. kerület vasúttal történő elérése helyett az emberek a belvárosból a metrót használják, onnan pedig buszra szállnak, amelyek viszont túlterheltek lennének a rendelkezésre álló adatok alapján; szóval egy módváltás esetén a vasút jó alternatíva lenne Rákoskeresztúr irányába. A másik 3 vonal esetén nem túl sok következik az adatokból, a vasutat keresztező vonalak között nem szerepel annyira túlterhelt, ami magyarázná a vasút szabad kapacitásait, ráadásul a vonalak irányában (Budafok, Nagytétény) a hálózat terheltsége megfelelőnek mondható még a teljes személygépjármű forgalommal való terhelés után is.

5. Konklúzió, a projekt folytatásának lehetőségei

A dolgozat során egy irányított gráfként vizsgáltam a budapesti közösségi közlekedési hálózat kapacitását és annak potenciális reakcióját arra az esetre, ha a személygépjárművet használók közösségi közlekedésre váltanának; azon belül is egy hipotetikus esetet vizsgáltam, amikor "minden autó eltűnik". Ez egy eléggé extrém és még inkább valószínűtlen eset. Azonban egy kérdésre, amely a gyakorlatban nagyobb valószínűséggel fordul elő, az eredmények alapján választ lehetne adni: hogyan változna a kapacitáskihasználás, ha fokozatosan történne a módváltás. Amennyiben a személygépjármű forgalomnak csak egy részével lenne megnövelve a közösségi közlekedés, az aggregált szinten nem okozna problémát: a bemutatott 11. és 14. ábrák szerint a teljes ráterheléssel is elbírna a jelenlegi rendszer. Az igazi kérdés a megállók szintjén lép fel, ugyanis a 17. ábra szerint a megállók kb. ötöde negatív kapacitással rendelkezne, ami soknak mondható. Viszont ha csak részleges személygépjármű forgalommal történne a bővítés, a teljes bővítéssel való adatok ismeretében egy jól követhető módszer rajzolódik ki, amely lehetővé tenné egy jó becslést a személygépjármű forgalommal történő részleges bővítés esetén. Ennek segítségével pedig könnyebb lenne az esetleges részleges átállást végrehajtani.

A 4. táblázat eredményei függenek a forgalom szétoztásától. Én a dolgozatban egy olyan modellt választottam (2.4.2), amely nem teljesen valószerű, ellenben jó kiindulópontja lehet egy valós modellnek. A bemutatott módszer egyszerű implementálhatósága miatt ez az esetleges realisztikusabb megközelítés könnyen megvalósítható; tehát annak ellenére, hogy most egy kevésbé valószerű modellt használtam, a módszer alkalmas egy város közösségi közlekedési rendszerének feltérképezésére, adatok kinyerésére a rendszerből és azok elemzésére.

A fentiek figyelembe vétele mellett a végső konklúzióm az, hogy Budapest a teljes módváltást nem tudná teljes mértékben jól kezelni, a megállók mintegy ötödén lépne fel kapacitáshiány. Ez kiváltképp a város központjában és a XVII. kerületben okozna gondot, tehát véleményem szerint amennyiben a városvezetés vagy bárki más a teljes módváltás mellett döntene, akkor a folyamat során erre a két városrészre kellene fókuszálni. Továbbá megvalósítás esetén érdemes lenne a fent bemutatott módszert felhasználni és annak eredményeit figyelembe venni.

A dolgozatban felvetett kérdések és elemzések további kutatásokat indokolnak. Véleményem szerint az alábbi irányokban lenne érdemes folytatni a munkát:

- Vonalkapacitások pontosítása – a kapacitások becsléseken alapulnak, egy vonalon több különböző jármű is előfordulhat. Ha a valós idejű adatok tartalmaznák legalább a jármű típusát, az elkészített kapacitás táblázatok, ezáltal a kapott eredmények is realisztikusabbak lennének.
- A forgalom szétoztásánál nem épp a legrealisztikusabb megközelítést választottam, egy másik, valósabb modell hasznosabb lehet.
- Érdekes kérdés még, ha nem csak a fővárost vizsgáljuk ily módon, hanem annak vonzáskörzetét is. A szolgáltatók rendelkeznek hozzá adatokkal, valamint az EFM is tudja kezelni a helyzetet.

A fenti kutatási irányok további fontos kérdésekre adhatnak választ, és hozzájárulhatnak ahhoz, hogy Budapest közlekedési rendszere fenntarthatóbbá, hatékonyabbá és környezetbarátabbá váljon.

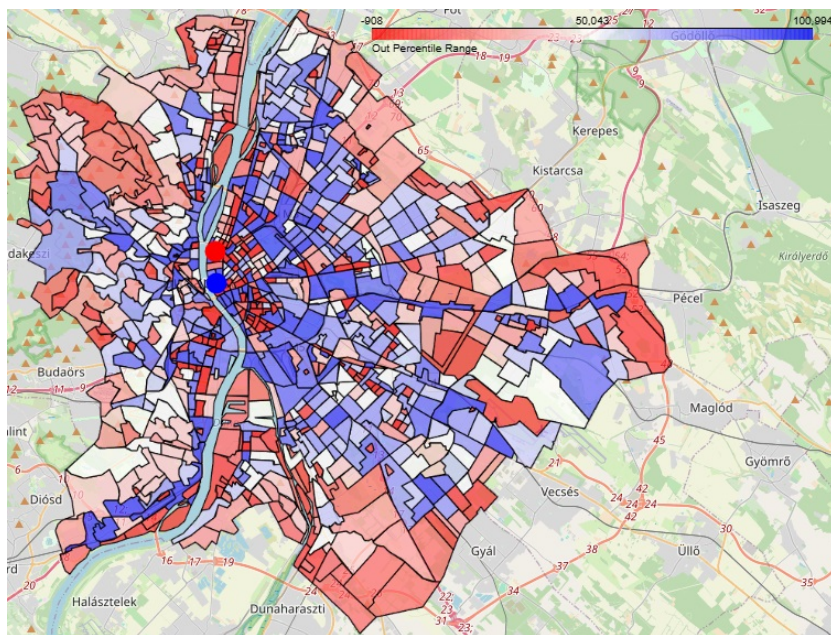
Hivatkozások

- [1] *Modal split of air, sea and inland passenger transport dataset*. Weboldal. Látogatás ideje: 2024.10.23. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TRAN_HV_MS_PSMOD/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=e7430874-7fb5-4d77-8bed-0ce3fbc7f58e&page=time:2021.
- [2] Anne Aguiléra; Jean Grébert. “Passenger transport mode share in cities: exploration of actual and future trends with a worldwide survey”. *International Journal of Automotive Technology and Management*, 14(3-4) (2014), 203–216. old.
- [3] Boldrini C.; Bruno R.; Laarabi M. H. “Weak signals in the mobility landscape: car sharing in ten European cities”. *EPJ Data Science*, 8(1), 7. (2019).
- [4] Mayor of London. *Travel in London - Report 9*. Látogatás ideje: 2024.10.23. 2016. URL: <https://content.tfl.gov.uk/travel-in-london-report-9.pdf>.
- [5] BKK. *Budapesti Mobilitási Terv 2030 - Monitoring és értékelési rendszer*. Látogatás ideje: 2024.10.23. 2023. URL: <https://bkk.hu/downloads/24495/>.
- [6] BKK. *A fenntartható mobilitástervezés monitoring és értékelési rendszerének kialakítása Budapesten*. Látogatás ideje: 2024.10.23. 2019. URL: <https://bkk.hu/downloads/5522/>.
- [7] BKK. *Egységes Forgalmi Modell (EFM) - Modellezési és használati útmutató*.
- [8] *General Transit Feed Specification (GTFS)*. Weboldal. Látogatás ideje: 2024.10.23. URL: <https://gtfs.org/documentation/overview/>.
- [9] Michael G. McNally. “The four step model. UC Irvine: Center for activity systems analysis”. *Dept. Civil Environ. Eng., Inst. Transp. Stud., Univ. California, Irvine, CA, USA, Tech. Rep.* (2000).
- [10] Bayes Ahmed. “The Traditional Four Steps Transportation Modeling Using Simplified Transport Network: A Case Study of Dhaka City, Bangladesh”. *Int. J. Adv. Sci. Eng. Technol. Res.*, vol. 1, no. 1 (2012), 19–40. old.

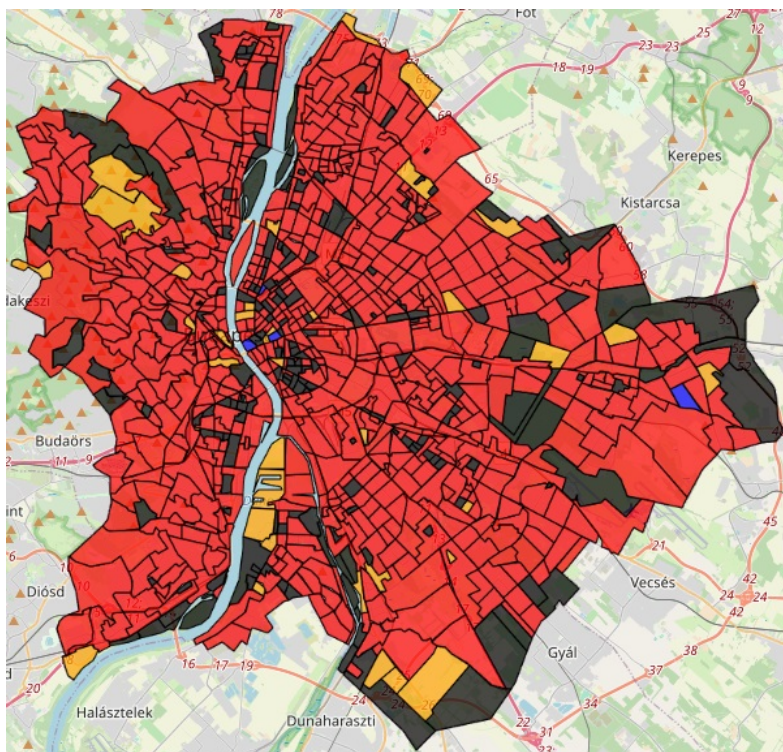
- [11] Tom V. Mathew és K V Krishna Rao. "Introduction to Transportation Engineering". Látogatás ideje: 2024.10.23. 2007. 10. fejt. URL: <https://users.pfw.edu/sahap/CE450%20Transport%20Policy%20and%20Planning/1.%20Lectures/Books,%20references,%20readings/Traffic%20Assignment.pdf>.
- [12] *Finding the Maximum-Minimum Capacity for a Node in a Graph*. Weboldal. Látogatás ideje: 2024.10.23. URL: <https://www.baeldung.com/cs/graph-max-min-node-capacity>.
- [13] Volker Kaibel; Matthias A. F. Peinhardt. "On the Bottleneck Shortest Path Problem". *Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik* (2006).
- [14] *A GTFS adatok lelőhelyei*. Weboldal.
<https://bkk.hu/bkk-partnerek/egyeb/gtfs-menetrendi-adatok-programozoknak/>
<https://www.volanbusz.hu/hu/menetrendek/gtfs>
<https://www.mavcsoport.hu/gtfs-igenybejelento>
Látogatás ideje: 2024.10.23.
- [15] *Winmenetrend Online*. Weboldal. Látogatás ideje: 2024.10.23. URL: https://online.winmenetrend.hu/futar/vehicles?more_info=1.
- [16] *e-UT 02.01.21 ütiigyi műszaki előírás (Országos közutak keresztmetszeti forgalmának számálása és a forgalom nagyságának meghatározása)*. Látogatás ideje: 2024.10.23. URL: <https://ume.kozut.hu/dokumentum/144>.
- [17] *FOTW 1333, March 11, 2024: In 2022 the Average Number of Occupants Per Trip for Household Vehicles in the United States Was 1.5*. Weboldal. Látogatás ideje: 2024.10.23. URL: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1333-march-11-2024-2022-average-number-occupants-trip-household>.

A feladathoz használt kódok és forrásaik: <https://github.com/mpatrik07/TDK>

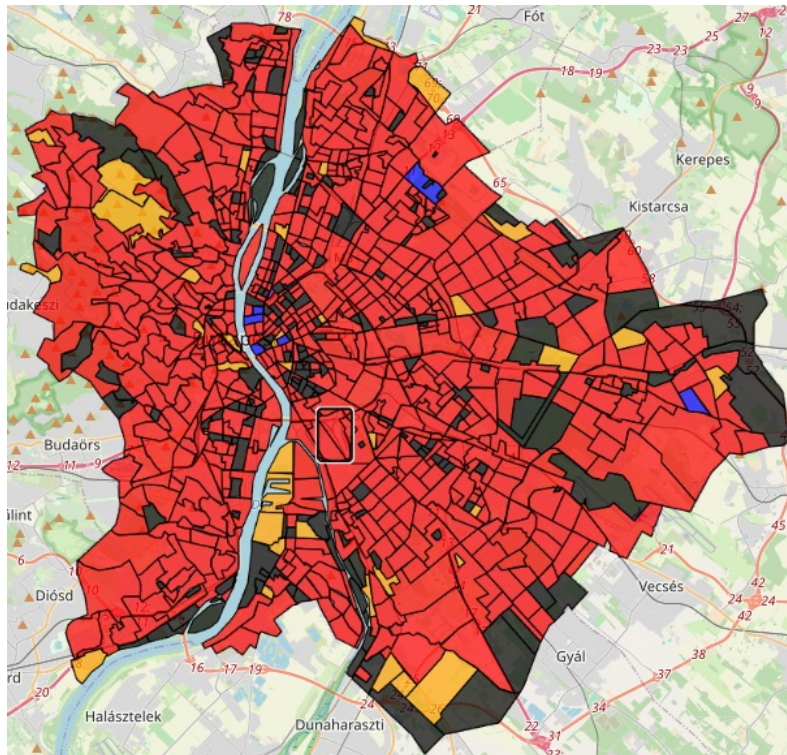
A. Melléklet



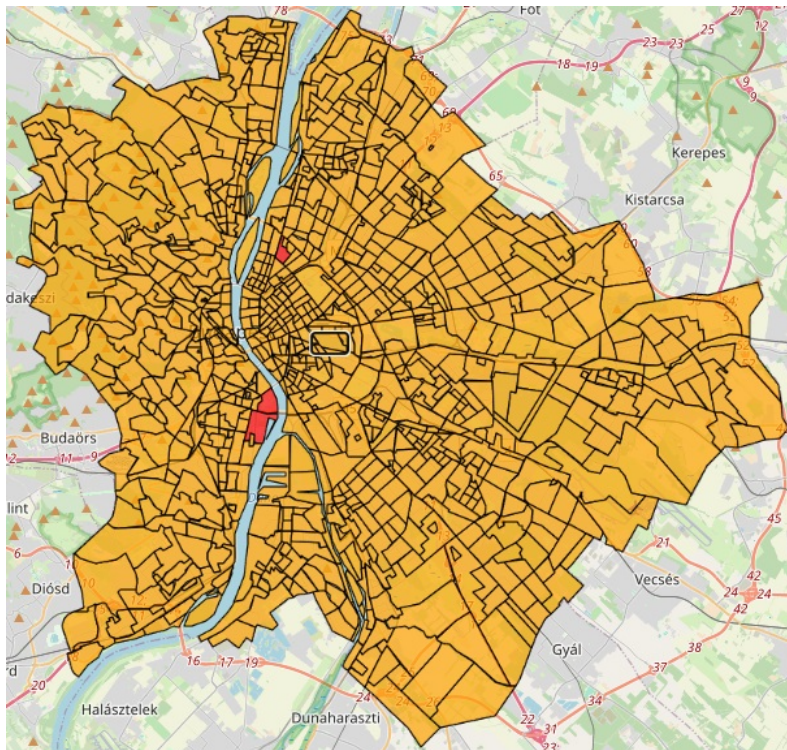
19. ábra. Zónák percentilisenként a minimális és maximális értékkel



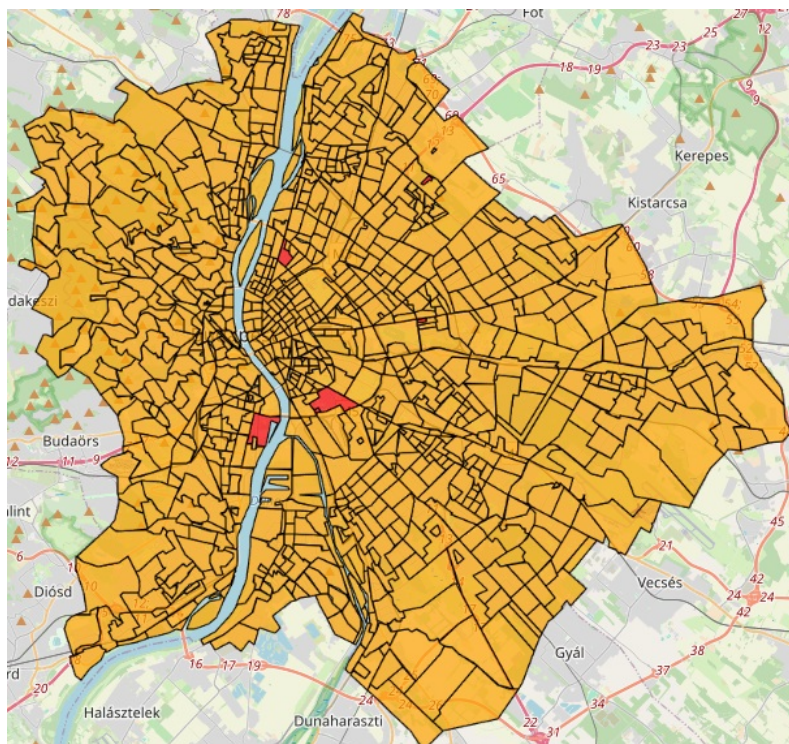
20. ábra. Zónák terhelés előtt



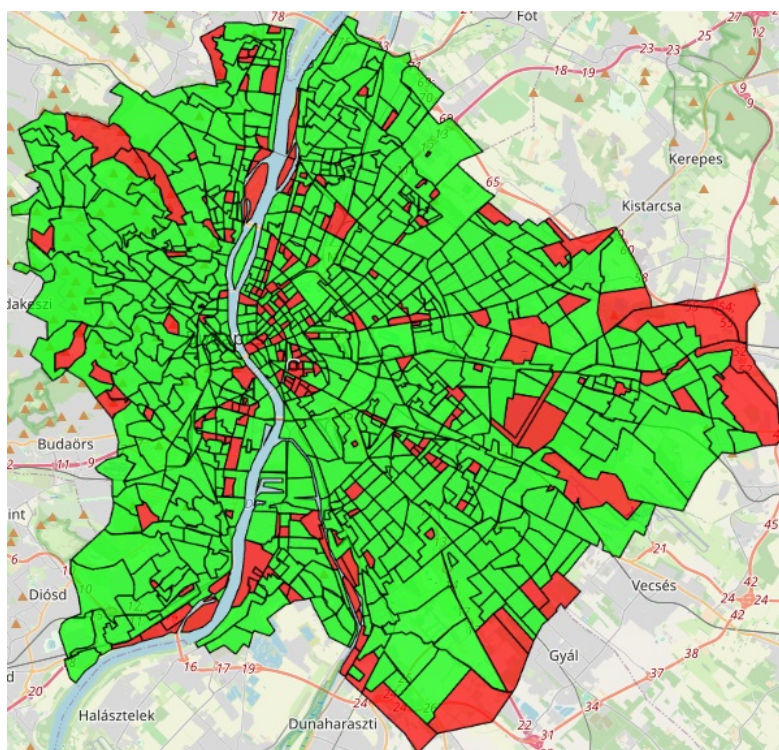
21. ábra. Zónák terhelés után



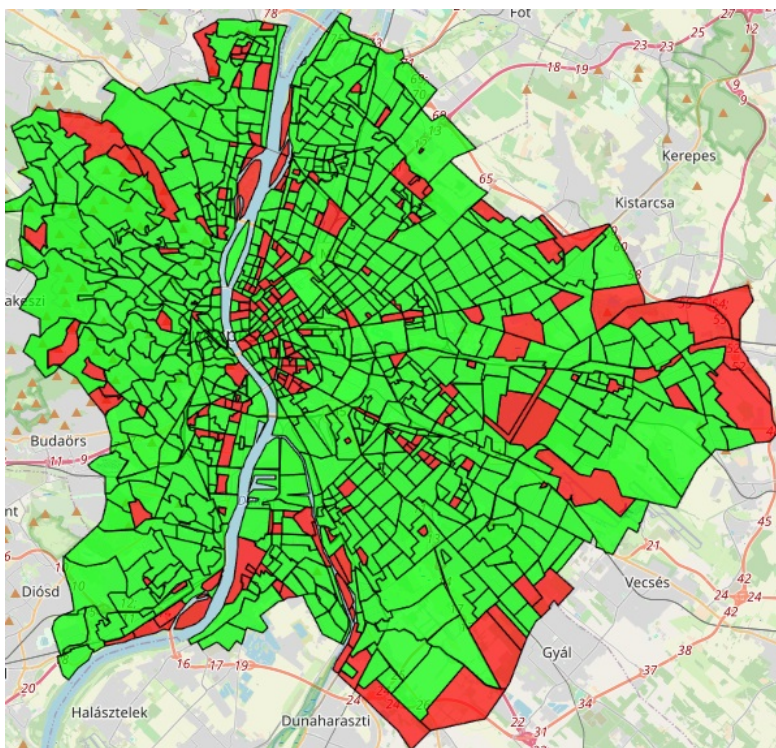
22. ábra. A bemenő személygépjármű forgalom igénye



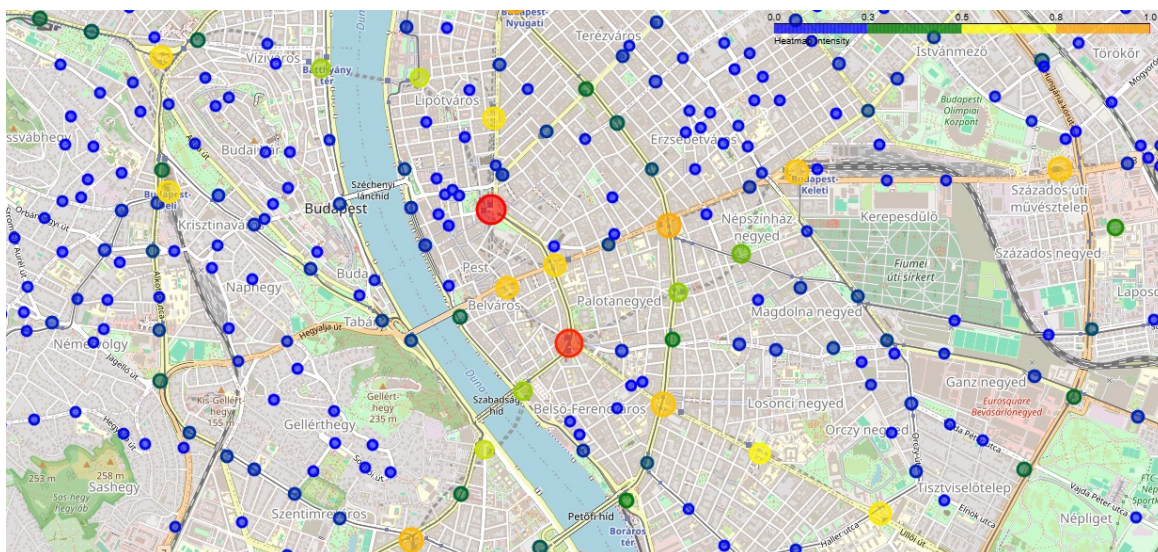
23. ábra. A kimenő személygépjármű forgalom igénye



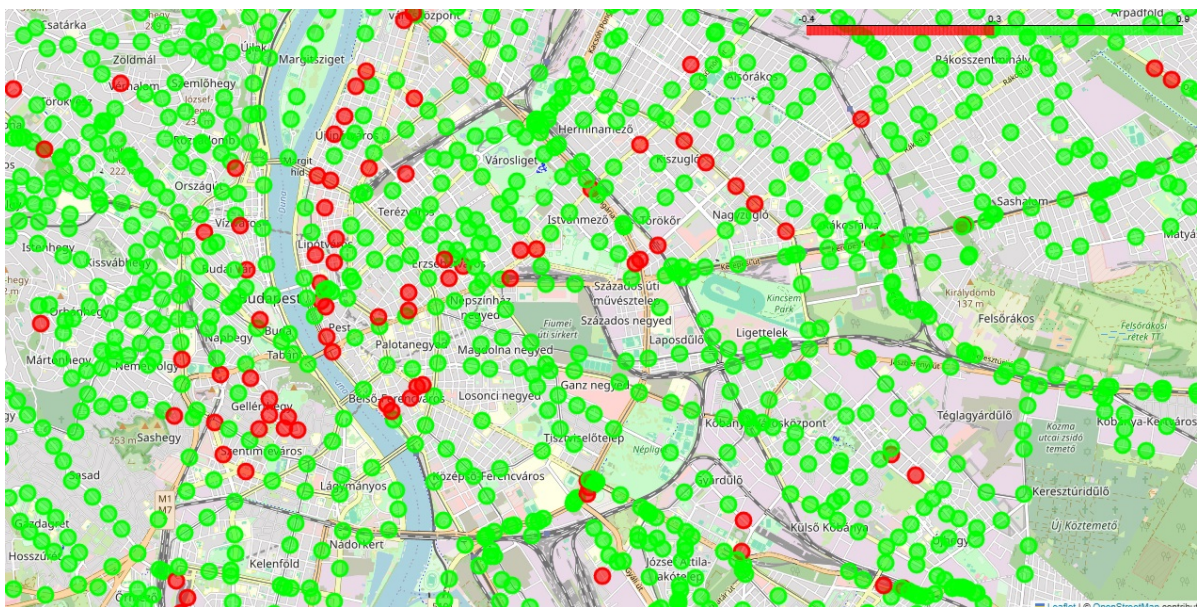
24. ábra. Az igény és a becsült kapacitás aránya az egyes zónák esetén



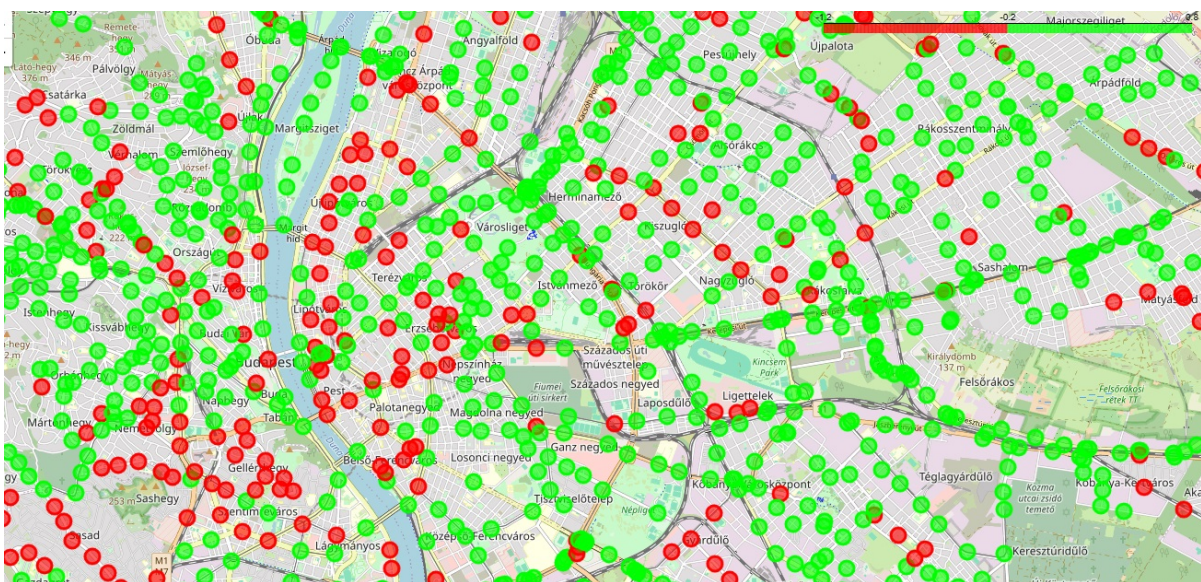
25. ábra. A megnövelt igény és a becsült kapacitás aránya az egyes zónák esetén



26. ábra. Az egyes megállók bejövő kapacitásai



27. ábra. A bemenő kapacitáskülönbségek terhelés előtt



28. ábra. A bemenő kapacitáskülönbségek terhelés után

5. táblázat: Vonalak negatív kapacitáskülönbségű csúcsokon

Szolgáltató		A közösségi közlekedés önmagában	Személygépjármű forgalommal való bővítés után
BKK	Busz	5,7,7E,8E,9,11,15,16,16A,26,27,29,30,30A,32,35,36,38,38A,39,46,53,58,67,68,71,77,85,85E,91,92,92A,93,93A,96,97E,98,98E,99,107,108E,110,111,112,124,125,125B,130,133E,135,138,139,140,140A,146,146A,150,150B,152,154,159,161,161A,161E,166,169E,174,175,176E,179,181,185,191,195,196,196A,198,200E,202E,212,212A,212B,217,217E,231,236A,238,261E,262,266,269,275,276E,277,278,291,296,297,298	5,7,7E,8E,9,10,11,15,16,16A,20E,25,26,27,29,30,30A,31,32,33,33A,34,35,36,38,38A,39,44,45,46,53,54,55,58,65,65A,66,66B,66E,67,68,71,85,85E,91,92,92A,93,93A,95,96,97E,98,98E,99,100E,101B,101E,102,104A,105,106,107,108E,110,111,112,114,117,118,119,120,121,123A,124,125,125B,126,129,130,131,132E,133E,134,135,136,138,139,140,140A,141,142E,144,146,146A,147,148,149,150,150B,151,152,153,154,158,159,160,161,161A,161E,165,166,168E,169E,170,174,175,176E,178,179,181,182,182A,183,184,185,187,191,194,194B,195,196,196A,198,200E,202E,204,210,212,212A,212B,213,214,217,217E,220,223E,224,224E,225,231,236A,238,240,244,250,250B,251A,251E,254E,255E,260,261E,262,266,268,269,275,276E,277,278,282E,284E,291,296,297,298
	Villamos	1,1A,2,2B,3,4,6,17,23,61,62,62A	1,1A,2,2B,3,4,6,12,14,17,19,23,24,28A,37,37A,41,42,47,49,50,51,51A,52,56,56A,59,61,62,62A,69

	Troli	72,73,74,75,76,79,80,82,82A,83	70,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81, 82,82A,83
	Metró	M1	M1,M2,M3,M4
	Hév		H5,H7
	Egyéb		
	VOLÁN	300,305,308,309,310,314,315,316, 318,319,321,396,397,400,410,411, 424,480,484,575,576,580,608,625, 628,630,632,636,650,653,654,655, 656,660,672,673,674,676,679,689, 690,700,724,725,734,735,760,762, 783,784,787,789,794,795,799,800, 820,821,830,840,848,872,880,890, 1020,1045,1053,1054,1066,1076, 1120,1134,1172,1251	300,305,308,309,310,314,315,316, 318,319,321,396,397,400,410,411, 424,480,484,505,575,576,580,608, 625,628,630,632,636,650,653,654, 655,656,660,672,673,674,676,679, 689,690,700,710,720,722,724,725, 734,735,760,762,783,784,787,789, 794,795,799,800,820,821,830,840, 848,872,880,890,1020,1045,1053, 1054,1066,1076,1120,1134,1172, 1251
	MÁV	S36,S60,Z60,S80	S36,S60,Z60,S80