



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

**Városi bevezető főútvonalak zóna alapú
forgalomirányítása dél-budai alkalmazási példával**

Tarr László
Q1J4KD

2014

Abstract

Jelen munka célja egy olyan irányítási stratégia kidolgozása és megtervezése, amely képes a kiválasztott közúti közlekedési hálózat forgalmának optimális szabályozására. Ehhez a szakirodalomban jelen lévő tanulmányokat használom fel, melyek a kiindulópontot adják. Az irányítási terület lehatárolását követően elvégzem a rendszer makroszkopikus forgalmi jellemzőinek felírását. Az irányítási célokat ún. LQ (Linear Quadratic) szabályozó alkalmazásának segítségével kívánom elérni. A szabályozott rendszer modellezését erre alkalmas szoftver segítségével végzem el. A megvalósított modell segítségével szimulációs futtatásokat fogok végezni. Ezen vizsgálatok segítségével a tervezett rendszer működésének vizsgálatát végzem el és összehasonlítom az előzetesen elvárt eredményekkel.

Kulcsszavak: *forgalomszabályozás, zónaalapú irányítás, MATLAB, SIMULINK*

Belső konzulens: Dr. Tettamanti Tamás

Külső konzulens: Csikós Alfréd

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani két konzulensemnek, Dr. Tettamanti Tamásnak és Csikós Alfrédnek, akik a diplomamunkám minden fázisában magas fokú szakmai tudásukkal nyújtottak segítséget a felmerült feladatok megoldásában. Továbbá köszönetemet szeretném kifejezni a munkám során felhasznált forgalmi adatok szolgáltatásáért a BKK Közút Zrt.-nek.

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
1. Forgalomirányítási stratégiák, módszerek	4
1.1 <i>A közúti forgalomirányítás általános felépítése</i>	4
1.2 <i>A közúti közlekedés irányítástechnikai sajátosságai</i>	4
1.3 <i>Irányítási célok megfogalmazása a közúti közlekedésben</i>	5
1.4 <i>A városi forgalomirányítás módszerei</i>	7
2. A zóna alapú városi forgalomirányítás	11
2.1 <i>Általános modellegyenletek</i>	11
2.2 <i>Az általános állapotér modell</i>	13
2.3 <i>Általános rendszerváltozók</i>	14
2.4 <i>Az irányítási terület bemutatása</i>	15
3. A dél-budai alkalmazási példa	17
3.1 <i>Hálózatok ismertetése</i>	17
3.2 <i>Modellegyenletek</i>	26
3.3 <i>Modell linearizálása</i>	36
4. Szabályozás tervezése	43
4.1 <i>Szabályozó tervezése</i>	43
4.2 <i>Munkapontok meghatározása</i>	43
4.3 <i>Nemlineáris rendszer munkapontjai</i>	44
4.4 <i>Lineáris rendszer munkapontjai</i>	45
4.5 <i>LQ szabályozás</i>	47
5. Szimuláció	50
5.1 <i>A rövid szimuláció beállításainak ismertetése</i>	50
5.2 <i>A rövid szimuláció eredményeinek ismertetése</i>	53
5.3 <i>A rövid szimuláció értékelése</i>	60
5.4 <i>A hosszú szimuláció beállításainak ismertetése</i>	64
5.5 <i>A hosszú szimuláció értékelése</i>	67
Összefoglalás	69
Felhasznált irodalom	70
Ábrajegyzék	72
Táblázatjegyzék	74
Függelék	75

Bevezetés

Diplomamunkám célja egy olyan városi forgalomirányítás megvalósítása, amely a védett városi zóna elvét használja fel, s ezen elv segítségével törekszik az optimum megteremtésére az irányítási területen belül.

Napjaink közlekedésének egyik legnagyobb problémája a motorizáció növekedése. Ennek köszönhetően a városi úthálózatokon a kapacitás maximumát meghaladó mértékű forgalmi igény jelentkezik, amely torlódások kialakulásához vezet. A torlódások jelentős mértékű externáliákat vonnak maguk után, melyek a következők lehetnek:

- környezetszennyezés: a közúti forgalomból származtatható a klímaváltozást okozó CO₂ hozzávetőlegesen 25 %-a, amely a legnagyobb mennyiségben újratermelődő üveghatású gáz, mely a belsőégésű motorok égéstermékeként is jelentkezik; [1]
- eljutási idők, illetve a hálózaton töltött idő (Total Time Spent) növekedése: a „dugóban” töltött idő közgazdasági szempontból termelékiesést, vagyis gazdasági haszoncsökkenést okoz. Ennek köszönhetően mind a bruttó hazai össztermék (GDP), mind pedig a közúti szektor versenyképessége csökken, továbbá a tüzelőanyag fogyasztás is nagymértékben növekszik; [1]
- balesetek kialakulása: a balesetekből származó károk szintén jelentős mértékű kedvezőtlen gazdasági hatásokat vonnak maguk után, amelyekbe nem csak a járművekben keletkezett anyagi kár tartozik, hanem a sérülésekből, halálesetekből származó költségek (költségkiesés) is.

Budapesten a dinamikus jövedelemnövekedés hatására az egy főre jutó gépjármű szám 22 %-kal növekedett az elmúlt több mint egy évtizedben. Napjainkban a fővárosi gépkocsi-közlekedés legfontosabb költségét, a járműberuházásokon túl, egyre inkább a forgalmi torlódásokhoz köthető kiadások jelentik.

Az ezredforduló után a belvárosi kerületekben a gépjárművek átlagos haladási sebessége 15 kilométer/óra alá csökkent, ami alacsonyabb, mint egy kerékpáros sebessége. Ez a jelentős mértékű haladási átlagsebesség csökkenés a belvárosba vezető utak esetében is megfigyelhető, mely visszavezethető a munkavégzés miatti ingavándor forgalom kialakulására. [2]

Az elméleti összefüggések és gyakorlati tapasztalatok alapján a városi lakosok, illetve a városba irányuló közlekedési igényeinek kielégítésére a gépkocsi csak korlátozottan alkalmas. Budapesten az autózás a nyugati nagyvárosokhoz képest bő 30 évvel később vált általánossá, ezért a közlekedési problémák is késleltetve jelentkeznek. Ennek megoldását sok más felzárkózással összefüggő problémához hasonlóan, nagyban megkönnyítheti a fejlett nagyvárosok forgalomszervezési megoldásainak a megismerése.

Az úthálózat fizikai korlátai miatt a növekvő fővárosi közlekedési igény kielégítéséhez elkerülhetetlen egy szabályozó módszer kialakítása, amely biztosítja a zavartalan forgalomáramlást. [2]

A vizsgálat alá vont terület Budapest dél-budai része, a déli, dél-nyugati elővárosi területekről érkező jellemzően ingázó forgalom problémáinak megoldása. Ez a területválasztás személyes indíttatásból is történt, mivel én is ezen az útvonalon közlekedek, és számos alkalommal ért az a kellemetlenség, hogy a forgalmi helyzet okozta torlódások miatt a dugóban araszolva vesztegettem el az időmet, aminek

következtében korábban kellett útnak indulni, hogy időben érkezhessek meg Budapest belvárosába.

A fent leírt irányítási területen előreláthatóan 2016-ban bevezetésre kerül a „dugódíj”, amely a zóna alapú szabályozás egy másik lehetősége. A dugódíj („congestion charge”) az útdíj egy fajtája, amelyet olyan utakon vetnek ki, ahol a túlzott forgalmi igények miatt torlódások alakulnak ki. A díj szabályozza a keresletet, lehetővé téve a torlódások kezelését a kínálat növelése nélkül. A piacgazdaság elvei szerint az úthasználók a díj révén fizetnek az általuk okozott negatív externáliáikért.

A világ számos városában működik dugódíj rendszer (pl. Szingapúrban, Londonban, Stockholmban, Milánóban), de azt is meg kell említeni, hogy egyes esetekben ezen intézkedések nem váltották be a hozzájuk fűzött reményeket. Ahogy egy „FHWA¹” jelentés tartja (2010-ből): *„Jelenleg nincsen olyan általánosan elérhető eszköz, amely megfelelő lenne az optimális irányítás megvalósítására a zsúfolt körülmények között”*. [12]

Ezek a tapasztalatok is indokolhatják egy másik szabályozás megalkotását, amelynek egy módszertani verzióját ismertetem a diplomamunkámban.

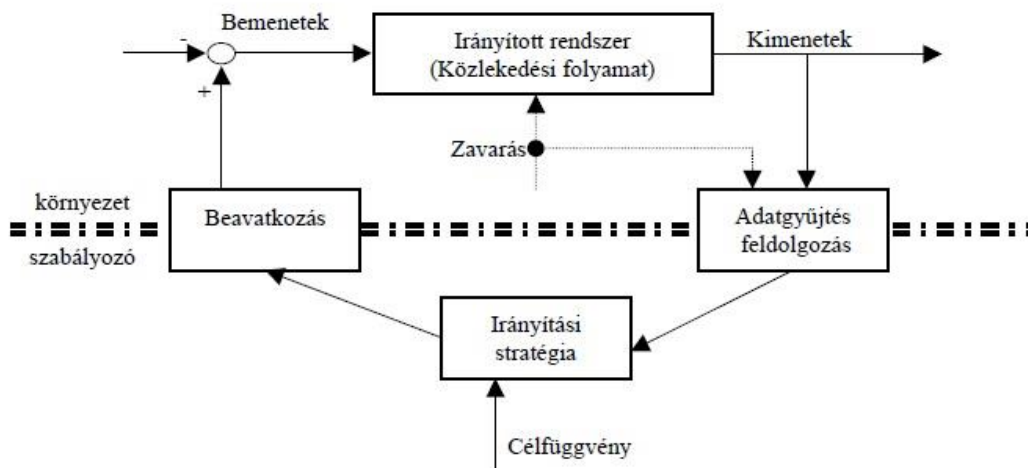
A munkám során használt modell és módszertan Csikós Alfréd – Dr. Tettamanti Tamás – Dr. Varga István, valamint Keyvan – Ekbatani által készített tanulmányokon alapszik.

¹ Az FHWA, vagy teljes nevén Federal Highway Administration (Szövetségi Autópálya Igazgatóság)

1. Forgalomirányítási stratégiák, módszerek

1.1 A közúti forgalomirányítás általános felépítése

A közúti közlekedési folyamat irányítástechnikai leképezése során meg kell állapítani, majd pedig fel kell állítani az irányított rendszer határait, ezek alapján pedig fel kell építeni annak a hatásvázlatát. Egy általános közlekedési szabályozórendszer felépítését és a közlekedési rendszerrel való kapcsolatát az 1. ábra mutatja be.



1. ábra: Közlekedési folyamat általános szabályozórendszere (forrás: [6])

A rendszer működésének első lépése a közlekedési, forgalmi adatok mérése, szükség esetén becslése. Ezt követően az irányítási stratégiának megfelelően egy szabályozó algoritmus lefuttatása következik. Az utolsó lépés pedig értelemszerűen a beavatkozás lesz, amely a rendszer sajátosságaitól függően többféle módon történhet. [6]

1.2 A közúti közlekedés irányítástechnikai sajátosságai

A közúti közlekedés irányíthatóságának szempontjából az egyik legfontosabb tulajdonság, hogy a résztvevő járművek nem alkotnak homogén közösséget. A közlekedési áramlatban résztvevő minden jármű (járművezető) külön-külön önálló döntéssel rendelkezik. Ezen tulajdonság miatt a közúti forgalom modellezése, és irányítása elég bonyolult feladattá válik, ráadásul a rendszerre ható (irányítástechnikai) beavatkozó jel hatása erősen bizonytalan. Tovább nehezíti az optimális irányítás megvalósítását, hogy a hálózaton közlekedő járművek vezetői szabadon döntenek mind az útvonalválasztásban, mind pedig a menetdinamikai tényezők megválasztásában is. A bizonytalan beavatkozó jel problémájára a modern irányítástechnika kínál megfelelően alkalmazható megoldásokat, amelyek segítségével ezt a bizonytalanságot tudjuk kezelni, különösen abban az esetben, ha annak ismert a természete. [3]

Külön esetet képviselnek az úgynevezett „zárt járműhalmazok”, amelyek esetében kötelező érvényű járműirányítás valósul meg. Ilyen halmazok a közlekedési járművek csoportjai, ahol a diszpécseri irányítástól csakis a normálüzemtől eltérő esetekben (pl. baleset, terelés, stb.) lehet eltérni. [3]

Egy másik ilyen eset az automatikus járműirányítás (freeway platooning) rendszere. Ezen rendszer működésének a lényege, hogy a hálózaton közlekedő járműveket járműcsoportokba rendezi. A csoportokban levő járművek egymás mögött „csökkentett” követési távolságra haladnak, mivel a járművek jelkövető szabályozó rendszerekkel vannak felszerelve. Így ezek a járművek jóval kevesebb reakcióidőt igényelnek a megálláshoz, vagy lassításhoz. A csökkentett követési távolságnak köszönhetően az úthálózatok kapacitáskihasználása javul. [23]

A beavatkozó jel egy másik fontos tulajdonsága, hogy általában erősen korlátos, és a korlátosság mind alsó-, mind felsőkorlátosságban egyszerre jelenik meg. Ezen tulajdonságot pedig megfelelően kell kezelni az optimumkeresés során. Azonban nemcsak a beavatkozó jel, hanem maguk a folyamatok, azok modelljei, valamint az irányítórendszerek is tele vannak korlátozó tényezőkkel. Ezek a feltételek mind megnehezítik a dinamikus irányítórendszerek tervezését, amelyekben így bonyolultabb, nagyobb számítási kapacitást igénylő szabályozási módszereket kell alkalmazni. [3]

A közúti közlekedési folyamatok gyakran nem folytonosak, például a jelzőlámpás szabályozás piros-zöld átmenetei szükségessé teszik a kapcsolóüzemi szabályozások bevezetését. Az előzőek és a mérőrendszerek tulajdonságai miatt szükséges a diszkrét állapotter bevezetése. További nehézség, hogy a nagyobb városi hálózatok és a hosszabb gyorsforgalmi úthálózatok túlzottan nagyméretűek lehetnek. A méret és az inhomogenitás miatt ezek modellezése nagyon körülményes, irányítástechnikai leképezésük pedig nagyon sok információ kezelését teszi szükségessé. A forgalmi folyamatok pontos, aktuális feltérképezése is mindenféleképpen nehéz, és munkaigényes folyamat, mivel e folyamat során sok nehezen, vagy egyáltalán nem mérhető forgalmi paramétereket kell meghatározni. Ilyen esetekben a különböző becslési, illetve az előrebecslési módszerek alkalmazhatóak. [3]

A fent leírtakon túl számos előre nem tervezett zavaró hatás is éri a közlekedési folyamatot (rendszert), melyeket nem lehet előrelátni. Ilyen hatásnak tekinthetők a balesetek, tiltott parkolás, szabálytalan járművek, illetve gyalogosok, kerékpárosok, stb.. Ráadásul a közlekedési hálózat peremén megjelenő forgalmi igények is zavaróként jelennek meg a rendszerben, mivel alapvetően nem befolyásolhatóak. A közúti közlekedés tehát egy sztochasztikus jellegű folyamat, amelyben sokszor csak várható, becsült értékkel lehet számolni és tervezni. A forgalmi paraméterek érzékelése során további zajok terhelik a méréseket, amelyek többsége kültéri helyszínen történik. A természeti hatásoknak kitett automatizált mérő- és számláló berendezések különösen érzékenyek. A leggyakrabban használt mérőeszköz az induktív hurokdetektor. A Budapest területén alkalmazott körülbelül 1000 darab hurokdetektor legalább fele működésképtelen (karbantartási hiányosságok, nyomvályúk, stb. okok miatt). [3]

A fent leírtakból egyértelműen kiderül, hogy egy adott forgalomáramlat tökéletes irányításának megvalósítása a közúti közlekedés sajátos jellege miatt elég összetett feladat.

1.3 Irányítási célok megfogalmazása a közúti közlekedésben

Mint minden rendszer tervezésekor, úgy a közlekedési irányítási rendszerek tervezése esetében is az első legfontosabb feladat a pontos irányítási cél meghatározása, rögzítése. Az irányítási cél a következő szempontok szerint alakulhat:

- forgalombiztonság növelése a balesetek számának és súlyosságának a csökkentésén keresztül;
- gazdaságosság növelése a várakozási idők, az utazási idők és az utazási költségek együttes csökkentésével;
- környezeti terhelés csökkentése az emisszió, a zajszint, illetve a többletenergia-felhasználás mérséklésével;
- egyes közlekedési létesítmények jobb elérhetősége az utazási idők összegének redukálása által;
- egyes közlekedési eszközök koordinált használatának javítása, amely a közösségi közlekedés jobb kihasználtságát jelenti;
- a forgalmi torlódások, zavarok kialakulásának megelőzése, valamint a meglévő problémák, zavarok elkerülése, megoldása;
- a meglévő úthálózat rendelkezésre álló kapacitásának maximális kihasználása;
- városi forgalomban a parkolóhely keresési idő lerövidítése a szabad parkolási létesítményekre és a parkolóhelyekre vonatkozó információk megadásával. [4] [5]

A szabályozás céljainak pontos meghatározása után következik annak matematikai megfogalmazása, vagyis a célfüggvény felállítása. Ez egy irányítástechnikai feladat első, és legfontosabb lépése. Az irányítási célfüggvény a városi jelzőlámpás rendszerek esetében tipikusan a következő elemek valamelyikének, vagy azok súlyozott kombinációjának optimalizálását jelenti:

- egy járműre jutó átlagos késleltetés (average delay per vehicle): egy adott hálózaton belüli utazások alatt a járművek várakozással eltöltött ideje osztva a hálózaton levő járművek számával, mértékegysége óra/jármű;
- maximális késleltetés (maximum delay): a közlekedési hálózaton belüli utazások során a járművek által maximálisan várakozással töltött idő, amely mértékegysége óra/jármű;
- átlagos megállások száma (average number of stops): egy adott hálózaton belüli utazás során átlagosan szükséges megállások száma, mely mértékegysége darab/jármű;
- kereszteződés átbotcsátóképessége (throughput of intersection): egy adott kereszteződésen egy óra alatt maximálisan áthaladni képes járműszám, amely mértékegysége jármű/óra;
- teljes utazási idő (Total Travel Time – TTT): egy adott hálózaton belüli járművek utazással (ez az akadálymentes haladást jelenti) eltöltött összes ideje, amely mértékegysége jármű*óra;
- teljes várakozási idő (Total Waiting Time – TWT): egy adott hálózaton belüli utazások alatt a járművek várakozással eltöltött ideje, melynek mértékegysége jármű*óra;
- teljes utazással eltöltött idő (Total Time Spent – TTS): egy adott hálózaton belül a járművek összes utazási és várakozási idejének az összege, vagyis $TTS = TTT + TWT$ melynek mértékegysége jármű*óra;
- teljes megtett távolság (Total Travel Distance – TTD): a járművek egy adott közlekedési rendszerben (hálózatban) megtett útvonalának teljes hosszát jelenti, mértékegysége jármű*km;
- a járművek teljes utazásra vonatkozó átlagsebessége (Mean Speed per trip – MS): mértékegysége kilométer/óra, amely kifejezhető $MS = TTD / TTS$ módon. [3] [4] [5] [7]

A célfüggvények természetesen egymástól nem teljesen függetlenek. Városi forgalomirányítás esetén tipikusan az átlagos késleltetés minimalizálása használatos a gyakorlatban, mely érték szoros kapcsolatban áll a hálózatbeli utazási idővel. [3]

A közúti közlekedési irányítórendszerek felépítése hasonló, attól függetlenül, hogy milyen és mekkora kiterjedésű az irányított közúti folyamat. Rendszerelméleti megközelítésben az irányítórendszer megfigyelések és mérések révén információt gyűjt az irányított folyamatról, majd a célfüggvény alapján döntéseket hoz, és beavatkozik az irányított rendszer működésébe, hogy így a kívánt viselkedést alakítsa ki. A célfüggvény meghatározása ugyanakkor nem könnyű feladat. A fent megfogalmazott célok együttes betartása szinte lehetetlen, hiszen az egyes célok egymással összeütközésbe kerülnek, így egy összetett célfüggvény megfogalmazása során nagyon fontos az optimumra való törekvés, tehát a célfüggvény gyakran csak az előzetesen kitűzött célok súlyozott összegeként fogalmazható meg, ahol is a különböző súlyozások mértéke a társadalmi és politikai szempontok érvényesülésétől függ. [3] [4] [5]

1.4 A városi forgalomirányítás módszerei

A városi hálózatok forgalomirányításának területén jelentős mértékű kutatások történtek az elmúlt évszázadban, amely még ma sem zárult le. Több, jelentős irányítási algoritmus és egyéb más irányítási eszköz megalkotásával próbálták meg növelni a hálózatokon a kapacitást. A kutatások eredményeként elért folyamatos előnyök ellenére nem teljesen sikerült megoldani az úthálózatok kapacitásbeli problémáit. Ezen megoldások legfőbb hátránya, hogy nem alkalmas a „valós – idejű” irányításban való felhasználásra. A felmerült probléma megoldása – a tudomány jelenlegi ismerete szerint – a városi fundamentális diagram alkalmazásával lehetséges. Ezek a modern megoldások negatív visszacsatolási struktúrán alapszanak. Ezen stratégiákkal foglalkozó tanulmányok, beszámolók eredményei egyértelműen a következőket mutatják:

- a hálózaton belüli késések, így a TTS jelentős mértékű csökkenése;
- a hálózaton közlekedők átlagsebességének növekedése. [12]

A városi úthálózatokon kialakuló torlódások egyre növekvő problémájának megoldására a modern tudomány folyamatosan törekszik. Ha általánosan vizsgáljuk a fent említett problémakört, akkor általában két lehetőséget említhetünk, amely a forgalmi torlódások jelentős mértékű csökkentését eredményezheti:

- az adott úthálózat kapacitásának növelése;
- illetve a vizsgált úthálózaton kialakuló forgalmi igény szabályozása. [12]

A fent megemlített két lehetséges intézkedés közül a második említhető tényleges megoldásként, mivel a kapacitás növelés egyfelől jelentős mértékű anyagi ráfordítást igényel, másfelől pedig nem mindig van lehetőség az infrastrukturális fejlesztések realizálására. Ez a probléma leginkább a belvárosi körzetekben jelentkezik, ahol a beépítettség tovább már nem fokozható a rendelkezésre álló beépíthető terület hiánya miatt. A városi mobilitás növelése érdekében a városi forgalomirányítás módszertana (UTC – Urban Traffic Control) több lehetséges irányzatot, illetve irányvonalat vizsgált az elmúlt évszázadban. E vizsgálatok és tanulmányok következtetéseként elmondható, hogy a forgalmi áramlatok nagymértékben függenek az alkalmazott jelzőlámpa vezérlési stratégiáktól, főleg a nagyméretű hálózatok esetében. A torlódásmentes városi közlekedés iránti igény kialakítása egyre fontosabbá válik, ami viszont egy fejlett forgalomirányítási stratégia kialakítását követeli meg, amely képes kezelni a hálózaton belüli késéseket,

valamint a környezetből érkező negatív hatásokat is. A gyakorlatban ez egy praktikus és hatékony „valós – idejű” forgalomirányítási stratégia kialakítását jelenti. Ez a stratégia jelentős mértékű fontossággal bír tudományos, és gyakorlati szempontból is. Tudományos szempontból nézve azért mondható fontosnak, mivel ennek hatására megélnék az érdeklődés a kialakult problémák megoldása iránt, és ennek következtében újabb megoldások, modellek, elméletek születhetnek, amelyek hozzájárulnának a további fejlődéshez ezen a területen. A gyakorlati változás magától értetődően a hatékony forgalomlefolys megvalósulása, a közlekedési körülmények nagymértékű javulása. [11] [12]

Az UTC rendszerek kutatási és fejlesztési tevékenységei hosszú távú és széleskörű tudományos múltra tekintenek vissza. Több módszer, illetve elmélet már a múlt századból való, de a közelmúltból is származnak tanulmányok, stratégiák, amelyek inkább a túltelített városi úthálózatok problémakörével foglalkoznak. A gyakorlatban széles körben alkalmazott irányítási stratégiák, mint például a SCOTT és a SCATS, amelyek bár alkalmazhatóak a nagyhálózati irányításban is, de kevésbé hatékonyak a telített közlekedési viszonyok szabályozásához, kezeléséhez. [16] [25] [26]

Elterjedt több, fejlettebb, forgalomfüggő irányítási stratégia is, mint például az OPAC, a PROLYN, illetve a RHODES. Ezen irányítási rendszerek, melyek exponenciális komplexitással rendelkező optimalizáló algoritmust használnak, nem teszik lehetővé a központi alkalmazásukat. [18] [27] [28] [29]

A fent felsorolt, legnagyobb számban rendelkezésre álló irányítási stratégiák csak korlátozott körülmények között alkalmazhatóak a központi, nagyvárosi területeken, mivel az úthálózat kapacitás mértékét meghaladó nagyságú igényforgalom esetén nem alkalmasak a kialakult probléma tökéletes kezelésére. Ezen probléma megoldásának első jelentős mértékű, figyelemreméltó megoldási kísérlete a városi irányítási stratégia, a TUC. [19] [30]

További számos kutatási megközelítés született, melyek különböző számításigényes, numerikus algoritmusokat alkalmaznak megoldásként, mint amilyen:

- a genetikus algoritmus; [31]
- a „multi – extended” lineáris kiegészítő program; [32]
- a „mixed – integer” lineáris program; [33]
- és az „ant colony” optimalizáló eljárás. [34]

Figyelembe véve a nagy számítási igényt, a fent leírt optimalizáló – alapú megoldások nagyméretű hálózatok, hálózati szintű, „valós – idejű” alkalmazása számos problémával járhat. [11] [12]

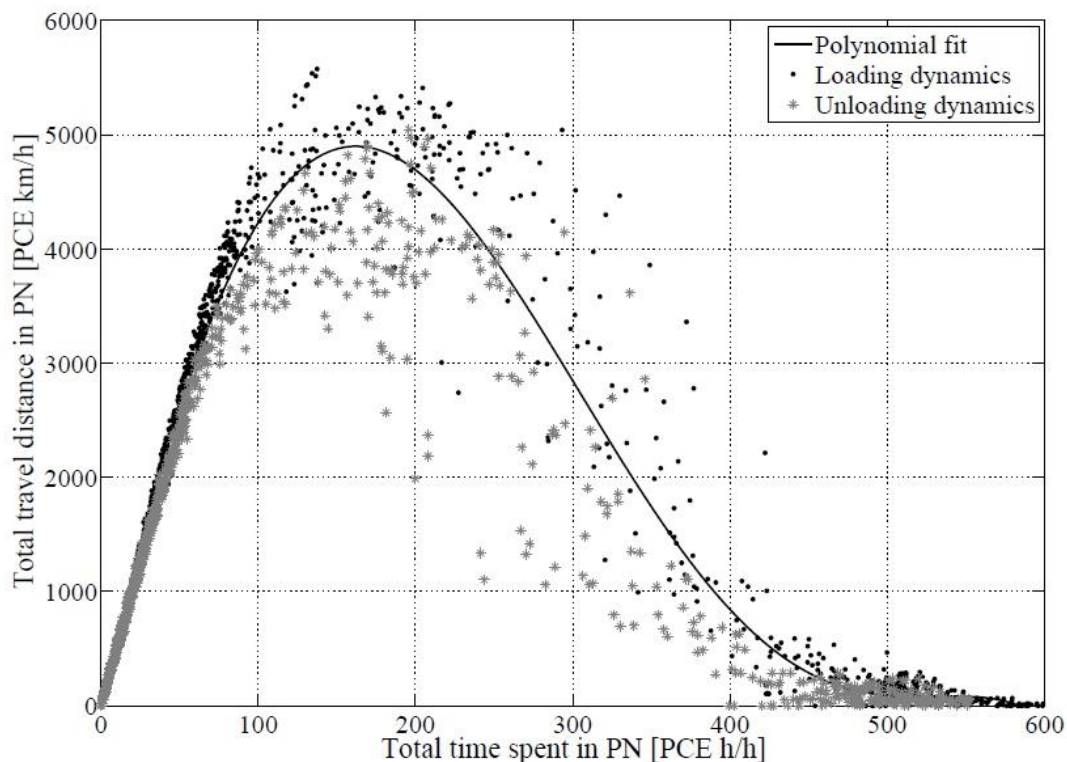
A fent említettektől egy eltérő irányítási stratégiát jelent a városi fundamentális görbe alapú irányítás. Ezen irányítás lényege abban jelentkezik, hogy az irányítási szakaszon mért eredményekből meghatározott fundamentális diagram (amely a hálózaton kialakuló TTS és TTD értékek függvénye) alapján történik a szabályozás. [9] [15] [17]

A fundamentális diagram alapú szabályozást az autópálya forgalomirányítás esetében már alkalmazzák. Gartner és Wagner 2004-es kutatásában kiderült, hogy a városi fundamentális görbék városi forgalomirányításra szintén alkalmazható. Ezt szimulációs kísérletek eredményeivel támasztották alá. Hasonló eredményeket hozott:

- Geroliminis és Daganzo 2008-as valós idejű adatok alapján végzett kísérletei; [21]
- Farhi szintén 2008-as analitikus elemzésekkel végzett kísérletei; [22]
- és Helbing 2009-es szintén analitikus elemzésekkel végzett kísérletei is. [10]

A fundamentális diagramról, mint mérési eredményekből származtatott pontokból felépülő görbéről először Godfrey tett említést 1969-ben, de a városi fundamentális diagramról először Dinopoulou tett említést egy területértékelő tanulmányban, 2005-ben. E koncepció elnevezése gyakran az MFD (makroszkopikus fundamentális diagram) volt. De amióta a közönséges fundamentális diagramot az autópálya irányítás során alkalmazzák, azóta terjedt el az NFD (vagyis Network Fundamental Diagram) elnevezés. A pontos NFD görbét a honnan – hova (origin - destination) igények alapján lehet meghatározni. Ez a fajta megközelítés a hálózaton jelentkező homogén forgalmi terhelés esetén a legpontosabb. Szimulációs környezetben, ahol különböző irányítási stratégiákat tesztelnek, ez a fajta homogén forgalomterhelés jelenthet egy dinamikus hozzárendelési eszközt, amely képes csökkenteni a tranziens jelenségeket, mint például a hálózatba be- és kilépő adatok között fellépő hiszterézis jelenség. [8] [13] [14]

A városi közúthálózaton alkalmazott NFD elmélet egy elég jelentős vizsgálati kérdéskörrel foglalkozik. Ez pedig a körülmények, illetve feltételek vizsgálata, amelyek befolyásolják a városi fundamentális görbék alakját, stabilitását különböző honnan – hova igények, és ennek megfelelő ponthalmazok, vagy különböző csúcsidőszakok, illetve a hetek különböző napjai között. Továbbá a különböző irányítási stratégiák hatásait, valamint a lehetséges hiszterézis zavarokat a hálózatba be- és kilépő fázisok között. Egy jellegzetes NFD görbét mutat be a 2. ábra.



2. ábra: Városi Fundamentális Diagram (forrás: [11])

A fent említett problémák megoldására folyamatos analitikus és empirikus vizsgálatok, valamint kutatások folynak. Mindazonáltal, a már ismert és megfigyelt adatok alapján elmondható, hogy az NFD elmélet méltán tekinthető a városi forgalomirányítási stratégiák levezetésének alapjául. Ezen állítást először Daganzo támasztotta alá, amikor is az NFD elmélet használatát javasolta egy vizsgálati hálózat kiáramló forgalmának maximalizálási feladatának megoldásaként. [21]

Ezzel kapcsolatban szükséges megemlíteni, hogy ezen megközelítés közvetlen, gyakorlati alkalmazása nem lehetséges városi hálózatokra. Más kutatási munkák (mint Haddad, illetve Strating) a „Model Predictive Control” elméletét alkalmazzák. Az MPC egy irányítási stratégia, amely gyakorlati megvalósítása komoly akadályokba ütközik. Ugyanis Haddad az MPC elgondolást csupán egy egyszerű optimalizálási probléma megoldására használta, míg Strating egy részletes mikroszkopikus szimuláció során alkalmazta az MPC modellt, amely vizsgálat eredményeként képtelennek tartotta az MPC koncepciót egy jól használható irányítási stratégia megalkotására. [12]

Nagyon sok „real-time” optimalizáló városi irányítás létezik, ám a kapacitásproblémák megoldását ezek segítségével sem lehet elvégezni, mivel a forgalmi igényeket (trafficedemand) nem tudják befolyásolni. Ezért új és az eddigi tapasztalatok alapján jól használható módszer az ún. „perimeter control”, amely során egyszerűen kizárjuk, nem engedjük be azon járműveket, amik már nem férnek be az irányítási területre. Ezek után elmondható, hogy a lehetséges praktikus megoldás a túltelített városi hálózatokon kialakult forgalmi torlódások megoldására a járművek visszatartása. Ezen elmélet lényege, hogy egyfajta védett zónát képezve korlátozzuk a járművek belépését az irányítás alá vont körzetbe, hálózatba. A zónakorlátozás megoldására általánosan két megoldás említhető:

- úthasználati díj bevezetése az irányított területre; [12]
- vagy jelzőlámpás irányítás kialakítása, amely a „védett övezeten” belüli forgalmi viszonyok alapján korlátozza a gépjárművek belépését a hálózatba. [11]

A fent említett két megoldás közül az utóbbival oldom meg a szabályozást. [11]

A dinamikus irányítási modell alapját az irányítási területen belül kialakult forgalmi viszonyok (TTS, TTD, stb.) képezik. [11]

Mindemellett fontos megjegyezni, hogy tökéletes irányítási megoldás nincs, hiszen a fent leírt irányítási struktúra sem jelent teljes megoldást, mivel a zónahatáron kívül forgalommal nem foglalkozik. [11]

2. A zóna alapú városi forgalomirányítás

2.1 Általános modellegyenletek

Ebben a részben, a diplomamunkám során, a városi irányítási rendszerként használt, általános, egy irányítási zónára vonatkozó modellegyenleteit mutatom be. Az általam felhasznált modell az Alfréd Csikós - Tamás Tettamanti - István Varga: Nonlinear gating control for urban road traffic network using the network fundamental diagram című cikkből ered. A szabályzó rendszer megvalósítása diszkrét idő formátumban történik, ezért a modellegyenleteket is diszkrét formában írom fel. [11]

Az első, és talán legfontosabb szabály, amit jelen modell feltételez és használ az nem más, mint a járműmegmaradás elve². A védett hálózat (a továbbiakban PN, az angol Protected Network kifejezésből származtatva) esetében a jármű megmaradási törvény a következő (1) egyenlet segítségével írható fel:

$$N_{PN}(k+1) = N_{PN}(k) + T_S [Q_{in}(k) + Q_d(k) - Q_{out}(k)] \quad (1)$$

ahol k jelenti a diszkrét lépésközt és T_S (mértékegysége [óra]) pedig a diszkrét mintavételezési időt, ami a jelen munkában a jelzésterv ciklusideje. A gyakorlatban az (1)-es egyenlet jelenti az állapotváltozót a $[kT_S, (k+1)T_S]$ időintervallum alatt. Az állapotot az $N_{PN}(k)$ mutatja, ami nem más, mint a védett övezeten belüli járműszám, mértékegysége egységjármű óránként [egységjármű/óra]³. A $Q_{in}(k)$ matematikailag $\sum_{j=1}^{n_{in}} q_{d,j}(k)$ módon fejezhető ki, ahol n_{in} a szabályozott belépő kapuk száma. Jelentése a védett zónába belépő összes járműszám, egységjármű/óra mértékegységben. $Q_d(k) = \sum_{j=1}^{n_d} q_{d,j}(k)$ kifejezés jelenti a szabályozatlan belépő forgalom összegét (mértékegysége szintén egységjármű/óra), ahol n_d a jelenti a szabályozatlan kapuk számát, amelyen keresztül belehet jutni a védett zónába. $Q_{out}(k) = \sum_{j=1}^{n_{out}} q_{out,j}(k)$ kifejezés jelenti a védett zónából kiáramló összes járműszámot (mértékegység egységjármű/óra), ahol n_{out} jelenti a kilépő kapuk számát. [11]

A második fontos szabály, hogy az alkalmazott irányítási modell a Daganzo-féle városi NFD elméletet alkalmazza. Az általam alkalmazott irányítási modellben az NFD, a TTD és a TTS értékek közötti összefüggést adja meg a védett zónán belül egy diszkrét lépésköz alatt. A TTD és TTS forgalmi változókat a következő formában írhatók fel:

$$\begin{aligned} TTD_{PN}(k) &= T_s \sum_{j=1}^{n_{link}} q_j(k) L_j \\ TTS_{PN}(k) &= T_s \sum_{j=1}^{n_{link}} N_j(k) \end{aligned} \quad (2)$$

² A járműmegmaradás törvénye kimondja, hogy a vizsgált területre belépő- és onnan kilépő járművek száma megegyezik.

³ Az egységjármű, mint mértékegység a különböző járműtípusok egységes mértékben való kifejezését jelenti, amelyben az egyes járműtípusok a tulajdonságaik alapján hozzárendelt arányokkal rendelkeznek.

ahol n_{link} jelenti a védett zónán belül lévő útszakaszok számát, illetve $q_j(k)$ a j -edik útszakasz forgalomnagyságát (egységjármű/órában), $N_j(k)$ a j -edik útszakaszon lévő összes járművet, valamint L_j jelöli a j -edik útszakasz hosszát, kilométer nagyságrendben. [11]

Fontos megjegyezni, hogy a teljes fundamentális görbe felírásához feltétlenül ismernünk kell a forgalmi változók pontos értékeit (ρ_j és ρ_j , $j = 1, \dots, n_{link}$), melyeket forgalmi mérések segítségével kaphatunk meg (pl. hurokdetektorok, kamerás megfigyelő rendszerek, stb.). Az előbb említett változók mérése egyszerűnek tekinthető. Papageorgiou alkotta meg a ρ_j becslésésnek meghatározásához szükséges formulát. Itt fontos megjegyezni, hogy az általam alkalmazott modell minden forgalmi változót ismertnek, vagyis mérhetőnek feltételez. Ezek alapján a védett övezeten belül lévő járművek száma becsülhető a (3)-as egyenlet szerinti formula segítségével:

$$N_{PN}(k) = \sum_{j=1}^{n_{link}} \rho_j(k) L_j \quad (3)$$

ahol $\rho_j(k)$ jelöli a forgalom sűrűséget a j -edik útszakaszon. A gyakorlatban, N_{PN} értéke meghatározható a megfelelő becslési eljárás útján is. Tehát a (3)-as egyenlet segítségével a teljes fundamentális diagram ismertnek feltételezhető. [11]

A fundamentális összefüggés a (4)-es egyenlet formájában írható fel:

$$TTD_{PN}(k) = F(TTS_{PN}(k)) + \varepsilon(k) \quad (4)$$

ahol $F(\cdot)$ jelöli a nemlineáris függvényösszefüggést a teljes NFD-re vonatkoztatva, a mérési pontokra illesztve. $\varepsilon(k)$ pedig az illesztési hibát jelöli, melyet zajként kezelünk a rendszer dinamikájában. [20]

A hálózati modell azt is feltételezi, hogy teljes, védett övezetet elhagyó forgalomnagyság, a $Q_{out}(k)$ arányban áll a $TTD_{PN}(k)$ értékkel, amely összefüggést a (5)-ös egyenlet írja fel:

$$Q_{out}(k) = \frac{\Gamma}{L} TTD_{PN} = \frac{\Gamma}{L} F(TTS_{PN}) \quad (5)$$

ahol $0 \leq \Gamma \leq 1$ a hálózat kilépési arány száma, L az átlagos útszakasz hossz a hálózaton belül. A Γ együttható meghatározása a teljes kimenő forgalomnagyság és a TTD_{PN} koordináta rendszerben való mérési pontok illesztése által végezhető el. Fontos megjegyezni, hogy a hálózatból kilépő forgalomnagyság meghatározására különböző megközelítések is használatosak, mint például Geroliminis munkájában az L az átlagos utazási távolságokat jelöli. [11] [22]

A szabályozott kapuknál elhelyezett jelzőlámpáknál használt működtető dinamika a (6)-os egyenletnek megfelelően írható fel:

$$q_{in,j}(k) = \beta_j q_{g,j}(k - \tau) \quad (6)$$

ahol β_j mutatja azon belépőkapun átlépett gépjárművek ($q_{g,j}$) arányát, melyek ténylegesen beléptek a védett zónába. Értéke $0 \leq \beta_j \leq 1$ lehet. τ pedig az az időtartam, ami alatt a belépő kapun áthaladt jármű ténylegesen belép a védett zónába. Az általam használt modellben a zóna határa és a beléptető kapuk helye egy-, és ugyanazon helyre esik, ennek következtében a τ értéke zérus, míg:

$$q_{in,j}(k) = \beta_j q_{g,j}(k) \quad (7)$$

A β_j paraméter közelíthető a $q_{in,j}$ és a $q_{g,j}$ értékek illesztése során is. A modell működése során a $q_{in,j}$ tekinthető a tervezett irányító jelnek, ami ideálisan megvalósul, és $q_{g,j}$ tekinthető a működtető jelnek, ami ténylegesen megvalósul. [11] [20]

A modell működése során, a szabályozott kapuknál kialakuló sorhossz dinamikája a (8)-as egyenletnek megfelelően írható fel:

$$l_j(k+1) = l_j(k) + T_s(q_{dem,j}(k) - q_{in,j}(k)) \quad (8)$$

ahol l_j jelöli a sorhosszt (mértékegysége egységjármű/óra) a j -edik kapunál, ahol a jelentkező forgalmi igény $q_{dem,j}$.

Az általam alkalmazott irányítási modell egyszerűsítéseit összefoglalva a következőket mondhatjuk:

- az általam használt modell a hálózatba belépő forgalomnagyságot, az onnan kilépő forgalomnagyságot, valamint a hálózaton belüli járműszámot is mérhetőnek, így ismertnek feltételezi; [11]
- így a teljes fundamentális összefüggés felírható; [11]
- így mind az A, mind pedig a B korrekciós tényező értéke 1-nek vehető; [11]
- a becslési hibát (ε) elhanyagolhatónak feltételezi; [11]
- illetve a zóna határ, valamint a szabályozott kapuk (jelzőlámpák) helye megegyezik, vagyis a τ értéke zérus, míg a β értéke 1, mivel a szabályozott kapukon áthaladt járművek mindegyike belép a zónába. [11]

Tehát az irányítási modell nem csak a hálózaton belüli forgalom szabályozását tűzi ki irányítási célként, hanem a szabályozott kapuk előtt kialakult sorhossz minimalizálását is. [11]

2.2 Az általános állapotér modell

A dinamikus modellegyenleteket az előző részben írtam fel, a hozzátartozó állapotér egyenleteket a (9)-es egyenlet mutatja meg:

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} N_{PN}(k+1) \\ l_1(k+1) \\ \dots \\ l_{n_m}(k+1) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} N_{PN}(k) - T_s \cdot \frac{\Gamma}{L} F(N_{PN}(k)) \\ l_1(k) \\ \dots \\ l_{n_m}(k) \end{pmatrix} \\
+ \begin{pmatrix} T_s \sum_{j=1}^{n_m} q_{in,j}(k) \\ -T_s q_{in,1}(k) \\ \dots \\ -T_s q_{in,n_m}(k) \end{pmatrix} &+ \begin{pmatrix} T_s \sum_{j=1}^{n_d} \bar{q}_{d,j}(k) \\ T_s q_{dem,1}(k) \\ \dots \\ T_s q_{dem,n_m}(k) \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{9}$$

A (9)-es egyenlet az (1)-es és (8)-as egyenlet vektorformába rendezve. Az első sor az (1)-es egyenlet a (4), (5) és (6)-os egyenletek alapján lett kifejezve. Továbbá a második, harmadik, és negyedik sorok a szabályozott kapuknál kialakuló járműoszlop dinamikáját fejezik ki a (8)-as egyenletet alapul véve. $\bar{q}_{d,j}$ ($j = 1, \dots, n_d$) jelenti a névleges forgalomnagyságot, amely a j -edik szabályozatlan kapun keresztül áramlik be a zónába. Valamint $q_{dem,i}$ ($i = 1, \dots, n_m$) jelöli az i -edik szabályozott kapunál jelentkező forgalmi igényt. A (9)-es egyenlet jobb oldalának második és harmadik része foglalja magába a szabályozott bemenetet, illetve a zavarásokat is.

2.3 Általános rendszerváltozók

Az alkalmazott irányítási modellben a védett hálózaton belüli járműszám N_{PN} és a szabályozott kapuknál kialakuló sorhossz $l_1 \dots l_{n_m}$ tekinthetők a rendszer állapotváltozóinak:

$$x(k) = \begin{pmatrix} N_{PN}(k) \\ l_1(k) \\ \dots \\ l_{n_m}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^{n_m+1} \tag{10}$$

A zavarást a (11)-es egyenlet fejezi ki:

$$d(k) = \begin{pmatrix} \bar{q}_{d,1}(k) \\ \dots \\ \bar{q}_{d,n_d}(k) \\ q_{dem,1}(k) \\ \dots \\ q_{dem,n_m}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^{n_d+n_m} \tag{11}$$

ahol $\bar{q}_{d,j}$ a névleges forgalomnagyság a j -edik szabályozatlan kapun, míg q_{dem,n_i} jelöli a szabályozott kapuknál jelentkező forgalmi igényt.

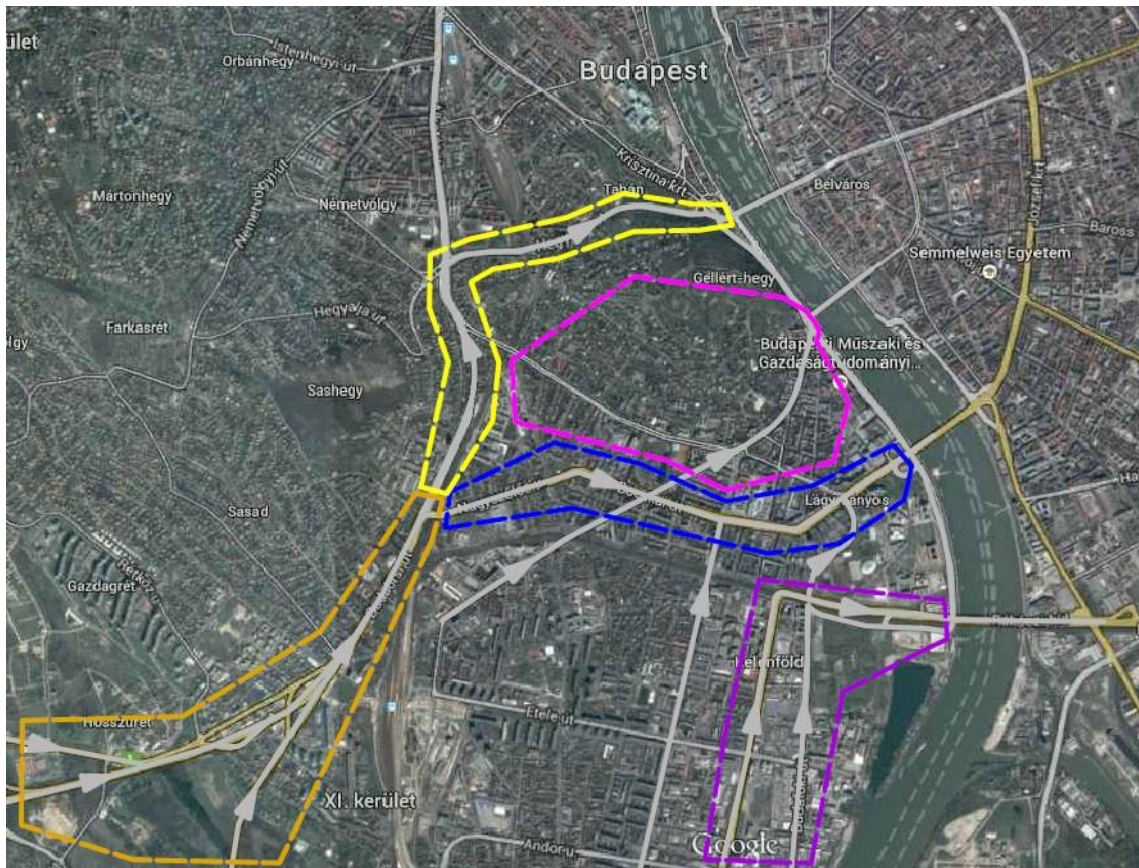
A bemenő vektort a (12)-es egyenlet írja fel:

$$u(k) = \begin{pmatrix} q_{in,1}(k) \\ \dots \\ q_{in,n_{in}}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^{n_{in}} \quad (12)$$

ahol $q_{in,j}$ $j = 1, \dots, n_{in}$ jelöli a j -edik kapunál levő forgalomnagyságot.

2.4 Az irányítási terület bemutatása

Az irányítási feladat célja a déli-, dél-nyugati területekről a belváros felé tartó forgalom szabályozása. Ezen feladat minél hatékonyabb megoldása végett öt irányítási területet, zónát alakítottam ki a dél-budai körzetben. Az irányítási terület áttekintő térképét mutatja a 3. ábra.



3. ábra: Irányítási terület

A fenti ábrán is látható, hogy az öt hálózat közül négy a Duna-hidak felé vezető utak forgalmát szabályozza, míg egy az M1-M7 autópályáról beáramló forgalmat igyekszik irányítani.

Az irányítási területek szabályozásához használt NFD görbék meghatározásához a BKK Közút Zrt. által üzemeltett rendszám-figyelő kamerarendszer által szolgáltatott adatokat használtam fel. E kamerarendszer működésének lényege, hogy a belvárosba vezető útszakaszokon elhelyezett zárt-láncú hálózatban működő kamerák (pl. az M1-M7

bevezető szakaszán, a Szerémi úton, stb.) rögzítik és tárolják a befelé tartó gépjárművek rendszámait. Ugyanilyen kamerák vannak elhelyezve a Duna-hidak előtt is, amelyek szintén rögzítik az ott elhaladó gépjárművek rendszámait. Ha a rendszer egyezést talál, akkor kiszámítja az eljutási időt (a két regisztráció idejének különbségéből), amit a belépő útszakaszokon elhelyezett VMS táblákon meg is jelenít, hogy ezzel segítse a gépjárművezetők döntéseit az útvonalválasztás tekintetében. Ez a rendszer a be- és kilépési helyeken nem csak rendszámmegfigyelést, és rögzítést végez, hanem forgalmi adatokat is meghatároz, mint a forgalomnagyság, vagy a foglaltság.

Ez számomra azért volt hasznos, mert a forgalomnagyság és a foglaltság értékekből az (1), (2) és a (3)-as egyenletek segítségével felírhatók a TTD és TTS értékek az egyes hálózatokra vonatkozóan.

3. A dél-budai alkalmazási példa

A fejezetben az irányítási terület egyes hálózatait mutatom be részletesen külön-külön, a hozzájuk tartozó NFD görbékkel, valamint modellegyenletekkel együtt, amelyek a szabályozás alapjául szolgálnak.

Az első alfejezetben beszámolok az egyes részhálózatok elhelyezkedéséről, valamint felírom a hálózatokat jellemző fundamentális (TTD-TTS) összefüggést. Ezen összefüggés meghatározását minden hálózat esetében egy-egy negyedfokú görbe segítségével végzem el a fentebb ismertetett módon számolt értékekre való illesztéssel.

A második alfejezetben az egyes rendszerek modellegyenleteit határozom meg, a munkám alapjául szolgáló modell alapján. Ezen alfejezet végén elvégzem az összevont modellegyenlet felírását is, amely segítségével a részhálózatokat egy rendszerként lehet figyelembe venni, ami elengedhetetlen fontossággal bír a szabályozó tervezésekor.

A harmadik alfejezetben a modell linearizációs egyenletek felírását, valamint ezek alapján az egyes hálózatok modellegyenleteinek linearizációját végzem el. Ezt követően pedig felírom az összevont rendszer lineáris modellegyenletét is.

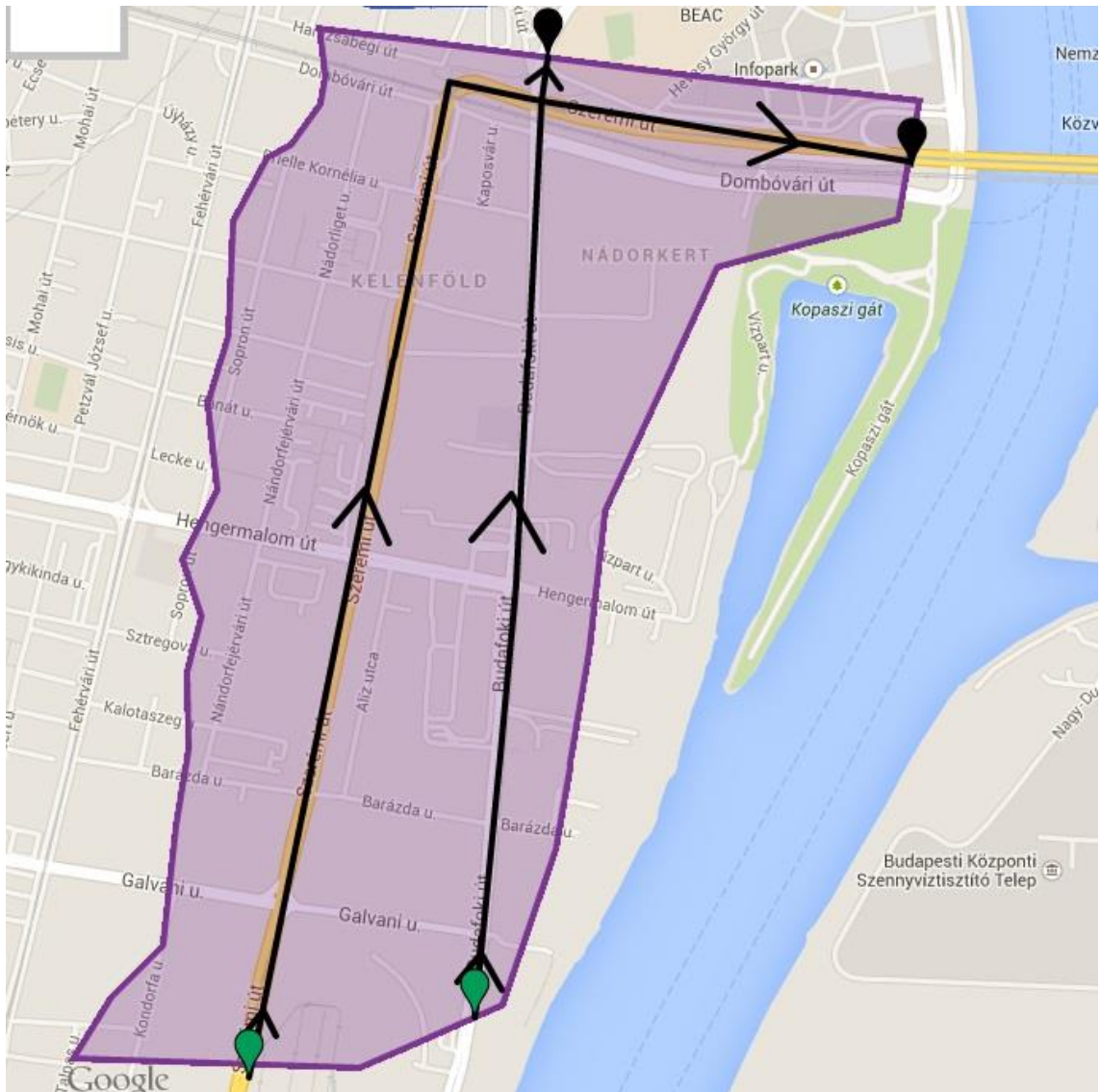
3.1 Hálózatok ismertetése

A hálózatok kialakításánál fontos szempont volt az irányítási cél, vagyis Budapest dél-budai, Duna-hidak felé, illetve a belváros felé haladó forgalmának a szabályozása. Az irányítási területet nem lehetséges egyetlen hálózat segítségével figyelembe venni, mivel az egyes területek különböző forgalomtechnikai tulajdonságokkal (sávszám, elhelyezett forgalomirányító berendezések száma, stb.) rendelkeznek, így az optimális irányítás nem végezhető el.

Az így kialakult egyes hálózatok között tehát kapcsolat kialakítása szükséges, hiszen csak így vonhatók össze egy rendszerbe. A hálózati kapcsolat kialakítását a gyakori közlekedési igények alapján alakítottam ki. Szabályozástechnikai szempontból pedig a kapcsolatot belső forgalmakként vettem figyelembe, vagyis amely forgalom az egyik hálózat esetében kilépő forgalomként jelentkezett, az a másikon belépőként fog.

3.1.1 Az 1. számú hálózat

Az első hálózat Kelenföldön fekszik és a Rákóczi-híd belváros felé haladó forgalmát szabályozza. A hálózat elhelyezkedését a 4. ábra mutatja.

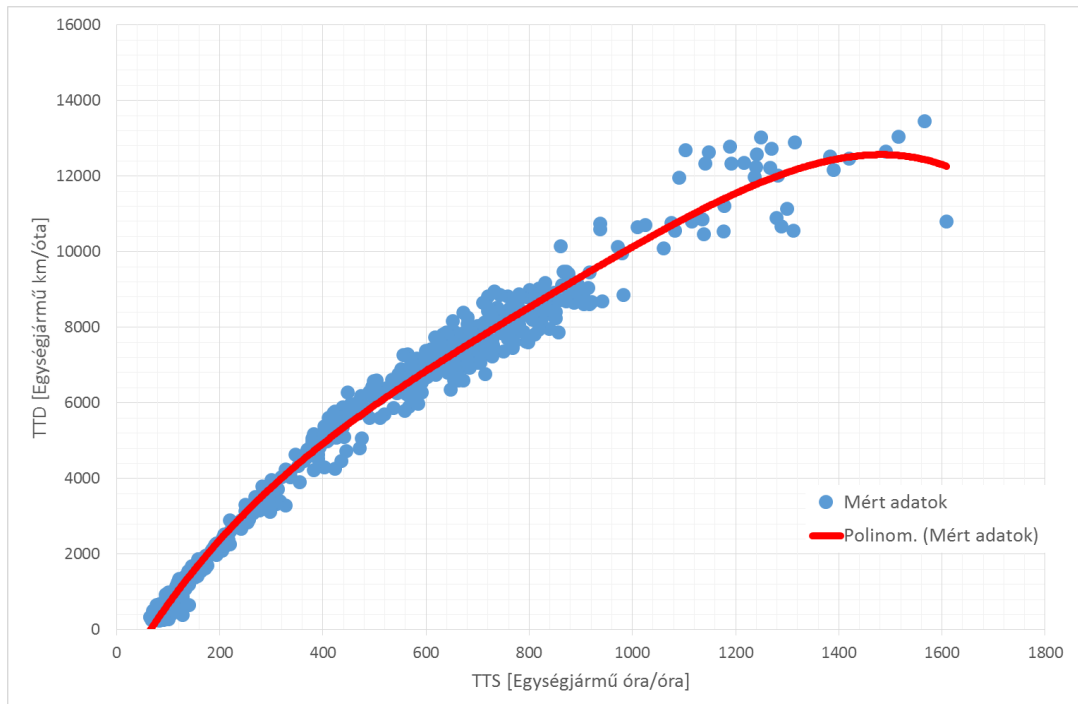


4. ábra: Az 1-es hálózat áttekintő térképe

A fenti ábrán látható, hogy az 1-es hálózat két darab szabályozott bemenettel (zöld jelölő), és két darab kimenettel (fekete jelölő) rendelkezik. Fontos megjegyezni, hogy a Budafoki úton elhelyezkedő kimenettel az 1-es hálózat kapcsolatba kerül a 3-as hálózattal, mivel az itt kilépő járművek a 3-as hálózaton bemenetként jelentkeznek.

A hálózaton figyelembe vett útszakaszok teljes hossza 4.617 km, míg átlagos hossza 0.355 km.

Az (1)-es, (2)-es, (3)-as és (4)-es egyenletek segítségével, az IC007-8-9 mérőhelyek adataiból meghatározott, 1-es hálózatra vonatkozó NFD görbét az 5. ábra szemlélteti.



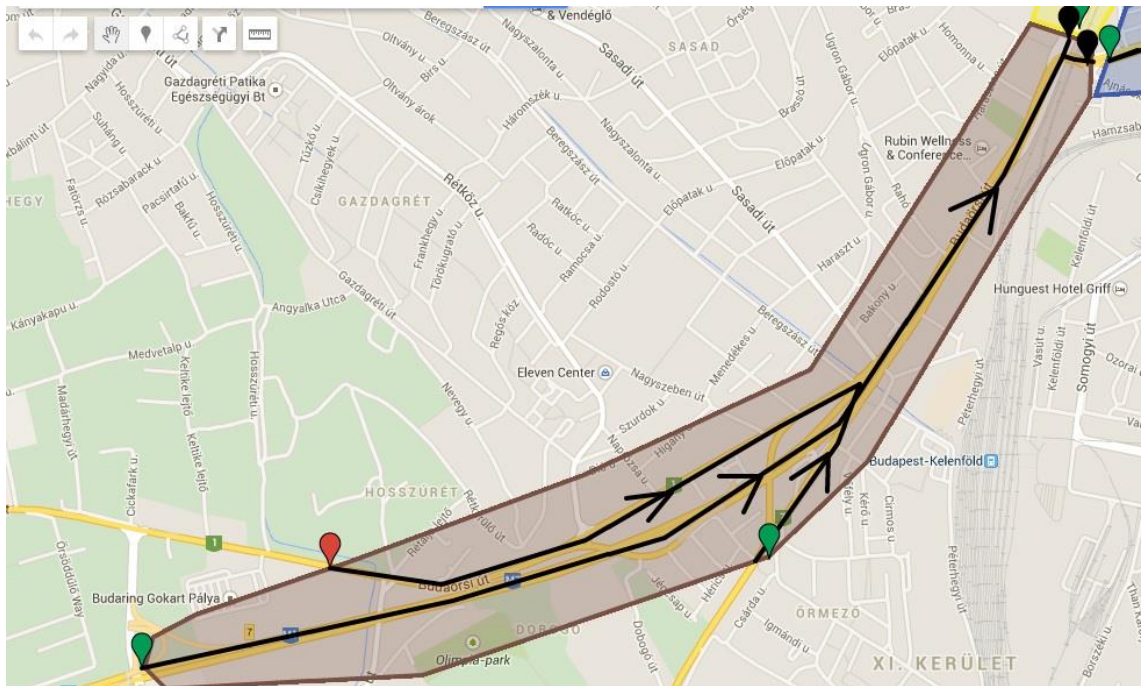
5. ábra: Az 1-es hálózatra vonatkozó NFD görbe (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

Az NFD görbe illesztéséhez egy hónap, vagyis 31 nap, óránkénti forgalmi adatait használtam fel, amely összesen 744 illesztési pontot jelent. A mérési pontokra fektetett, negyed-fokú polinom egyenlete a (13)-as egyenlet szerint alakult:

$$\begin{aligned}
 TTD_{PN1} = & -6 \cdot 10^{-9} TTS^4 + 2 \cdot 10^{-5} TTS^3 - 0.0263 TTS^2 \\
 & + 23.521 TTS - 1431.5
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

3.1.2 A 2. számú hálózat

A kettes hálózat az M1-M7 autópálya bevezető szakaszán, valamint a Budaörsi úton fekszik és a belváros felé áramló forgalmat szabályozza. A hálózat elhelyezkedését a 6. ábra mutatja.

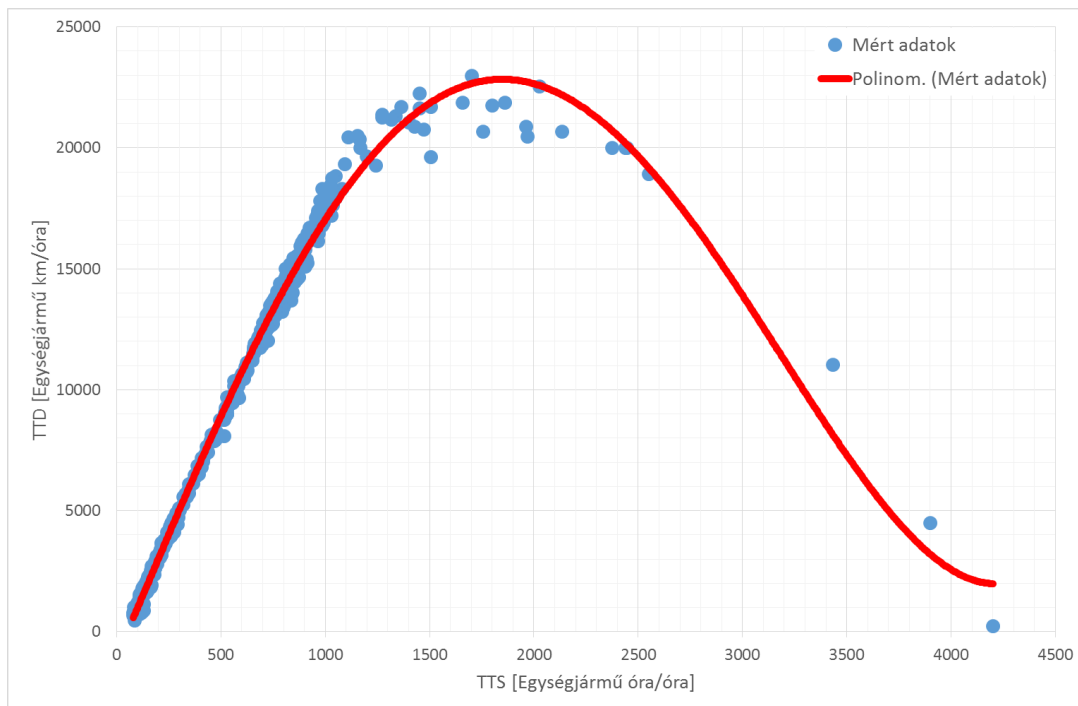


6. ábra: A 2-es hálózat áttekintő térképe

A fenti ábrán látható, hogy a 2-es hálózat két darab szabályozott bemenetet (zöld jelölő), egy szabályozatlan bemenetet (piros jelölő), és két darab kimenetet (fekete jelölő) tartalmaz. Fontos megjegyezni, hogy a Nagyszőlősi úton, és a Budaörsi úton elhelyezkedő kimenetekkel a 2-es hálózat kapcsolatba kerül a 3-as, és a 4-es hálózattal, mivel az itt kilépő járművek a 3-as, és 4-es hálózaton bemenetként jelentkeznek.

A hálózaton figyelembe vett útszakaszok teljes hossza 5.49 km, míg átlagos hossza 0.9 km.

Az (1)-es, (2)-es, (3)-as és (4)-es egyenletek segítségével, az IC001-2-3-4 mérőhelyek adataiból meghatározott, 2-es hálózatra vonatkozó NFD görbét a 7. ábra szemlélteti.



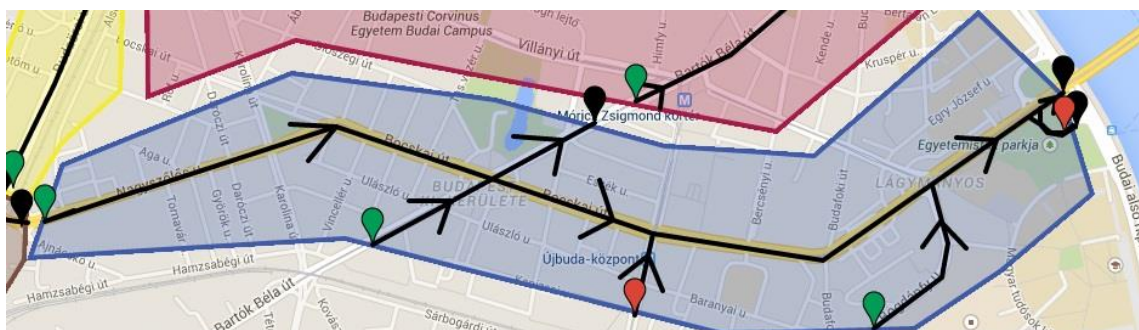
7. ábra: A 2-es hálózatra vonatkozó NFD görbe (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

Az NFD görbe illesztéséhez egy hónap, vagyis 31 nap, óránkénti forgalmi adatait használtam fel, amely összesen 744 pontot jelent. A mérési pontokra fektetett, negyedfokú polinom egyenlete a (14)-es egyenlet szerint alakult:

$$TTD_{PN2} = 6 \cdot 10^{-10} TTS^4 - 4 \cdot 10^{-6} TTS^3 + 0.0009 TTS^2 + 20.326 TTS - 1059.7 \quad (14)$$

3.1.3 A 3. számú hálózat

A hármas hálózat Újbuda-központban fekszik és a Petőfi-híd belváros felé áramló forgalmát irányítja. A hálózat elhelyezkedését 8. ábra mutatja.



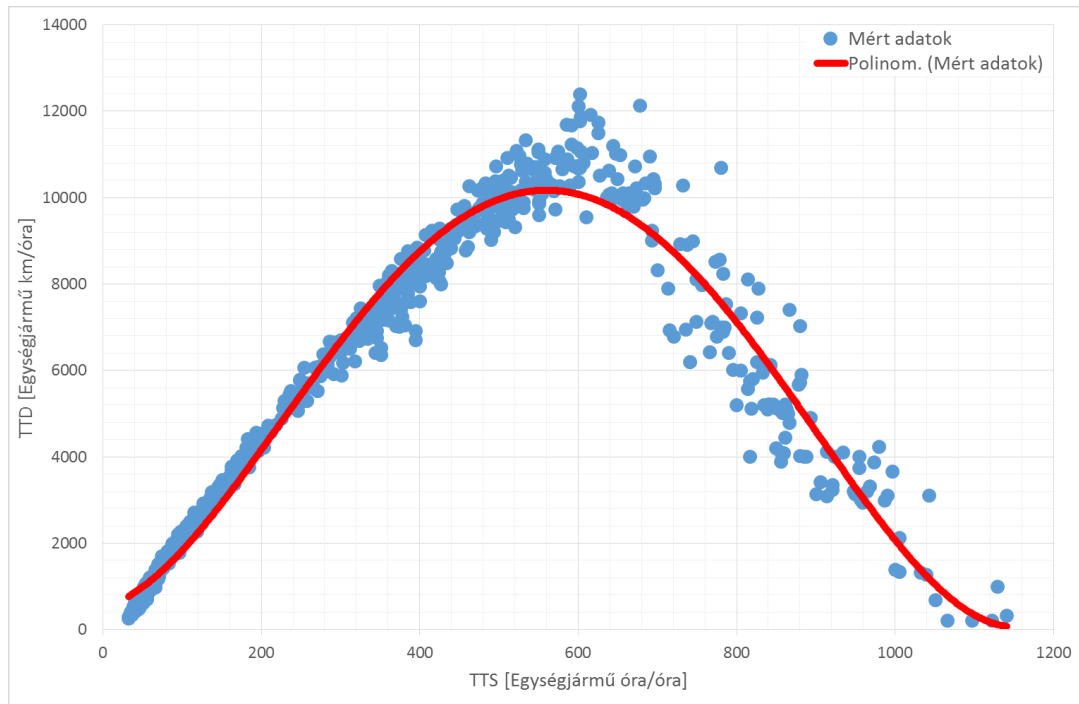
8. ábra: A 3-as hálózat áttekintő térképe

A fenti ábrán látható, hogy a 3-as hálózat (kék terület) három darab szabályozott bemenetet (zöld jelölő), két szabályozatlan bemenetet (piros jelölő), és három darab kimenetet tartalmaz (fekete jelölő). Fontos megjegyezni, hogy a Nagyszőlősi úton, és a

Budafoki úton elhelyezkedő bemeneteken a 3-as hálózat kapcsolatba kerül az 1-es, és a 2-es hálózattal, mivel az itt belépő járművek az 1-es, és 2-es hálózaton kimenetként szerepelnek. A 3-as hálózat a Bartók Béla úti kimenetén keresztül pedig szintén kapcsolatba kerül az ötös hálózattal, mivel az itt kilépő járművek az ötös hálózat esetében jelentkeznek bemenetként.

A hálózaton figyelembe vett útszakaszok teljes hossza 4.663 km, míg átlagos hossza 0.172 km.

Az (1)-es, (2)-es, (3)-as és (4)-es egyenletek segítségével, az IC017 mérőhely adataiból meghatározott, 3-as hálózatra vonatkozó NFD görbét a 9. ábra szemlélteti.



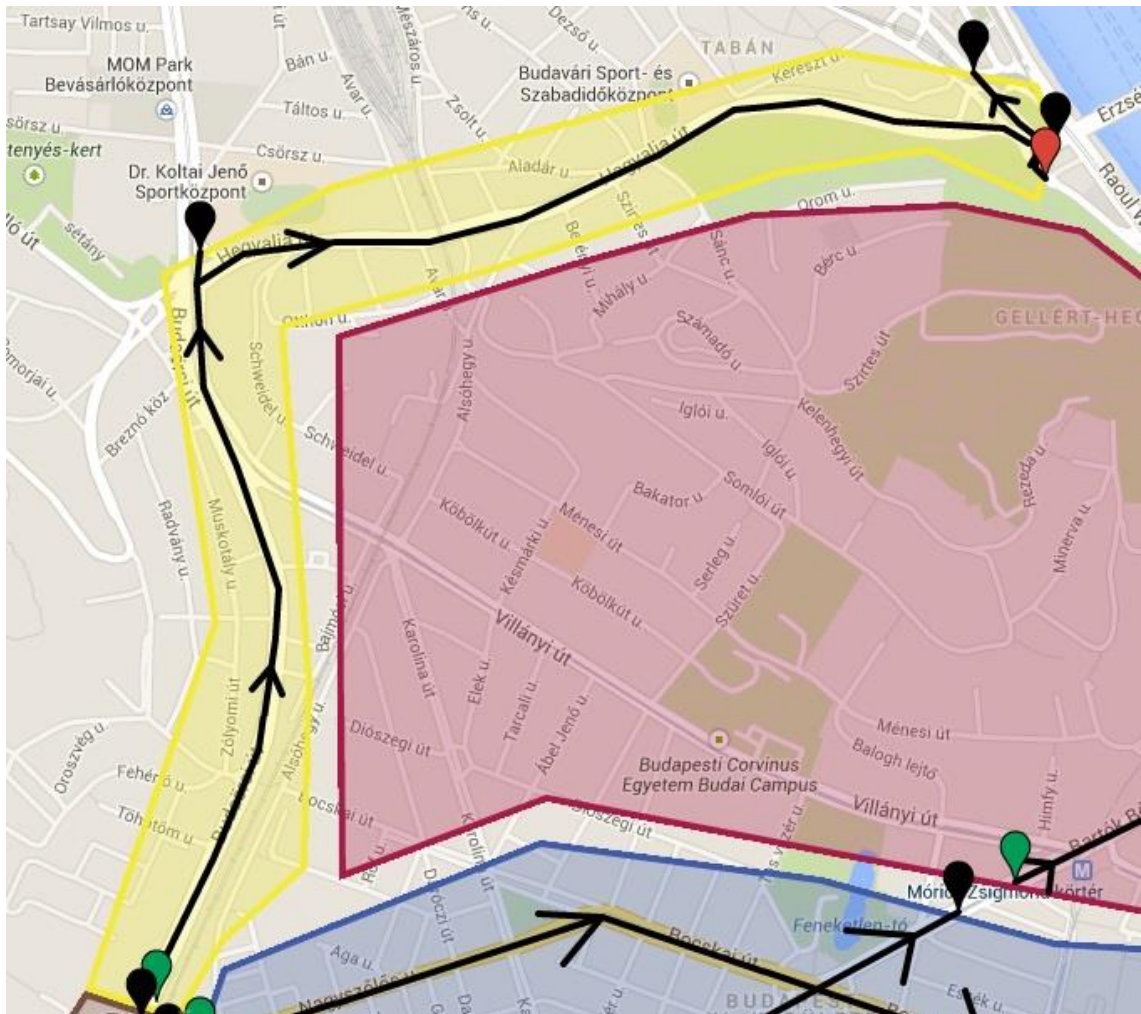
9. ábra: A 3-as hálózatra vonatkozó NFD görbe (saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

Az NFD görbe illesztéséhez 1 hónap, vagyis 31 nap, óránkénti forgalmi adatait használtam fel, amely összesen 744 pontot jelent. A mérési pontokra fektetett, negyedfokú polinom egyenlete a (15)-ös egyenlet szerint alakult:

$$TTD_{PN3} = 8 \cdot 10^{-8} TTS^4 - 0.0002 TTS^3 + 0.1017 TTS^2 + 4.7379 TTS + 519.01 \quad (15)$$

3.1.4 A 4. számú hálózat

A négyes hálózat a Budaörsi és a Hegyalja utat foglalja magában, így az Erzsébet-híd belváros felé áramló forgalmát szabályozza. A hálózat elhelyezkedését a 10. ábra szemlélteti.

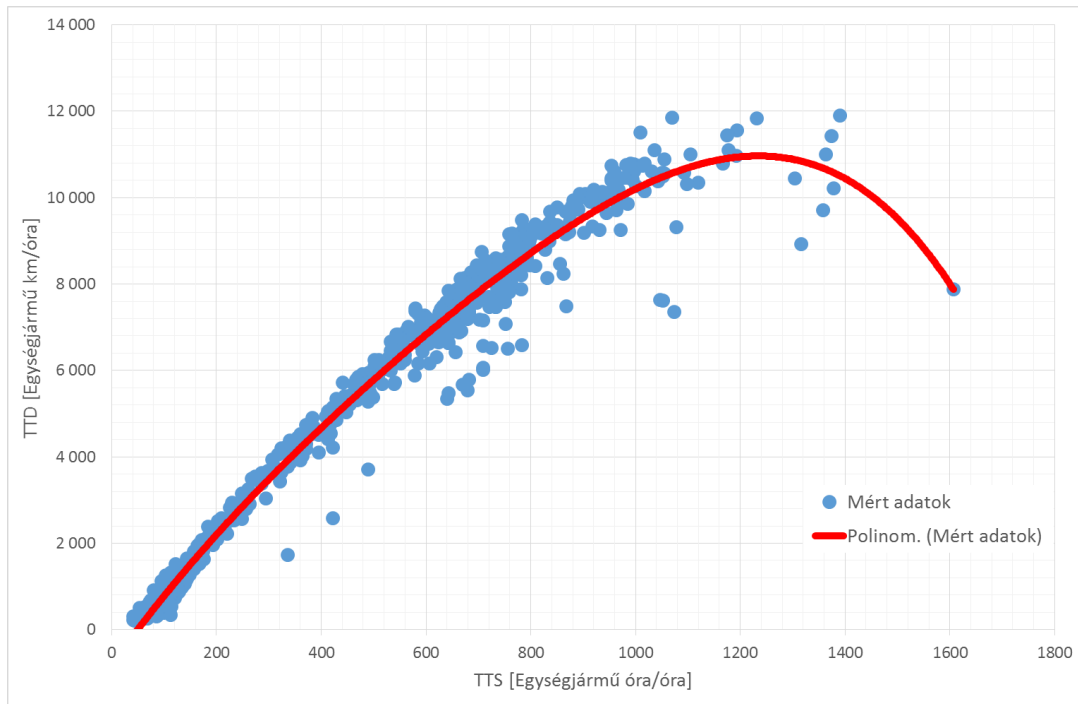


10. ábra: A 4-es hálózat áttekintő térképe

A fenti ábrán látható, hogy a 4-es hálózat (sárga terület) egy darab szabályozott bemenetet (zöld jelölő), egy szabályozatlan bemenetet (piros jelölő), és három darab kimenetet tartalmaz (fekete jelölő). Fontos megjegyezni, hogy a Budafoki úton elhelyezkedő bemeneten a 4-es hálózat kapcsolatba kerül a 2-es hálózattal, mivel az itt belépő járművek a 2-es hálózaton kimenetként szerepelnek.

A hálózaton figyelembe vett útszakaszok teljes hossza 3.8 km, míg átlagos hossza 0.316 km.

Az (1)-es, (2)-es, (3)-as és (4)-es egyenletek segítségével, az IC018 mérőhely adataiból meghatározott, 4-es hálózatra vonatkozó NFD görbét a 11. ábra szemlélteti.



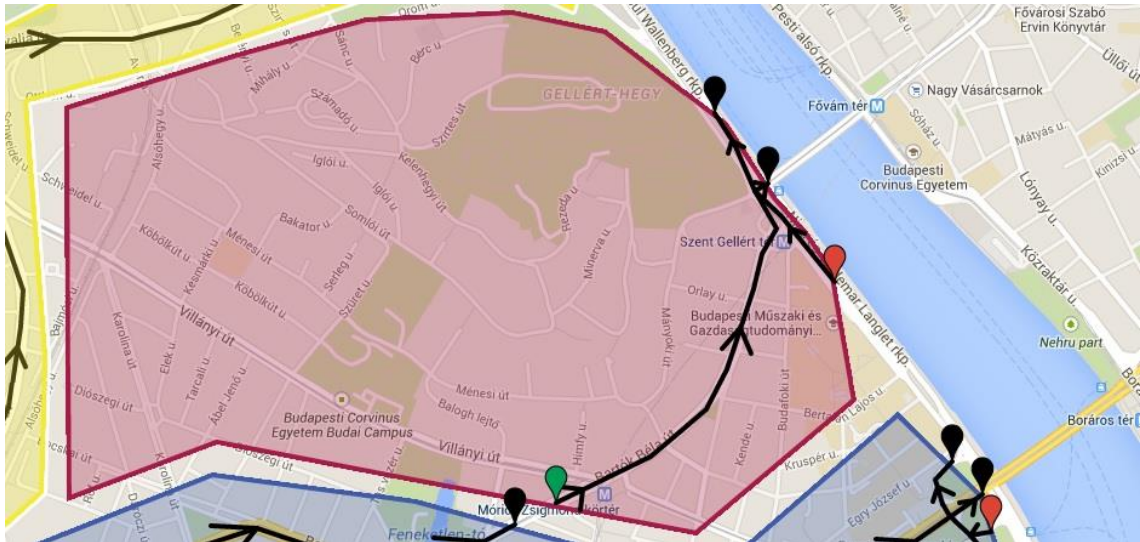
11. ábra: A 4-es hálózatra vonatkozó NFD görbe (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

Az NFD görbe illesztéséhez egy hónap, vagyis 31 nap, óránkénti forgalmi adatait használtam fel, amely összesen 744 pontot jelent. A mérési pontokra fektetett, negyedfokú polinom egyenlete a (16)-os egyenlet szerint alakult:

$$\begin{aligned}
 TTD_{PN4} = & -5 \cdot 10^{-9} TTS^4 + 10^{-5} TTS^3 - 0.0117 TTS^2 \\
 & + 17.011 TTS - 813.25
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

3.1.5 Az 5. számú hálózat

Az ötödik hálózat a Bartók Béla úton fekszik és a Szabadság-híd belváros felé haladó forgalmát szabályozza. A hálózat elhelyezkedését a 12. ábra mutatja.

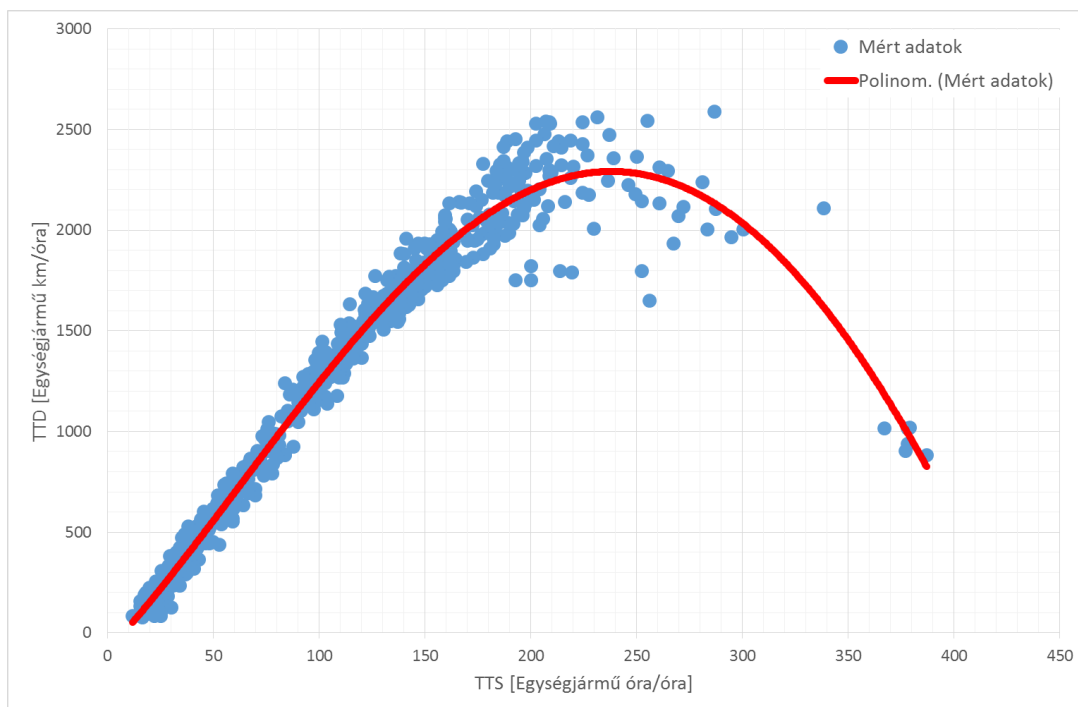


12. ábra: Az 5-ös hálózat áttekintő térképe

A fenti ábrán látható, hogy az 5-ös hálózat (rózsaszín terület) egy darab szabályozott bemenetet (zöld jelölő), egy szabályozatlan bemenetet (piros jelölő), és két darab kimenetet tartalmaz (fekete jelölő). Fontos megjegyezni, hogy a Bartók Béla úton elhelyezkedő bemeneten az 5-ös hálózat kapcsolatba kerül a 3-es hálózattal, mivel az itt belépő járművek a 3-as hálózaton kimenetként szerepelnek.

A hálózaton figyelembe vett útszakaszok teljes hossza 1.559 km, míg átlagos hossza 0.11 km.

Az (1)-es, (2)-es, (3)-as és (4)-es egyenletek segítségével, az IC019 mérőhely adataiból meghatározott, 5-ös hálózatra vonatkozó NFD görbét a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra: Az 5-ös hálózatra vonatkozó NFD görbe (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

Az NFD görbe illesztéséhez egy hónap, vagyis 31 nap, óránkénti forgalmi adatait használtam fel, amely összesen 744 pontot jelent. A mérési pontokra fektetett, negyedfokú polinom egyenlete a (17)-es egyenlet szerint alakult:

$$TTD_{PN5} = 2 \cdot 10^{-7} TTS^4 - 0.0003TTS^3 + 0.044TTS^2 + 11.336TTS - 87.15 \quad (17)$$

3.2 Modellegyenletek

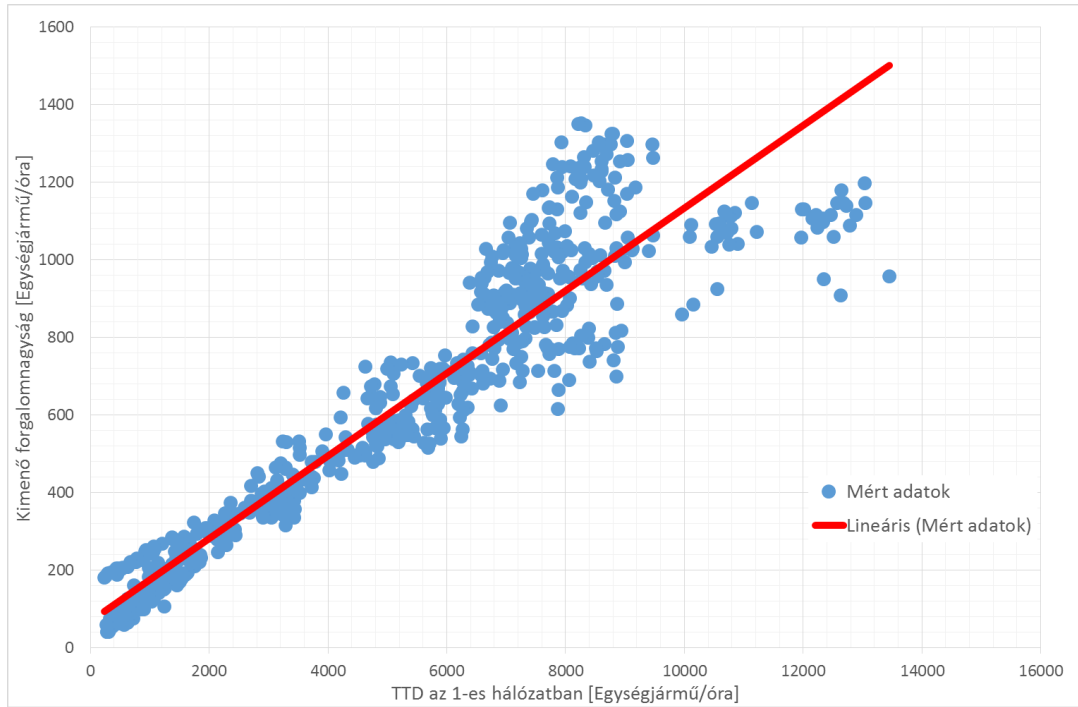
Ebben a részben a **3.1** fejezetben bemutatott általános modellegyenleteknek megfelelően írom fel az irányítási területekre vonatkozó modellegyenleteket. Ezt követően pedig a **3.2** alfejezetben leírt általános állapotter modelleket, illetve a **3.3** pontban leírt rendszerváltozókat határozom meg az irányítási hálózatokra vonatkozóan. Az állapotter modell felírása a (9)-es egyenlet alapján, míg a rendszerváltozók a (10)-es, (11)-es és (12)-es egyenletek alapján kerülnek felírásra.

Az általam használt modellben egyszerűsítéssel éltem a kiinduló modellhez képest, mégpedig azzal, hogy a szabályozott bemenetek (kapuk) előtt kialakuló sorhosszak szabályozását nem tekintem irányítási célnak. Ez azonban nem komolyabb elhanyagolás, mivel a belső kapcsolatokkal rendelkező hálózatok esetében a szabályozott kapuk előtt kialakuló esetleges sorhossz visszahat, részét képezi azon hálózatban tartózkodó járművek számának, ahonnan a járművek igyekeznek kilépni. Így ezen járművek szerepelnek a kilépő hálózat modellegyenletében, amely viszont már a szabályozás részét képezi.

A modellegyenletek felírását az egyes hálózatok közötti kapcsolatok feltüntetésével végzem el.

3.2.1 Az 1. számú hálózat

Az (5)-ös egyenlet alapján az első hálózat kilépési arányának (Γ) meghatározásához felírtam a hálózaton belül megtett összes távolság (TTD) és a hálózathoz kilépő forgalom nagyság (q_{ki}) közötti lineáris összefüggést, amelyet a 14. ábra mutat.



14. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között az 1-es hálózatban (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

A lineáris összefüggést a (18)-as egyenletben írtam fel.

$$q_{ki} = 0.1063TTD + 70.263 \quad (18)$$

Felhasználva az (5)-ös egyenletben szereplő összefüggést a következő kifejezés adódik a Γ értékére az 1-es hálózatban.

$$\Gamma_1 = 0.0377T_S + \frac{24.943365T_S}{TTD_{PN1}} \quad (19)$$

Az 1-es hálózat állapotter modelljének felírását a 4. ábra, illetve a 3.4.1 fejezet segítségével végeztem el. Ennek megfelelően az 1-es hálózat állapotter modellje a (20)-as egyenlet szerint alakul.

$$\begin{aligned} N_{PN1}(k+1) &= N_{PN1}(k) - T_S \cdot \frac{\Gamma_1}{L_1} \cdot F(N_{PN1}(k)) + T_S \cdot \sum_{j=1}^2 q_{in,1,j}(k) = \\ &= f_1(x, u, d) \end{aligned} \quad (20)$$

Az 1-es hálózatra vonatkozó állapotváltozó a (21)-es egyenlet szerint alakul.

$$x_1(k) = N_{PN1}(k) \in \mathfrak{R} \quad (21)$$

Az 1-es hálózaton jelentkező zavarás a (22)-es egyenletnek megfelelően írható fel.

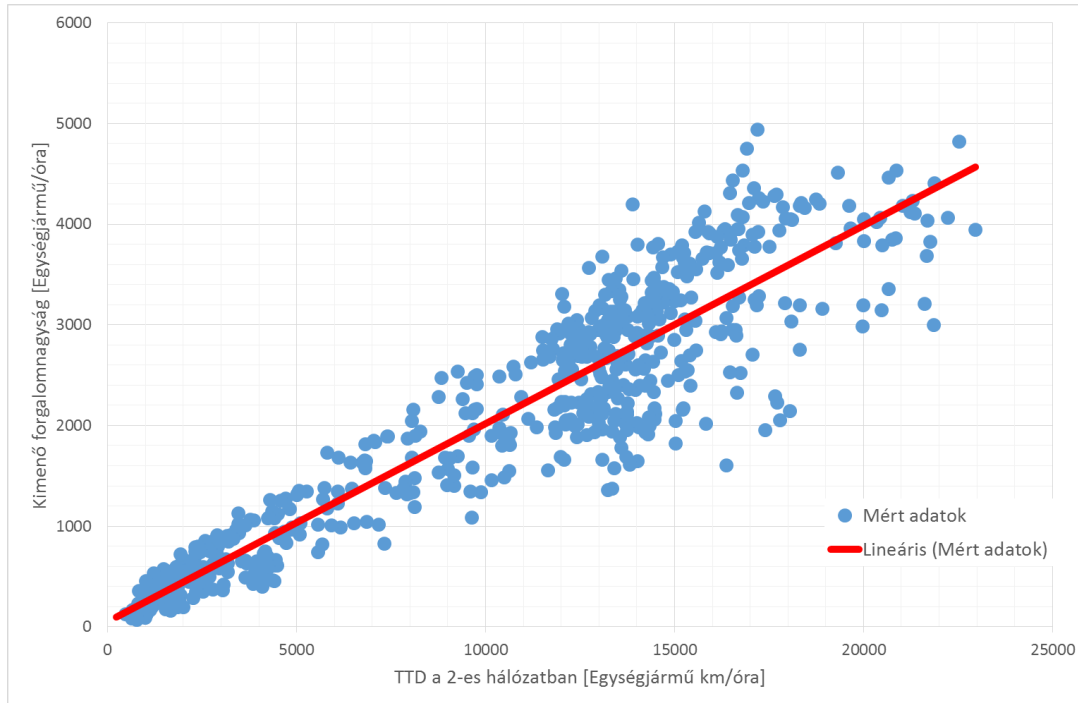
$$d_1(k) = 0 \quad (22)$$

Az 1-es hálózatra vonatkozó bemenő vektor pedig a (23)-as egyenletben van felírva.

$$u_1(k) = \begin{pmatrix} q_{in,1,1}(k) \\ q_{in,1,2}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^2 \quad (23)$$

3.2.2 A 2. számú hálózat

Az (5)-ös egyenlet alapján a második hálózat kilépési arányának (Γ) meghatározásához felírtam a hálózaton belüli összes utazási távolság (TTD) és a hálózattól kilépő forgalom nagyság (q_{ki}) közötti lineáris összefüggést, amelyet a 15. ábra mutat.



15. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között a 2-es hálózatban (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

A lineáris összefüggést a (24)-es egyenletben írtam fel.

$$q_{ki} = 0.1966TTD + 53.789 \quad (24)$$

Felhasználva az (5)-ös egyenletben szereplő összefüggést a következő kifejezés adódik a Γ értékére a 2-es hálózatban.

$$\Gamma_2 = 0.17694T_S + \frac{48.4101T_S}{TTD_{PN2}} \quad (25)$$

A 2-es hálózat állapotter modelljének felírását a 6. ábra, illetve a **3.4.2** fejezet segítségével végeztem el. Ennek megfelelően a 2-es hálózat állapotter modellje a (26)-os egyenlet szerint alakul.

$$\begin{aligned}
 N_{PN2}(k+1) &= N_{PN2}(k) - T_S \cdot \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot F(N_{PN2}(k)) + \\
 T_S \cdot \sum_{j=1}^2 q_{in,2,j}(k) &+ T_S \cdot \bar{q}_{d,2,1}(k) = f_2(x, u, d)
 \end{aligned} \tag{26}$$

A 2-es hálózatra vonatkozó állapotváltozót a (27)-es egyenlet írja fel.

$$x_2(k) = N_{PN2}(k) \in \mathfrak{R} \tag{27}$$

A 2-es hálózaton jelentkező zavarás a (28)-as egyenletnek megfelelően írható fel.

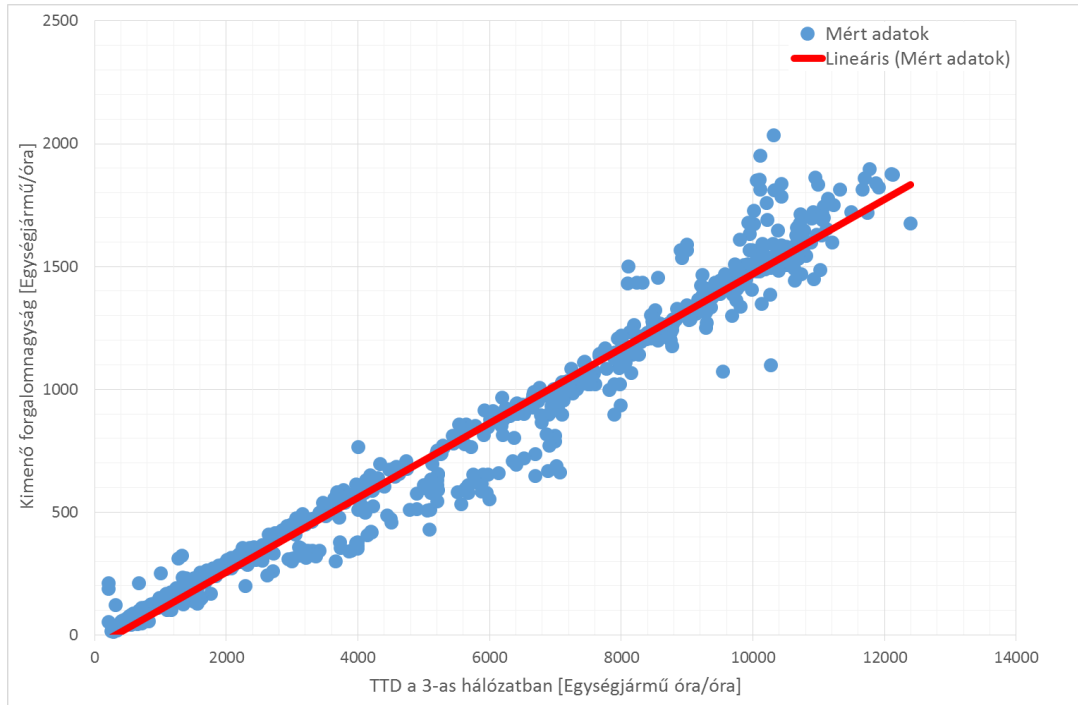
$$d_2(k) = \bar{q}_{d,2,1}(k) \in \mathfrak{R} \tag{28}$$

A 2-es hálózatra vonatkozó bemenő vektor pedig a (29)-es egyenletben van felírva.

$$u_2(k) = \begin{pmatrix} q_{in,2,1}(k) \\ q_{in,2,2}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^2 \tag{29}$$

3.2.3 A 3. számú hálózat

Az (5)-ös egyenlet alapján a hármas hálózat kilépési arányának (Γ) meghatározásához felírtam a hálózaton belüli összes utazási távolság (TTD) és a hálózathól kilépő forgalom nagyság (q_{ki}) közötti lineáris összefüggést, amelyet a 16. ábra mutat.



16. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között a 3-as hálózatban (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

A lineáris összefüggést a (30)-as egyenletben írtam fel.

$$q_{ki} = 0.1517TTD - 46.874 \quad (30)$$

Felhasználva az (5)-ös egyenletben szereplő összefüggést a következő kifejezés adódik a Γ értékére a 3-as hálózatban.

$$\Gamma_3 = 0.026T_S - \frac{8.062328T_S}{TTD_{PN3}} \quad (31)$$

A 3-as hálózat állapotter modelltjének felírását a 8. ábra, illetve a 3.4.3 fejezet segítségével végeztem el. Ennek megfelelően a 3-as hálózat állapotter modelltje a (32)-es egyenlet szerint alakul.

$$N_{PN3}(k+1) = N_{PN3}(k) - T_S \cdot \frac{\Gamma_3}{L_3} \cdot F(N_{PN3}(k)) + T_S \cdot \sum_{j=1}^3 q_{in,3,j}(k) + \sum_{j=1}^2 T_S \cdot \bar{q}_{d,3,j}(k) = f_3(x, u, d) \quad (32)$$

A 3-as hálózatra vonatkozó állapotváltozót a (33)-as egyenlet írja le.

$$x_3(k) = N_{PN3}(k) \in \mathfrak{R} \quad (33)$$

A 3-as hálózaton jelentkező zavarás a (34)-es egyenletnek megfelelően írható fel.

$$d_3(k) = \begin{pmatrix} \bar{q}_{d,3,1}(k) \\ \bar{q}_{d,3,2}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^2 \quad (34)$$

A 3-as hálózatra vonatkozó bemenő vektor pedig a (35)-ös egyenletben van felírva.

$$u_3(k) = \begin{pmatrix} q_{in,3,1}(k) \\ q_{in,3,2}(k) \\ q_{in,3,3}(k) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^3 \quad (35)$$

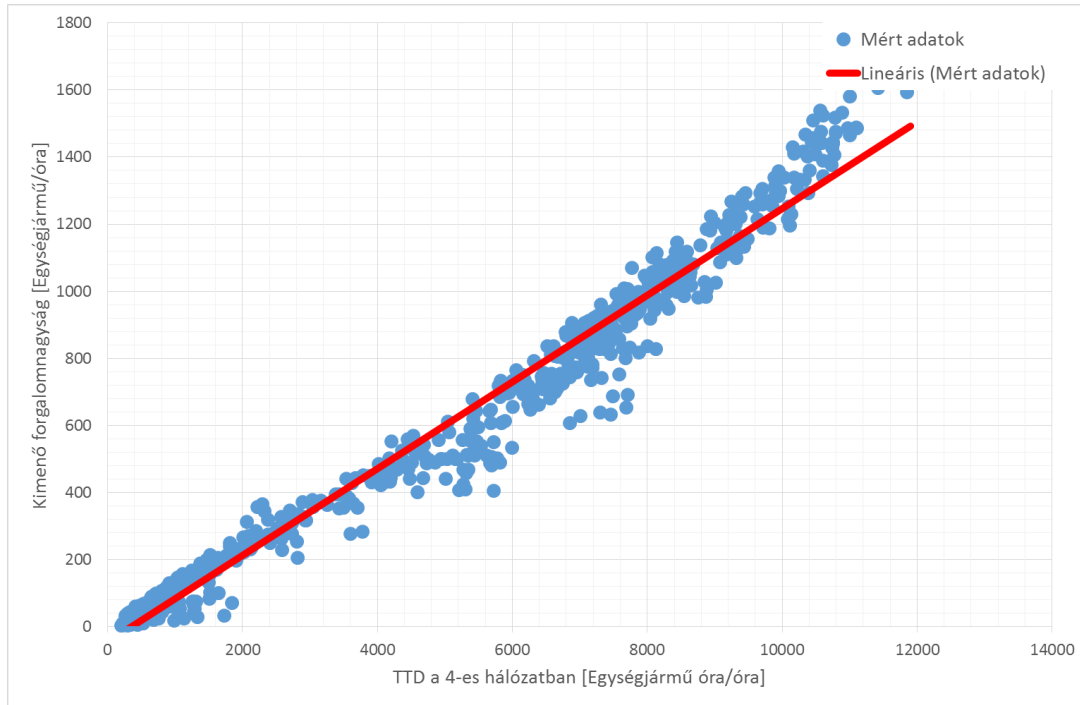
Mivel a 3-as hálózat a bemenetein keresztül kapcsolatban áll mind az 1-es, mind pedig a 2-es hálózat kimenetével, ezért az $u_3(k)$ bemeneti vektor a (36)-os egyenlet szerint írható fel:

$$u_3(k) = \begin{pmatrix} q_{ki2,2}(k) \\ q_{in,3,2}(k) \\ q_{ki1,1}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot F(N_{PN2}(k)) \\ q_{in,3,2} \\ \frac{\Gamma_1}{L_1} \cdot F(N_{PN1}(k)) \end{pmatrix} \in \mathfrak{R}^3 \quad (36)$$

ahol $q_{ki2,2}(k)$ a második hálózat 2-es kimeneti kapuján kilépő forgalomnagyságot jelöli, amely a Nagyszőlősi úton helyezkedik el, míg $q_{ki1,1}(k)$ az első hálózat 1-es kimeneti kapuján kilépő forgalomnagyságot jelöli, amely pedig a Budafoki úton helyezkedik el.

3.2.4 A 4. számú hálózat

Az (5)-ös egyenlet alapján a negyedik hálózat kilépési arányának (Γ) meghatározásához felírtam a hálózaton belüli összes utazási távolság (TTD) és a hálózattól kilépő forgalomnagyság (q_{ki}) közötti lineáris összefüggést, amelyet a 17. ábra mutat.



17. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között a 4-es hálózatban (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

A lineáris összefüggést a (37)-es egyenletben írtam fel.

$$q_{ki} = 0.1292TTD - 45.231 \quad (37)$$

Felhasználva az (5)-ös egyenletben szereplő összefüggést a következő kifejezés adódik a Γ értékére a 4-es hálózatban.

$$\Gamma_4 = 0.04091764T_S - \frac{14.324T_S}{TTD_{PN4}} \quad (38)$$

A 4-es hálózat állapotter modelljének felírását a 10. ábra, illetve a 3.4.4 fejezet segítségével végeztem el. Ennek megfelelően a 4-es hálózat állapotter modellje a (39)-es egyenlet szerint alakul.

$$N_{PN4}(k+1) = N_{PN4}(k) - T_S \cdot \frac{\Gamma_4}{L_4} \cdot F(N_{PN4}(k)) + T_S \cdot q_{in,4,1}(k) + T_S \cdot \bar{q}_{d,4,1}(k) = f_4(x, u, d) \quad (39)$$

A 4-es hálózatra vonatkozó állapotváltozó a (40)-es egyenlet szerint alakul.

$$x_4(k) = N_{PN4}(k) \in \mathfrak{R} \quad (40)$$

A 4-es hálózaton jelentkező zavarás a (41)-es egyenletnek megfelelően írható fel.

$$d_4(k) = \bar{q}_{d,4,1}(k) \in \mathfrak{R} \quad (41)$$

A 4-es hálózatra vonatkozó bemenő vektor pedig a (42)-es egyenletben van felírva.

$$u_4(k) = q_{in,4,1}(k) \in \mathfrak{R} \quad (42)$$

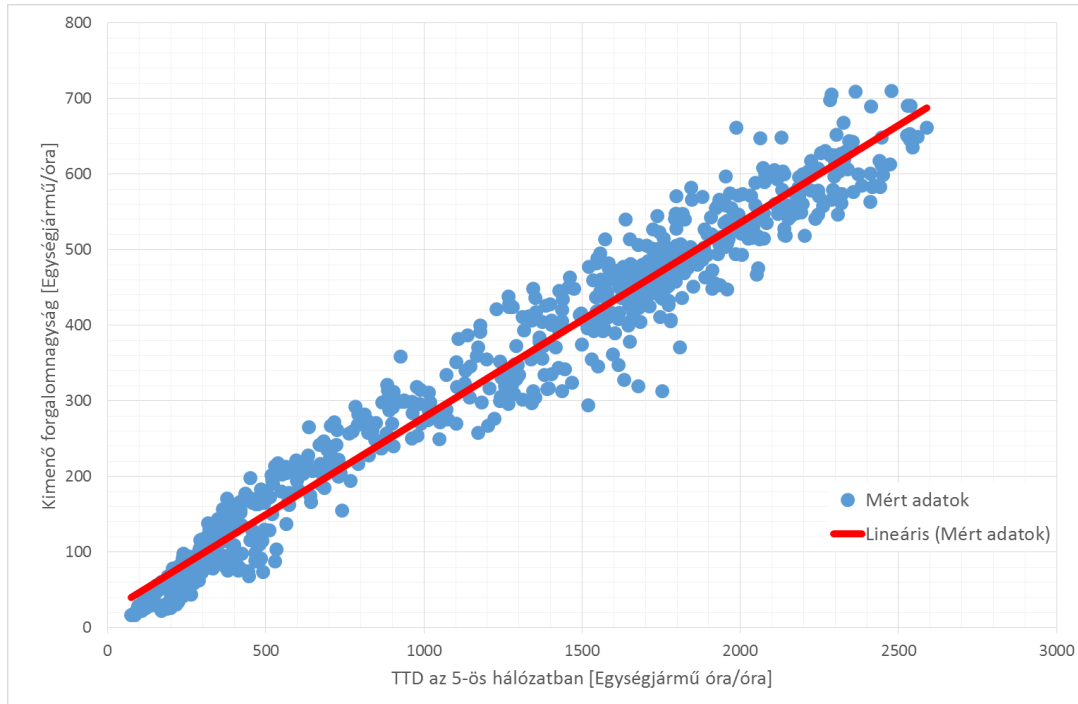
Mivel a 4-es hálózat a bemenetén keresztül kapcsolatban áll a 2-es hálózat kimenetével, ezért az $u_4(k)$ bemeneti vektor a (43)-as egyenlet szerint írható fel:

$$u_4(k) = q_{ki,2,1}(k) = \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot F(N_{PN2}(k)) \in \mathfrak{R} \quad (43)$$

ahol $q_{ki,2,1}(k)$ a második hálózat 1-es kimeneti kapuján kilépő forgalom nagyságát jelöli, amely a Budaörsi úton helyezkedik el.

3.2.5 Az 5. számú hálózat

Az (5)-ös egyenlet alapján az ötödik hálózat kilépési arányának (Γ) meghatározásához felírtam a hálózaton belüli összes utazási idő (TTD) és a hálózathoz kilépő forgalom nagyság (q_{ki}) közötti lineáris összefüggést, amelyet a 18. ábra mutat.



18. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között az 5-ös hálózatban (forrás: saját szerkesztés a BKK Közút Zrt. által szolgáltatott adatok alapján)

A lineáris összefüggést a (44)-es egyenletben írtam fel.

$$q_{ki} = 0.2575TTD + 20.2 \quad (44)$$

Felhasználva az (5)-ös egyenletben szereplő összefüggést a következő kifejezés adódik a Γ értékére az 5-ös hálózatban.

$$\Gamma_5 = 0.0306544T_S + \frac{2.4038T_S}{TTD_{PN5}} \quad (45)$$

Az 5-ös hálózat állapotter modelljének felírását a 12. ábra, illetve a **3.4.5** fejezet segítségével végeztem el. Ennek megfelelően az 5-ös hálózat állapotter modellje a (46)-os egyenlet szerint alakul.

$$\begin{aligned} N_{PN5}(k+1) &= N_{PN5}(k) - T_S \cdot \frac{\Gamma_5}{L_5} \cdot F(N_{PN5}(k)) + \\ &T_S \cdot q_{in,5,1}(k) + T_S \cdot \bar{q}_{d,5,1}(k) = f_5(x, u, d) \end{aligned} \quad (46)$$

Az 5-ös hálózatra vonatkozó állapotváltozó a (47)-es egyenlet szerint alakul.

$$x_5(k) = N_{PN5}(k) \in \mathfrak{R} \quad (47)$$

Az 5-ös hálózaton jelentkező zavarás a (48)-as egyenletnek megfelelően írható fel.

$$d_5(k) = \bar{q}_{d,5,1}(k) \in \mathfrak{R} \quad (48)$$

Az 5-ös hálózatra vonatkozó bemenő vektor pedig a (49)-es egyenletben van felírva.

$$u_5(k) = q_{in,5,1}(k) \in \mathfrak{R} \quad (49)$$

Az 5-ös hálózat a bemenetén keresztül kapcsolatban áll a 3-as hálózat kimenetével, így az $u_5(k)$ bemeneti vektor az (50)-es egyenlet szerint írható fel:

$$u_5(k) = q_{ki,3,1}(k) = \frac{\Gamma_3}{L_3} \cdot F(N_{PN3}(k)) \in \mathfrak{R} \quad (50)$$

ahol $q_{ki,3,1}(k)$ a harmadik hálózat 1-es kimeneti kapuján kilépő forgalomnagyságot jelöli, amely a Bartók Béla úton helyezkedik el.

3.2.6 Összevont, nemlineáris modellegyenlet

Az előzőekben ismertetett hálózatokból képzett összevont rendszert leíró modellegyenletet az (51)-es egyenlet tartalmazza.

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} N_{PN1}(k+1) \\ N_{PN2}(k+1) \\ N_{PN3}(k+1) \\ N_{PN4}(k+1) \\ N_{PN5}(k+1) \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} N_{PN1}(k) - T_S \frac{\Gamma_1}{L_1} F(N_{PN1}(k)) \\ N_{PN2}(k) - T_S \frac{\Gamma_2}{L_2} F(N_{PN2}(k)) \\ N_{PN3}(k) - T_S \frac{\Gamma_3}{L_3} F(N_{PN3}(k)) + \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot F(N_{PN2}(k)) + \frac{\Gamma_1}{L_1} \cdot F(N_{PN1}(k)) \\ N_{PN4}(k) - T_S \frac{\Gamma_4}{L_4} F(N_{PN4}(k)) + \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot F(N_{PN2}(k)) \\ N_{PN5}(k) - T_S \frac{\Gamma_5}{L_5} F(N_{PN5}(k)) + \frac{\Gamma_3}{L_3} \cdot F(N_{PN3}(k)) \end{bmatrix} \quad (51) \\
& + \begin{bmatrix} T_S \cdot \sum_{j=1}^2 q_{in,1,j}(k) \\ T_S \cdot \sum_{j=1}^2 q_{in,2,j}(k) \\ T_S \cdot q_{in,3,2}(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T_S \cdot \bar{q}_{d,2,1}(k) \\ T_S \cdot \sum_{j=1}^2 \bar{q}_{d,3,j}(k) \\ T_S \cdot \bar{q}_{d,4,1}(k) \\ T_S \cdot \bar{q}_{d,5,1}(k) \end{bmatrix} = f_{teljes}(x, u, d)
\end{aligned}$$

Az (51)-es egyenletekben használt jelölések megegyeznek az eddigiekben használtakkal. Tehát látható, hogy az összevont rendszer öt állapotú. Ezt mutatja az összevont modellre vonatkozó állapotegyenlet (52).

$$x_{teljes} = \begin{bmatrix} N_{PN1}(k) \\ N_{PN2}(k) \\ N_{PN3}(k) \\ N_{PN4}(k) \\ N_{PN5}(k) \end{bmatrix} \quad (52)$$

Az összevont rendszer esetében a hálózatok közötti bemenetek belső forgalmakként lettek figyelembe véve, így az összevont rendszer bemenő vektora az (53)-as egyenlet szerint alakul.

$$u_{teljes} = \begin{bmatrix} q_{in,1,1}(k) \\ q_{in,1,2}(k) \\ q_{in,2,1}(k) \\ q_{in,2,2}(k) \\ q_{in,3,2}(k) \end{bmatrix} \quad (53)$$

Az összevont rendszer esetében jelentkező zavarást az (54)-es egyenlet szerint lehet felírni.

$$d_{teljes} = \begin{bmatrix} \bar{q}_{d,2,1}(k) \\ \bar{q}_{d,3,1}(k) \\ \bar{q}_{d,3,2}(k) \\ \bar{q}_{d,4,1}(k) \\ \bar{q}_{d,5,1}(k) \end{bmatrix} \quad (54)$$

Ezzel az összevont, nem lineáris rendszer előállt, amely alapján a szabályozás tervezhető.

3.3 Modell linearizálása

A makroszkopikus forgalmi modell egy nemlineáris, időinvariáns rendszer (NLTI). Ahhoz, hogy egy lineáris, időinvariáns (LTI) rendszerre alkalmazható szabályozást lehessen tervezni, linearizálni kell a szabályozni kívánt rendszert leíró egyenleteket. A fent leírtak miatt a tervezett makroszkopikus modellen munkapont körüli linearizálást végeztem el.

A munkapontok körüli linearizálás során a nemlineáris $f(x)$ függvényt Taylor-sorral közelítjük az (55)-ös egyenletnek megfelelően.

$$f(x^* + \Delta) \approx f(x^*) + \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (55)$$

A centrált rendszer a munkapont (x^*) környezetében lineárisnak tekinti a rendszert, és a $\Delta(k)$ -val jellemzi a dinamikát, amit az (56)-os egyenlet mutat.

$$\Delta(k) = x(k) - x^*(k) \quad (56)$$

A nemlineáris állapotdinamikai egyenletet az (57)-es egyenlet mutatja.

$$x(k+1) \approx f(x^*) + \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (57)$$

A centrált állapotdinamikát az (58)-as egyenlet mutatja.

$$x(k+1) = x^*(k+1) + \Delta(k+1) \quad (58)$$

A munkapontban kialakult állapotdinamikát az (59)-es egyenlet mutatja.

$$x^*(k) = f(x^*) \quad (59)$$

Az (57) és (58) egyenletek miatt

$$x^*(k+1) + \Delta(k+1) = f(x^*) + \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (60)$$

Az (59)-es egyenlet miatt pedig

$$\Delta(k+1) = \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (61)$$

Tehát a nemlineáris mátrixokból képzett Jacobi mátrixok segítségével írható fel a lineáris állapotter-reprezentációt.

Így az állapot dinamika felírása az (62) szerint lehetséges

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) + H \cdot d(k) = f(x(k), u(k), d(k)) \quad (62)$$

ahol A , B , és H Jacobi mátrixok az (63), (64), és (65)-ös egyenlet alapján határozhatók meg

$$A = \frac{\partial f}{\partial x_{x^*, u^*, d^*}} \quad (63)$$

$$B = \frac{\partial f}{\partial u_{x^*, u^*, d^*}} \quad (64)$$

$$H = \frac{\partial f}{\partial d_{x^*, u^*, d^*}} \quad (65)$$

Az így kapott reprezentáció állapotdinamikai egyenlete a munkaponttól való eltérést jellemzi, ez a centrált dinamika.

A fenti leírás alapján az egyes hálózatokra vonatkozóan az alábbiakban határozom meg a lineáris alak felírásához szükséges Jacobi mátrixokat. [24]

3.3.1 Az 1. számú hálózat

Az 1. számú hálózat esetében az A mátrixot az (59)-es egyenlet alapján lehet meghatározni, ahol az $f_1(x)$ -et a (20)-as, míg az x_1 -et a (21)-es, míg az $F(N_{PN1})$ összefüggést a (13)-as egyenlet tartalmazza.

$$A_1 = \frac{\partial f_1}{\partial x_1} =$$

$$1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_1}{L_1} (-24 \cdot 10^{-9} x^3 + 6 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.0526x + 23.521) \quad (66)$$

Ez esetben az A_1 nem mátrix, hanem skalár.

A B mátrixot a (60)-as egyenlet segítségével lehet felírni, ahol az u_1 -et a (23)-as egyenlet mutatja.

$$B_1 = \frac{\partial f_1}{\partial u_1} = [T_s \quad T_s] \quad (67)$$

Látható, hogy jelen modellben a B_1 nem mátrix, hanem vektor.

A H mátrixot pedig a (61)-es egyenlet segítségével tudjuk felírni, ahol d_1 -et a (22)-es egyenlet tartalmazza.

$$H_1 = \frac{\partial f_1}{\partial d_1} = 0 \quad (68)$$

Az 1. hálózatban a H mátrix értéke zérus, mivel ebben a hálózatban csak szabályozott bemenetek vannak és a sorhosszakat pedig nem vettem figyelembe.

3.3.2 A 2. számú hálózat

A 2. számú hálózat esetében az A mátrixot az (59)-es egyenlet alapján lehet meghatározni, ahol az $f_2(x)$ -et a (26)-os, míg az x_2 -et a (27)-es, míg az $F(N_{PN2})$ összefüggést a (14)-es egyenlet tartalmazza.

$$A_2 = \frac{\partial f_2}{\partial x_2} =$$

$$1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_2}{L_2} (24 \cdot 10^{-10} x^3 - 12 \cdot 10^{-6} x^2 + 0.0018x + 20.326) \quad (69)$$

Jelen esetben az A_2 nem mátrix, hanem skalár.

A B mátrixot a (60)-as egyenlet segítségével lehet felírni, ahol az u_2 -t a (29)-es egyenlet mutatja.

$$B_2 = \frac{\partial f_2}{\partial u_2} = [T_s \quad T_s] \quad (70)$$

Látható, hogy jelen modellben a B_2 nem mátrix, hanem vektor.

A H mátrixot pedig a (61)-es egyenlet segítségével tudjuk felírni, ahol d_2 -t a (28)-as egyenlet tartalmazza.

$$H_2 = \frac{\partial f_2}{\partial d_2} = T_s \quad (71)$$

A H szintén nem mátrix, hanem skalár.

3.3.3 A 3. számú hálózat

A 3. számú hálózat esetében az A mátrixot az (59)-es egyenlet alapján lehet meghatározni, ahol az $f_3(x)$ -et a (32)-es, míg az x_3 -at a (33)-as, míg az $F(N_{PN3})$ összefüggést a (15)-ös egyenlet tartalmazza.

$$A_3 = \frac{\partial f_3}{\partial x_3} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_3}{L_3} \quad (72)$$

$$(32 \cdot 10^{-8} x^3 - 0.0006x^2 + 0.2034x + 4.7379)$$

Jelen esetben az A_3 nem mátrix, hanem skalár.

A B mátrixot a (60)-as egyenlet segítségével lehet felírni, ahol az u_3 -t a (35)-ös egyenlet mutatja.

$$B_3 = \frac{\partial f_3}{\partial u_3} = [T_s \quad T_s \quad T_s] \quad (73)$$

Látható, hogy jelen modellben a B_3 nem mátrix, hanem vektor.

A H mátrixot pedig a (61)-es egyenlet segítségével tudjuk felírni, ahol d_3 -t a (34)-es egyenlet tartalmazza.

$$H_3 = \frac{\partial f_3}{\partial d_3} = [T_s \quad T_s] \quad (74)$$

A H szintén nem mátrix, hanem vektor.

3.3.4 A 4. számú hálózat

A 4. számú hálózat esetében az A mátrixot az (59)-es egyenlet alapján lehet meghatározni, ahol az $f_4(x)$ -et a (39)-es, míg az x_4 -et a (40)-es, míg az $F(N_{PN4})$ összefüggést a (16)-os egyenlet tartalmazza.

$$A_4 = \frac{\partial f_4}{\partial x_4} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_4}{L_4} \quad (75)$$

$$(-20 \cdot 10^{-9} x^3 + 3 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.0234x + 17.011)$$

Az A_4 nem mátrix, hanem skalár.

A B mátrixot a (60)-as egyenlet segítségével lehet felírni, ahol az u_4 -et a (42)-es egyenlet mutatja.

$$B_4 = \frac{\partial f_4}{\partial u_4} = T_s \quad (76)$$

Látható, hogy jelen modellben a B_4 nem mátrix, hanem skalár.

A H mátrixot pedig a (61)-es egyenlet segítségével tudjuk felírni, ahol d_4 -et a (41)-es egyenlet tartalmazza.

$$H_4 = \frac{\partial f_4}{\partial d_4} = T_s \quad (77)$$

A H szintén nem mátrix, hanem skalár.

3.3.5 Az 5. számú hálózat

Az 5. számú hálózat esetében az A mátrixot az (59)-es egyenlet alapján lehet meghatározni, ahol az $f_5(x)$ -et a (46)-os, míg az x_5 -et a (47)-es, míg az $F(N_{PN5})$ összefüggést a (17)-es egyenlet tartalmazza.

$$A_5 = \frac{\partial f_5}{\partial x_5} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_5}{L_5} \quad (78)$$

$$(8 \cdot 10^{-7} x^3 - 0.0009x^2 + 0.088x + 11.336)$$

Jelen esetben az A_5 nem mátrix, hanem skalár.

A B mátrixot a (60)-as egyenlet segítségével lehet felírni, ahol az u_5 -t a (49)-es egyenlet mutatja.

$$B_5 = \frac{\partial f_5}{\partial u_5} = T_s \quad (79)$$

Látható, hogy jelen modellben a B_5 nem mátrix, hanem skalár.

A H mátrixot pedig a (61)-es egyenlet segítségével tudjuk felírni, ahol d_5 -t a (48)-as egyenlet tartalmazza.

$$H_5 = \frac{\partial f_5}{\partial d_5} = T_s \quad (80)$$

A H szintén nem mátrix, hanem skalár.

3.3.6 Összevont rendszer linearizált modellegyenlete

Ahogy az egyes részhálózatokat (lásd fent), úgy az összevont rendszert is linearizálni szükséges. Ezen folyamatot ebben az alfejezetben végzem el.

Az összevont rendszer A mátrixát a (85)-ös egyenlet tartalmazza az (51), (52) és (63)-as egyenletek alapján.

$$A_{teljes} = \frac{\partial f_{teljes}}{\partial x_{teljes}} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} \end{bmatrix} \quad (81)$$

ahol

$$a_{11} = 1 - T_s \frac{\Gamma_1}{L_1} \cdot \frac{\partial f_1(x, u, d)}{\partial x_1} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_1}{L_1} \quad (82)$$

$$(-24 \cdot 10^{-9} x^3 + 6 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.0526x + 23.521)$$

$$a_{22} = 1 - T_s \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot \frac{\partial f_2(x, u, d)}{\partial x_2} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_2}{L_2} \quad (83)$$

$$(24 \cdot 10^{-10} x^3 - 12 \cdot 10^{-6} x^2 + 0.0018x + 20.326)$$

$$a_{33} = 1 - T_s \frac{\Gamma_3}{L_3} \cdot \frac{\partial f_3(x, u, d)}{\partial x_3} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_3}{L_3} \quad (84)$$

$$(32 \cdot 10^{-8} x^3 - 0.0006x^2 + 0.2034x + 4.7379)$$

$$a_{44} = 1 - T_s \frac{\Gamma_4}{L_4} \cdot \frac{\partial f_4(x, u, d)}{\partial x_4} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_4}{L_4} \quad (85)$$

$$(-20 \cdot 10^{-9} x^3 + 3 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.0234x + 17.011)$$

$$a_{55} = 1 - T_s \frac{\Gamma_5}{L_5} \cdot \frac{\partial f_5(x, u, d)}{\partial x_5} = 1 - T_s \cdot \frac{\Gamma_5}{L_5} \quad (86)$$

$$(8 \cdot 10^{-7} x^3 - 0.0009x^2 + 0.088x + 11.336)$$

$$a_{31} = \frac{\Gamma_1}{L_1} \cdot \frac{\partial f_1(x, u, d)}{\partial x_1} = \frac{\Gamma_1}{L_1} \cdot (-24 \cdot 10^{-9} x^3 + 6 \cdot 10^{-5} x^2 - 0.0526x + 23.521) \quad (87)$$

$$a_{32} = a_{42} = \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot \frac{\partial f_2(x, u, d)}{\partial x_2} = \frac{\Gamma_2}{L_2} \cdot (24 \cdot 10^{-10} x^3 - 12 \cdot 10^{-6} x^2 + 0.0018x + 20.326) \quad (88)$$

$$a_{53} = \frac{\Gamma_3}{L_3} \cdot \frac{\partial f_3(x, u, d)}{\partial x_3} = \frac{\Gamma_3}{L_3} \cdot (32 \cdot 10^{-8} x^3 - 0.0006x^2 + 0.2034x + 4.7379) \quad (89)$$

Az összevont rendszer B mátrixát az (51), (53) és (64)-es egyenletek alapján lehet meghatározni.

$$B_{teljes} = \frac{\partial f_{teljes}}{\partial u_{teljes}} = \begin{bmatrix} T_S & T_S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_S & T_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (90)$$

Az összevont rendszer H mátrixát pedig az (51), (54) és (65)-ös egyenletek alapján lehet meghatározni.

$$H_{teljes} = \frac{\partial f_{teljes}}{\partial d_{teljes}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_S & T_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_S \end{bmatrix} \quad (91)$$

Ezzel az összesített, linearizált rendszer előállt, melynek dinamikája a (62)-es egyenlet szerint alakul.

4. Szabályozás tervezése

Ebben a fejezetben a dolgozatomban korábbi részében felírt rész- és összevont rendszerre egy szabályozó tervezését dolgozom ki, amely célja az optimális irányítás megvalósítása az irányítási területen. Az optimalizálás célja a TTS, vagyis a hálózatban töltött összes utazási idő optimális értéken, illetve akörül tartása. Ez egyben azt is jelenti, az $F(TTS)$ összefüggés miatt, hogy a TTD értékének maximalizálása is irányítási célnak mondható. Ezt a célt, az előző fejezetben linearizált (DLTI) rendszerre tervezett LQR típusú szabályozó segítségével érem el.

4.1 Szabályozó tervezése

A linearizálás folyamatának elvégzése a centrált rendszer kialakulását eredményezte. Így azt mondhatjuk, hogy e rendszer által leírt állapotok értéke a munkaponttól való eltérést jellemzi. Vagyis azt mondhatjuk, hogy ha a rendszer egy adott állapota a rá jellemző munkapontban van, akkor ennek értéke zérus. Azonban a gerjesztések (az irányítási területre belépő járművek száma) hatására ettől a zérusnak tekintett ponttól mind negatív, mind pedig pozitív irányban is eltérhet. A szabályozó tervezésének, és egyben működésének a lényege ebben a rendszer tulajdonságban ragadható meg, mivel a szabályozó feladata, hogy az optimum kritériumnak megválasztott munkapontba vigye a rendszert, ha az attól eltér. Erre a célra a legalkalmasabb szabályozó a lineáris kvadrátikus szabályozó, amely úgy juttatja a rendszert a kijelölt munkapontba, hogy a rendszer munkaponttól való eltérését minimalizálja. [24]

A minél tökéletesebb irányítás megvalósítása érdekében az optimum elérését szem előtt tartva kell megválasztani a munkapontok értékét.

4.2 Munkapontok meghatározása

Az irányítás tervezéséhez jelen modellben három munkapont meghatározása szükséges. A három meghatározandó munkapont a következő:

- az állapotváltozó (x_0);
- a szabályozott bemenet (u_0);
- valamint a zavarások (d_0).

A munkapontok meghatározásához a nemlineáris állapotdinamikai egyenletek állandósult állapotát használom fel. Ez az (1)-es egyenlet szerint a következőképpen alakul:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)) = x(k) + T_s [Q_{be}(k) + Q_d(k) - Q_{ki}(k)] \quad (92)$$

Az (59), (60), és (61) alapján írható, hogy

$$x(k+1) = x(k) \quad (93)$$

és ebből pedig

$$x(k+1) = f(x(k)) \quad (94)$$

A (94)-es egyenlet rendezésével pedig a (95)-ös egyenlet kapható:

$$f(x(k)) - x(k) = 0 \quad (95)$$

A (92)-es egyenletre felhasználva a (93), (94), és (95)-ös egyenleteket jelentését a következő összefüggés adódik:

$$T_S [Q_{be}(k) + Q_d(k) - Q_{ki}(k)] = 0 \quad (96)$$

A (96)-os egyenlet következménye pedig az, hogy egy adott hálózatba belépő, és onnan kilépő forgalom megegyezik egymással, hiszen szükségszerűen csakis így teljesülhet a (96). Ezzel gyakorlatilag bizonyításra került az általam használt modell alapjául szolgáló (5)-ös egyenlet. [11]

A fenti levezetés azért volt fontos, mert ez szolgál alapul a nemlineáris rendszerek munkapontjainak meghatározásához.

4.3 Nemlineáris rendszer munkapontjai

A nemlineáris rendszerek esetében az x_0 munkapont meghatározása az $F(TTS)$ összefüggést ábrázoló görbék alapján történik. Itt fontos megemlíteni, hogy az állapotváltozó munkapontját nem az $F(TTS)$ görbe maximális TTD értékéhez (a stabil-instabil forgalmi állapot határát jelölő szélsőérték pontra), hanem attól egy kicsit alacsonyabb TTD értékhez tartozó TTS ponthoz választom meg, mivel a szabályozás szempontjából egy fontos kritérium, hogy a szabályozni kívánt rendszer stabil állapotban legyen, ami viszont így érhető el. A Q_{ki} és TTD összefüggést mutató görbék alapján meghatározható a hálózatból kilépő forgalom nagyság mértéke. Az (5)-ös egyenletben szereplő összefüggés alapján már ezen értékből meghatározható a fennmaradó u_0 és d_0 munkapontok értéke. Ezek alapján az egyes hálózatokra az 1. táblázat szerint alakultak a munkapontok értékei.

1. táblázat: Nemlineáris rendszerek munkapontjai

	x_0 [jármű]	u_0 [jármű/óra]	d_0 [jármű/óra]
1. hálózat	1200	1242	0
2. hálózat	1500	2786	1393
3. hálózat	400	693	462
4. hálózat	1000	590	590
5. hálózat	180	247	247

Az összevont, nemlineáris rendszer állapot vektora az (52)-es egyenlet alapján a (97)-es egyenlet szerint alakul.

$$x_{teljes} = \begin{bmatrix} 1200 \\ 1500 \\ 400 \\ 1000 \\ 180 \end{bmatrix} \quad (97)$$

Az összevont, nemlineáris rendszer bemenőjel vektora az (53)-as egyenlet alapján a (98)-as egyenlet szerint alakul.

$$u_{teljes} = \begin{bmatrix} 621 \\ 621 \\ 1393 \\ 1393 \\ 231 \end{bmatrix} \quad (98)$$

Az összevont, nemlineáris rendszer zavarójel vektora az (54)-es egyenlet alapján a (99)-es egyenlet szerint alakul.

$$d_{teljes} = \begin{bmatrix} 1393 \\ 231 \\ 231 \\ 590 \\ 247 \end{bmatrix} \quad (99)$$

4.4 *Lineáris rendszer munkapontjai*

A lineáris dinamika megvalósítása a 3.3 fejezet szerint alakul. Az így számított, az egyes hálózatokra vonatkozó A , B , és H mátrixok értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Lineáris rendszerek munkamátrix értékei

	A mátrix	B mátrix	H mátrix
1. hálózat	0.9897	[1/60 1/60]	0
2. hálózat	0.9863	[1/60 1/60]	1/60
3. hálózat	0.9742	[1/60 1/60 1/60]	[1/60 1/60]
4. hálózat	0.9925	1/60	1/60
5. hálózat	0.988	1/60	1/60

A lineáris dinamika esetén a munkapontok értékei eltérnek a nemlineáristól. Ezt az eltérést kezelni kell. Az A mátrix értékeket fixnek tekintve kell újból meghatározni, és ehhez igazítani az u_0 és d_0 munkapont értékeit. A munkapontok értékeinek újbóli meghatározása a (100), (101), és (102)-es egyenletek alapján történik.

$$x(k+1) = x(k) = Ax(k) + Bu(k) + Hd(k) \quad (100)$$

$$x(k) - Ax(k) = Bu(k) + Hd(k) \quad (101)$$

$$(1-A) \cdot x_0 = B \cdot u_0 + H \cdot d_0 \quad (102)$$

Ezek alapján a lineáris rendszerre vonatkozó módosított munkapontok a 3. táblázat szerint alakulnak.

3. táblázat: Lineáris rendszerek munkapontjai

	x_0 [jármű]	u_0 [jármű/óra]	d_0 [jármű/óra]
1. hálózat	1200	734	0
2. hálózat	1500	822	411
3. hálózat	400	369	246
4. hálózat	1000	223	223
5. hálózat	180	65	65

Az összevont rendszerre vonatkozó A mátrix a (81)-(89) egyenletek alapján a (103)-as egyenlet szerint alakul.

$$A_{teljes} = \begin{bmatrix} 0.9897 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9863 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4385 & 0.821 & 0.9742 & 0 & 0 \\ 0 & 0.821 & 0 & 0.9925 & 0 \\ 0 & 0 & 1.544 & 0 & 0.988 \end{bmatrix} \quad (103)$$

Az összevont rendszerre vonatkozó B mátrix a (90)-es egyenlet alapján a (104)-es egyenlet szerint alakul.

$$B_{teljes} = \begin{bmatrix} \frac{1}{60} & \frac{1}{60} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{60} & \frac{1}{60} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{60} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (104)$$

Az összevont rendszerre vonatkozó, linearizált H mátrix pedig a (105)-ös egyenlet szerint alakul a (91)-es egyenlet alapján.

$$H_{teljes} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{60} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{60} & \frac{1}{60} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{60} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{60} \end{bmatrix} \quad (105)$$

4.5 LQ szabályozás

4.5.1 Lineáris kvadratikus szabályozók tervezési elve

Az állapotér-elmélet alapján optimális irányítások is tervezhetők. Az optimális irányítási feladatok egyik legismertebb formája a lineáris kvadratikus értelemben optimális irányítás (angolul *Linear Quadratic Regulator*: LQR probléma), amire a szakirodalom gyakran az LQR rövidítéssel hivatkozik. [24]

Az LQ szabályozás az

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) \quad (106)$$

$$y(k) = C \cdot x(k) \quad (107)$$

állapotegyenlet által leírt rendszer irányításához az alábbi kvadratikus funkcionált minimalizálja:

$$J(y, u) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} y^T Q y + u^T R u \quad (108)$$

ahol Q és R pozitív definit tervezési paraméterek, $C = I$ egységmátrix. [24]

A funkcionálban szereplő $y^T Q y$ tag a kívánt állapottól, vagyis ebben az esetben a kívánt munkaponttól való eltérést, míg az $u^T R u$ tag az irányításhoz felhasznált energiát bünteti. [24]

Az LQR probléma tehát abban nyújt segítséget, hogy alkalmazásával megtervezhető az a szükséges $u(k)$ irányítás, amely képes minimalizálni a már ismert $J(y, u)$ funkcionált, miközben az állapotegyenletet, mint explicit feltételt figyelembe veszi. [24]

Az optimális visszacsatolást az ún. „Riccati egyenlet” megoldásával lehet megtervezni. Diszkrét esetben a Control Algebrai Riccati Egyenlet (Care) helyett a Diszkrét Algebrai Riccati Egyenlet (Dare) megoldását kell elvégezni, hogy elvégezhető legyen az optimális irányítás megvalósítása. [24]

A Diszkrét Algebrai Riccati egyenlet (Dare) a (109)-es egyenlet szerint írható fel.

$$P = A^T P A - (A^T P B) \cdot (R + B^T P B)^{-1} \cdot (B^T P A) + Q \quad (109)$$

A (109)-es egyenlet pozitív definit megoldásának ismeretében számítható az optimális állapot-visszacsatolás, amit a (110)-es egyenlet ír le. [24]

$$K = (R + B^T P B)^{-1} \cdot (B^T P A) \quad (110)$$

4.5.2 Az összevont rendszerre vonatkozó LQ szabályozó

Az összevont rendszer esetében a (108)-as egyenletben felírt funkcionált a következő formában alkalmaztam a szabályozó tervezése során

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} x^T(k) Q x(k) + u^T(k) R u(k) \quad (111)$$

ahol

$$Q = 10 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{x_{nom}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{x_{nom}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{x_{nom}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{x_{nom}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{x_{nom}^2} \end{bmatrix} \quad (112)$$

és

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{u_{nom}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{u_{nom}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{u_{nom}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{u_{nom}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{u_{nom}^2} \end{bmatrix} \quad (113)$$

Itt fontos megjegyezni, hogy az x_{nom} és u_{nom} értékek nem az abszolút x és u értékeit jelölik, hanem a centrált dinamikától való eltérés mértékét. A Q mátrix esetében állapot súlyozással éltem (ezt hivatott kifejezni a 10-es szorzó), mivel az irányítási célként megfogalmazott TTS érték optimalizálást ilyen módon szeretném még hatékonyabban elérni. Az LQ szabályozó tervezése során a zavarásokat állapotváltozóként veszem figyelembe.

A (103)-(104) egyenletek értékeinek a (109)-(113) egyenletekbe való behelyettesítésével és megoldásával kaptam az összevont lineáris rendszer optimális állapot-visszacsatolását

$$K = \begin{bmatrix} 14.66 & 2.76 & 4.66 & -3.41 & -0.05 \\ 14.66 & 2.76 & 4.66 & -3.41 & -0.05 \\ 3.94 & 28.61 & 6.34 & 6.03 & 0.71 \\ 3.94 & 28.61 & 6.34 & 6.03 & 0.71 \\ 18.15 & 27.52 & 44.24 & -3.3 & 9.34 \end{bmatrix} \quad (114)$$

Ezzel az összevont rendszer szabályozott formája előállt, amely a (115)-ös egyenletben leírt dinamika szerint működik.

$$x(k+1) = (A - B \cdot K)x + B \cdot u(k) \quad (115)$$

5. Szimuláció

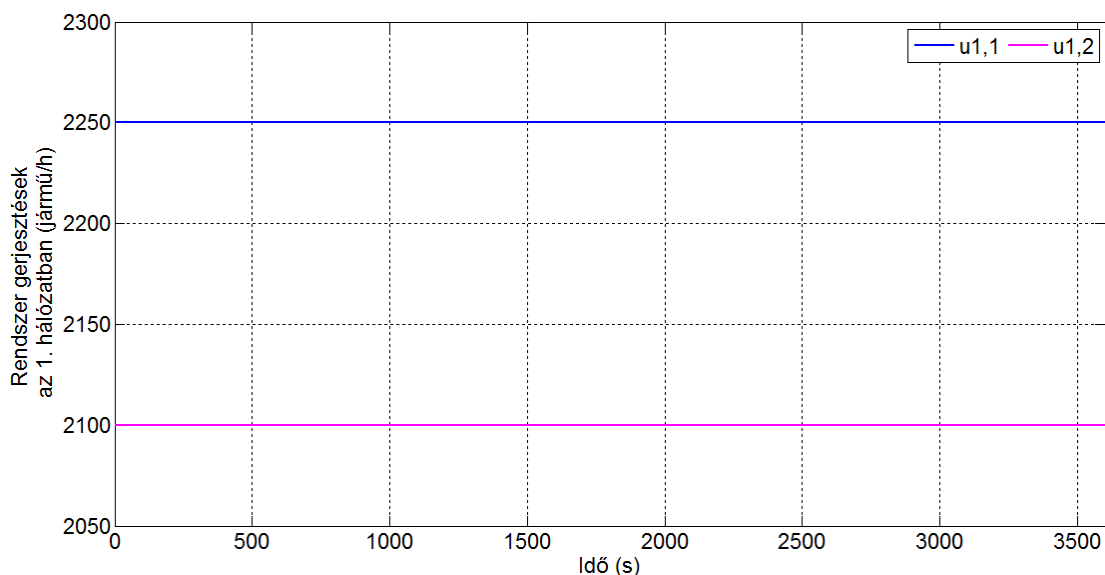
Ebben a fejezetben az előzőekben bemutatott és megtervezett rendszer vizsgálatát végzem el. Ehhez a megtervezett rendszeremet a MATLAB szoftver SIMULINK programcsomagjának segítségével modelleztem. A szimulációk során az irányítás alá vont hálózatot SIMULINK blokkok segítségével építettem fel. Egy részhálózat felépítését mutatja a Függelékben szereplő F1.ábra. A megvalósított modellben a szabályozott és a szabályozatlan rendszereket együtt szimulálok annak érdekében, hogy vizsgálható legyen a tervezett szabályozók működése, valamint a két rendszer közötti különbség. A tervezett rendszer működését két szituációban vizsgáltam. Az első esetben egy rövidebb szimulációt futtattam, amely alatt nagy terhelést alkalmazva vizsgáltam a szabályozó működését, illetve a két rendszervariáns közti különbséget. A másik esetben viszont egy hosszabb szimulációt futtattam, amely során először megnövekedett, majd lecsökkent a forgalmi igény.

5.1 A rövid szimuláció beállításainak ismertetése

A szimulációkat 3600 másodperces futtatások keretében végzem el. A szimulációk során a mintavételi időt $T_s = 60$ másodperc értékre választottam.

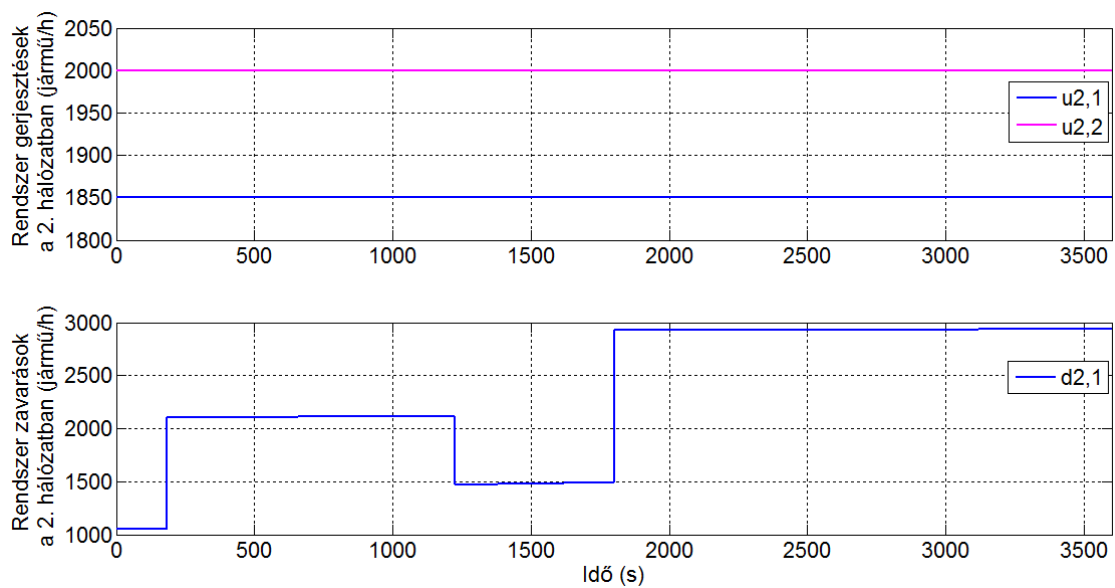
A szimulációkat az egyes részhálózatokon az adott részhálózatra választott állapotváltozó munkapont értéke körül szimulálok, mivel a szimuláció célja a tervezett LQ szabályozó működésének vizsgálata, hogy milyen gyorsan és milyen pontosan képes a választott munkapont érték körül tartani a hálózaton belüli járműszámot magas forgalmi terhelés esetén.

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést az 1. hálózatra vonatkozóan a 19. ábra mutatja.



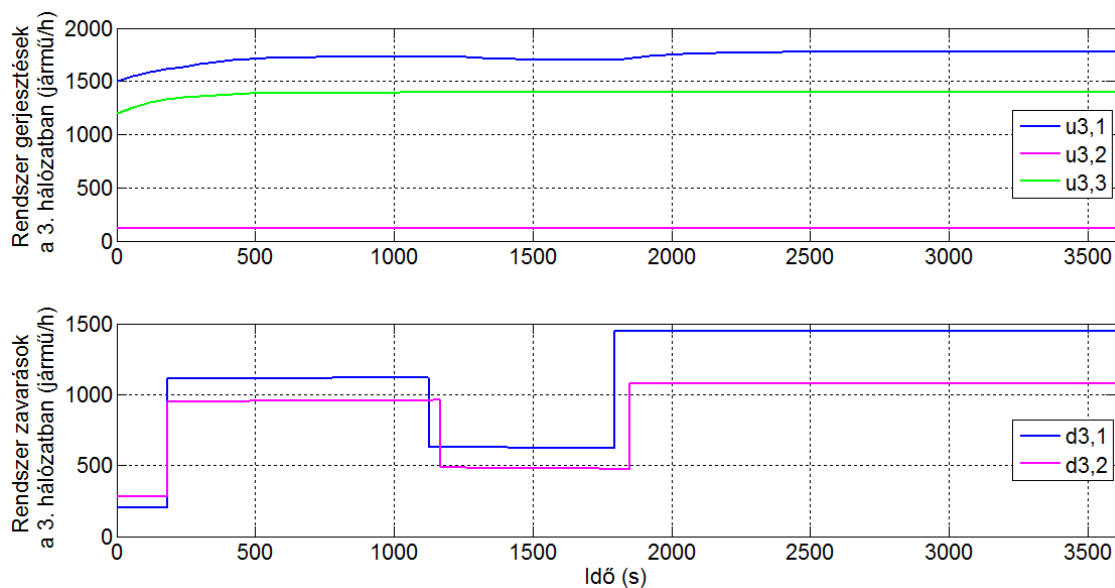
19. ábra: Az 1. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést, illetve rendszer zavarást a 2. hálózatra vonatkozóan a 20. ábra mutatja.



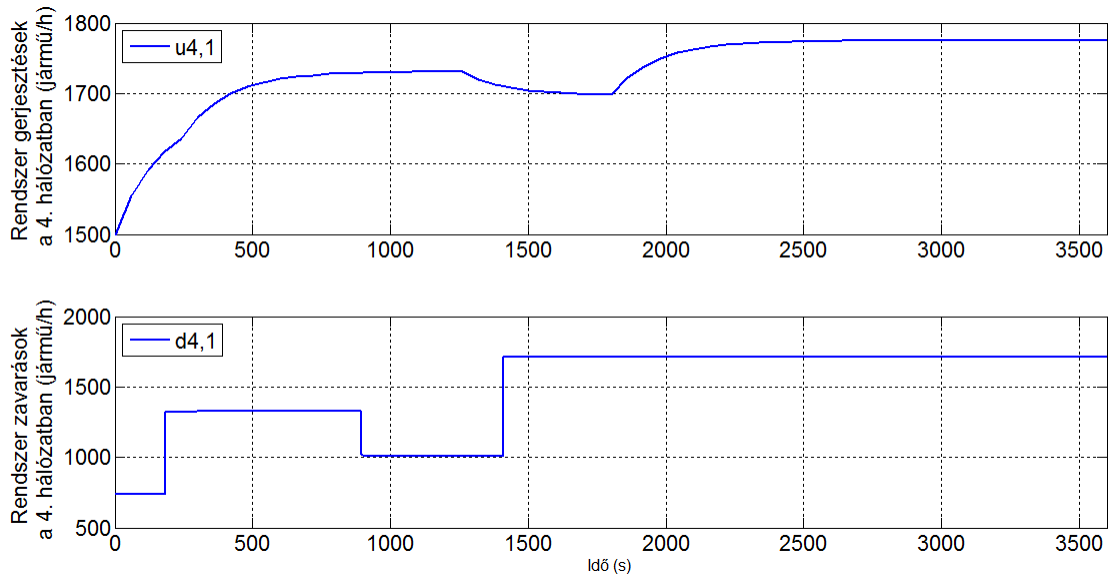
20. ábra: A 2. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést, illetve rendszer zavarást a 3. hálózatra vonatkozóan a 21. ábra mutatja.



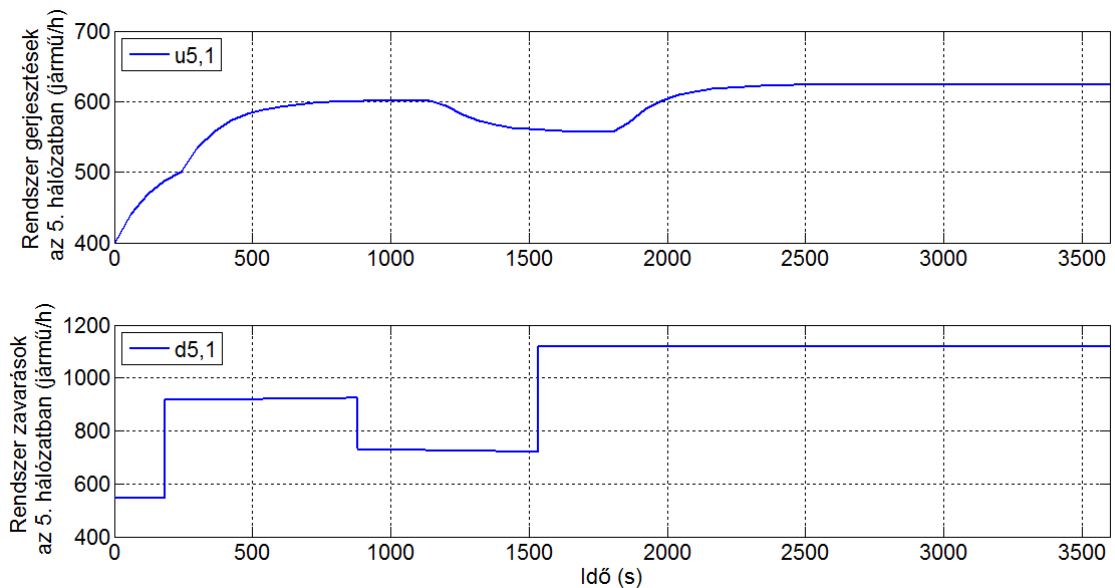
21. ábra: A 3. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést, illetve rendszer zavarást a 4. hálózatra vonatkozóan a 22. ábra mutatja.



22. ábra: A 4. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést, illetve rendszer zavarást az 5. hálózatra vonatkozóan a 23. ábra mutatja.



23. ábra: Az 5. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások

Ahogy az a 19.-, 20.-, 21.-, 22.-, valamint a 23. ábrán is látható, a zavarások értékeinek megválasztásánál törekedtem arra, hogy „ugrásszerű” változások, terhelések legyenek, mivel az e fajta terhelések kezelése a legnehezebb a szabályozó rendszer számára. A gerjesztések esetében pedig egy folytonos terhelést, forgalmi igényt szimuláltam. Fontos megjegyezni továbbá azt is, hogy a 19.-, 20.-, 21.-, 22.-, valamint a 23. ábrán látható rendszer gerjesztések adják az u_{teljes} bementi vektor értékét ((53)-as egyenlet), valamint a rendszer zavarások adják a d_{teljes} zavarójel vektor elemeinek értékét ((54)-es egyenlet).

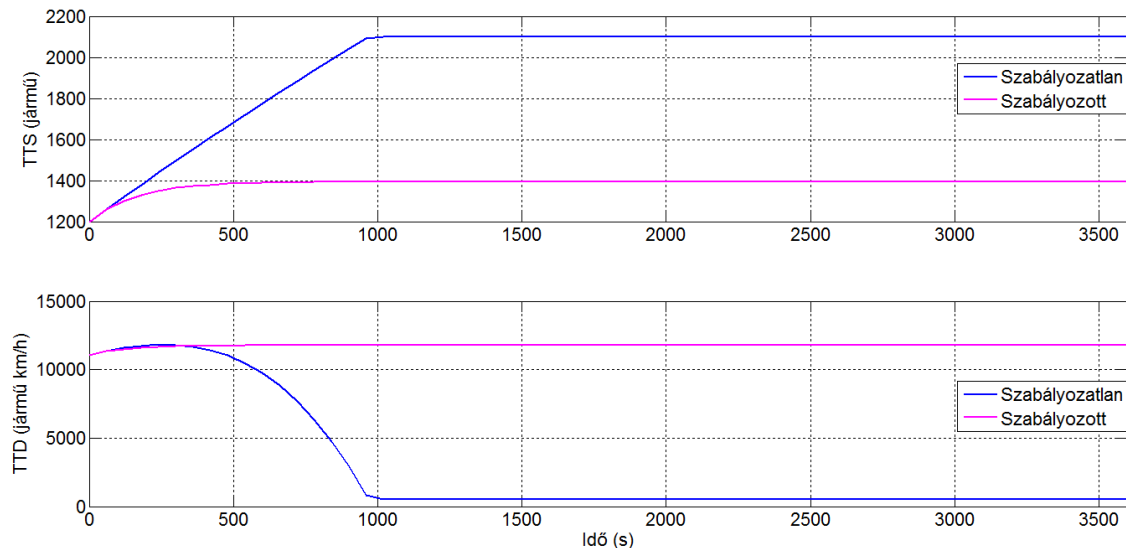
5.2 A rövid szimuláció eredményeinek ismertetése

A fentiekben bemutatott körülmények között végzett futtatások eredményeit az egyes hálózatokra vonatkozóan külön-külön mutatom be. A szimulációk során kapott eredmények közül a következőket ismertetem:

- a TTS értékének alakulását a szimulációs idő alatt;
- a TTD értékének alakulását a szimulációs idő alatt;
- valamint a szabályozott kapukon belépő járműszám alakulását a szimulációs idő alatt.

5.2.1 Az 1. számú hálózat

Az 1. számú hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékének változását a szimulációs idő függvényében mind a szabályozatlan, mind pedig a szabályozott rendszerre vonatkozóan a 24. ábra szemlélteti.

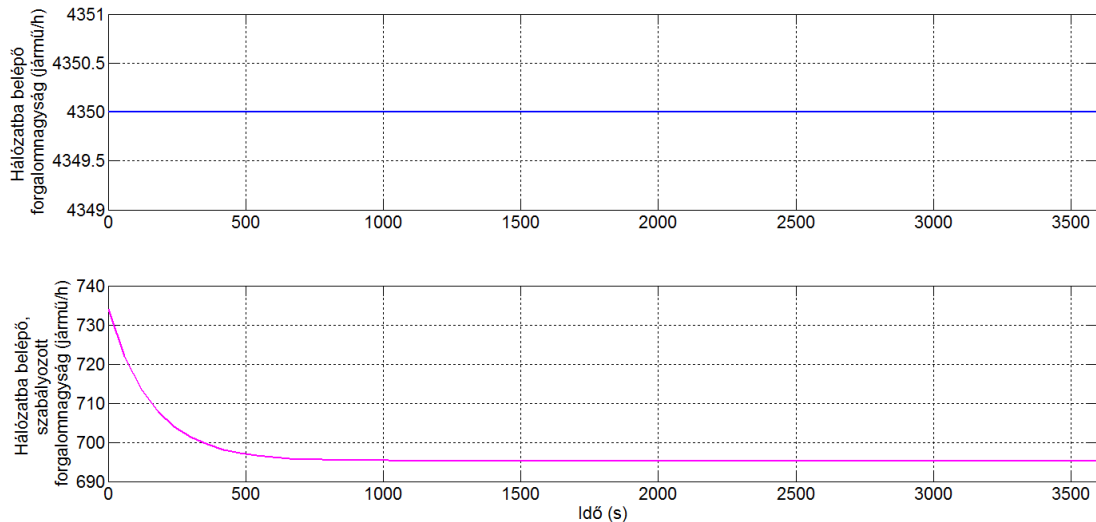


24. ábra: A TTS és TTD értékeinek változása az 1. számú hálózatban

Ahogy azt a 3.1.1 alfejezetben említettem, az első hálózatban nem alakítottam ki szabályozatlan bemenetet. Így itt rendszer zavarójelek nem jelentkeznek, hanem csupán gerjesztés. A 19. ábra szerint a gerjesztés folyamatos, mégpedig a munkapontként megválasztott $367 \frac{\text{jármű}}{h}$ értéket jóval meghaladó. Ha ennek tudatában vizsgáljuk a TTS értékének alakulását a szabályozatlan rendszeren, akkor látható, hogy közel lineáris arányban növekszik a hálózatban lévő járművek száma egészen addig, amíg el nem éri az 1. számú hálózatra jellemző kritikus járműszámot, amely 2100 jármű értéknek felel meg (az 5. ábra szerint). Ezt követően a TTS érték stagnál, a hálózatban torlódás alakul ki. Az $F(TTS)$ összefüggés értelmében a TTD értéke növekszik, amíg a TTS el nem éri az $F(TTS)$ összefüggés stabil-instabil állapot közötti szélsőérték ponthoz (maximum) tartozó értékét. Ezt követően, már az instabil szakaszban, folyamatosan csökken a TTD érték egészen a kritikus TTS érték eléréséig, ahol is nagyon alacsony, közel 0 értéken stagnál a TTD.

Ezzel ellentétben a szabályozott rendszer TTD és TTS értékét vizsgálva látható, hogy a szimuláció kezdetén növekszik a TTS értéke, ám körülbelül 800 másodperc értéknél stagnál.

A fent leírt eredmény további magyarázatát segíti a 25. ábra.

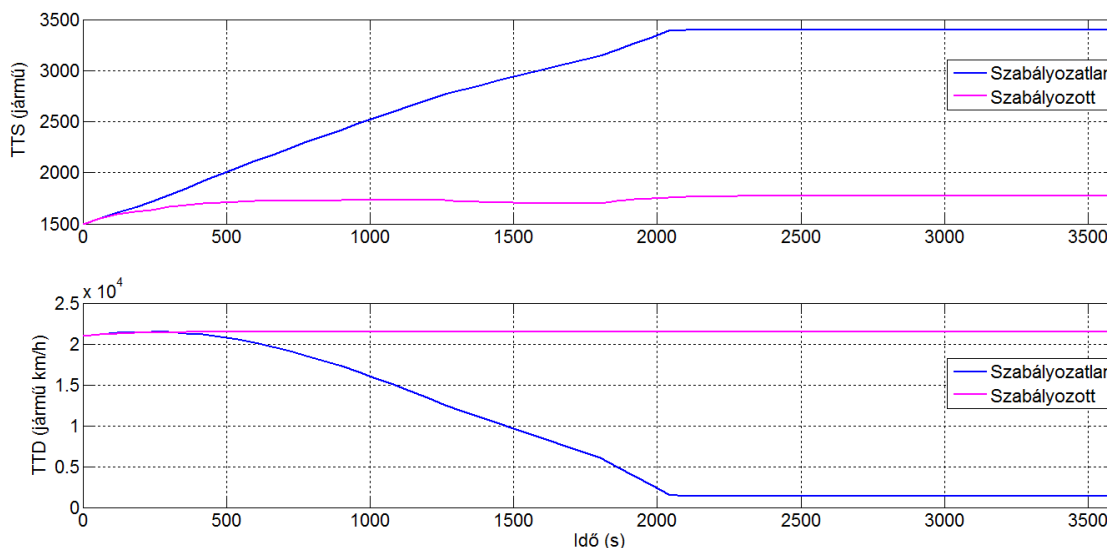


25. ábra: Az 1. számú hálózatba belépő forgalomnagyság értékek

A szabályozatlan rendszer esetében egyértelmű a helyzet, hiszen itt a 19. ábrán mutatott $u_{1,1}$ és $u_{1,2}$ gerjesztések összege jelenik meg, míg a szabályozott rendszer esetében látható, hogy az LQ szabályozó működése révén folyamatosan csökkenti a hálózatba belépő forgalomnagyságot annak érdekében, hogy minél jobban a munkapont értéke körül (1200 jármű) maradjon.

5.2.2 A 2. számú hálózat

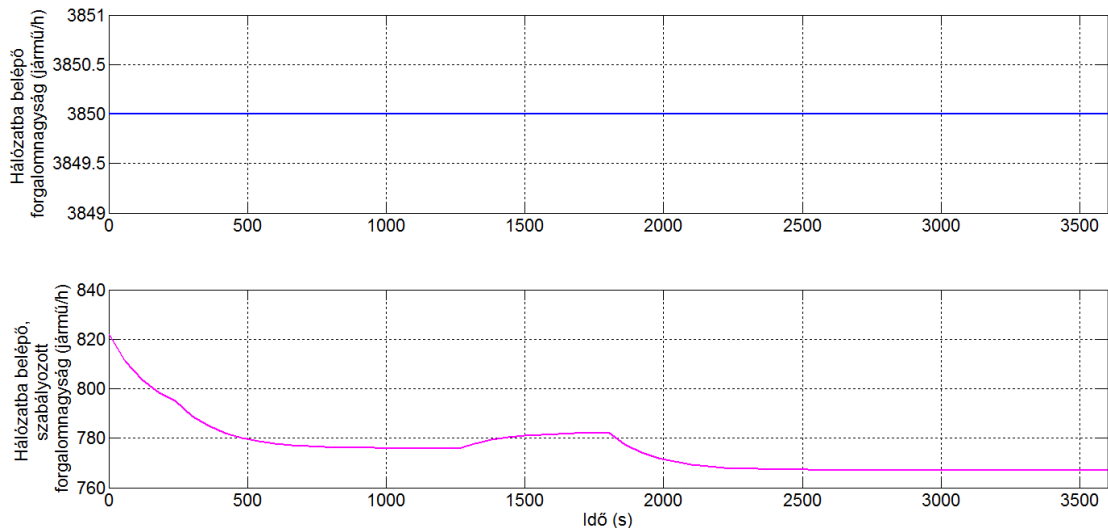
A 2. számú hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékének változását a szimulációs idő függvényében mind a szabályozatlan, mind pedig a szabályozott rendszerre vonatkozóan a 26. ábra szemlélteti.



26. ábra: A TTS és TTD értékeinek alakulása a 2. számú hálózatban

A második hálózat esetében már van zavarás is. Emellett ezt a hálózatot is a munkapont értékénél nagyobb bemenő jellel gerjesztettem. A szabályozatlan rendszer esetében szintén folyamatos TTS érték növekedés tapasztalható. Ám 1300 és 1800 másodperces szimulációs idő között egy enyhe törés következik be, mivel a 20. ábra szerint ebben az intervallumban redukálódik a zavaró jel értéke, aminek hatására valamivel kisebb ütemben növekszik a hálózatban belüli járműszám. 1800 másodperc után, amikor ugrásszerűen növekszik a zavarás mértéke szintén meredekebb egyenes jellemzi a TTS görbe szimulációs idő függvényében való alakulását. A szabályozatlan hálózat körülbelül 3100 másodpercnél telítődik, ekkor éri el a hálózatban belüli kritikus járműszámot (3400 jármű). Ettől a ponttól kezdve stagnál a TTS értéke. Az 1. számú hálózathoz hasonlóan írható le a TTD érték alakulása ebben a hálózatban is.

A szabályozott rendszer esetében is ugyanaz mondható el, mint az első hálózatban. A szimuláció kezdetén kis mértékben növekszik a TTS, majd pedig stagnál. Ám a szabályozott rendszer viselkedésén is látható a zavaró jel változása, hiszen a TTS görbén a már említett 1300-1800 másodperces intervallum alatt csökkenés látható. Ezt követően pedig az 1300 másodpercet megelőző TTS értéknél valamivel nagyobb értékre áll be. Ez azzal magyarázható, hogy az 1800. másodperc utáni zavaró jel értéke nagyobb, mint az 1300. előttié. A TTD görbe az $F(TTS)$ összefüggésnek megfelelően változik.



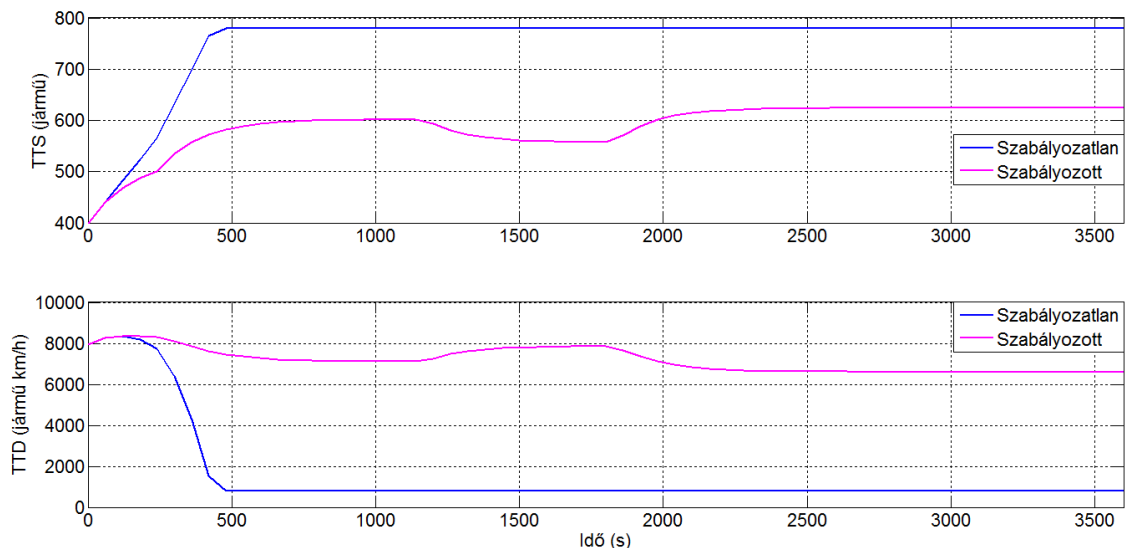
27. ábra: A 2. számú hálózatba belépő forgalom nagyság értékek

A 27. ábrán látható, hogy szabályozatlan esetben értelemszerűen a teljes gerjesztés megjelenik, teljesen függetlenül a rendszert terhelő zavaroktól (jelen esetben a szabályozatlan kapun belépő forgalomtól).

A szabályozott rendszer esetében viszont a 27. ábra jól mutatja az LQ szabályozó működését. A szimuláció kezdetén a munkapont értéktől folyamatosan csökken a szabályozott bemeneten „átengedett” járművek száma, hiszen a munkaponttól nagyobb gerjesztés és zavarás éri a rendszert (lásd 20. ábra). Ezt követően beáll a rendszer egészen a már említett 1300. másodpercig, amikor lecsökken (ugrásszerűen) a zavarás mértéke. Ezt a szabályozott rendszer a szabályozott bemenetein realizálja, hiszen megnövekszik a szabályozott bemeneteken belépő forgalom nagyság. Amikor viszont megint megnövekszik a zavarás, a szabályozó ismételt csökkenti a szabályozott bemenet értékét, hogy a centrált dinamikának megfelelően a munkapont körül maradjon.

5.2.3 A 3. számú hálózat

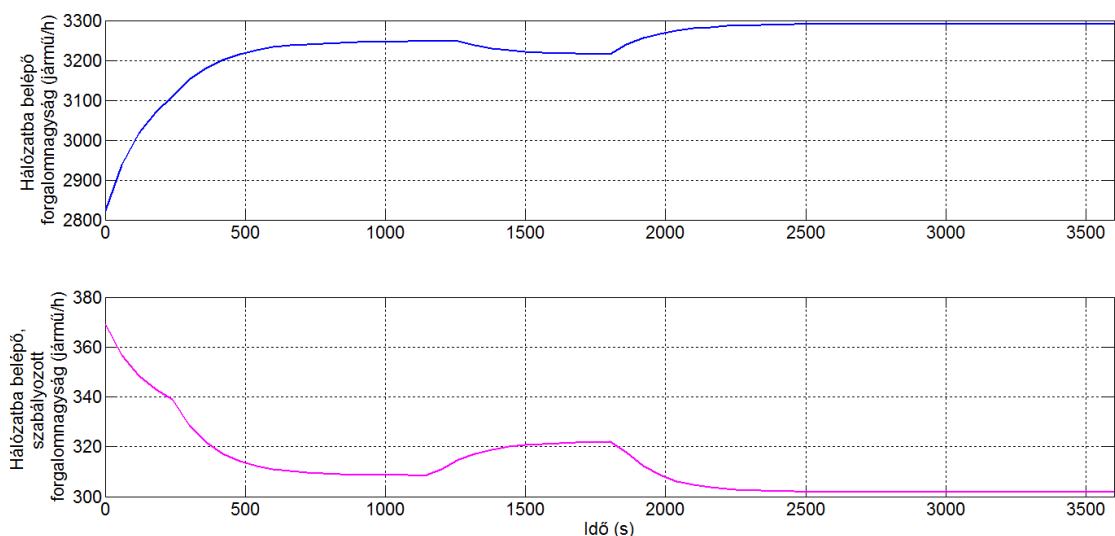
A 3. számú hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékek változását a szimulációs idő függvényében mind a szabályozatlan, mind pedig a szabályozott rendszerre vonatkozóan a 28. ábra szemlélteti.



28. ábra: A TTS és TTD értékeinek alakulása a 3. számú hálózatban

A harmadik hálózat esetében elég összetett a helyzet. Ez az egyik olyan hálózat, amely belső kapcsolatokkal rendelkezik, hiszen a három szabályozott bemenetéből kettő egy másik hálózat kimenete (lásd **3.1.3** alfejezet), amely hálózatok jóval nagyobb kapacitással rendelkeznek, mint a harmadik. Emellett pedig két szabályozatlan bemenettel is rendelkezik. Ezen hatások következményeit lehet megfigyelni a 28. ábra szabályozatlan rendszer TTS és TTD görbéinek alakulásán. Már szinte a szimuláció kezdetén, 500 másodperc előtt telítődik a szabályozatlan hálózat.

A szabályozott rendszer esetében jobban megfigyelhető a zavarások változásának hatása, mivel ebben az esetben már mind a két változás kirajzolódik a TTS és TTD görbéken keresztül. Először 250 másodperc értéknél, ahol először „ugrik” fel a zavaró jel (mindkettő lásd 21. ábra), aztán 1200 másodpercnél, mikor is redukálódik a hálózaton belüli járműszám, az $F(TTS)$ összefüggés értelmében megnövekszik a TTD értéke. A második törés pedig körülbelül 1750 másodperc értéknél van, amikor is a zavarások hatására szintén megnövekszik a TTS értéke.



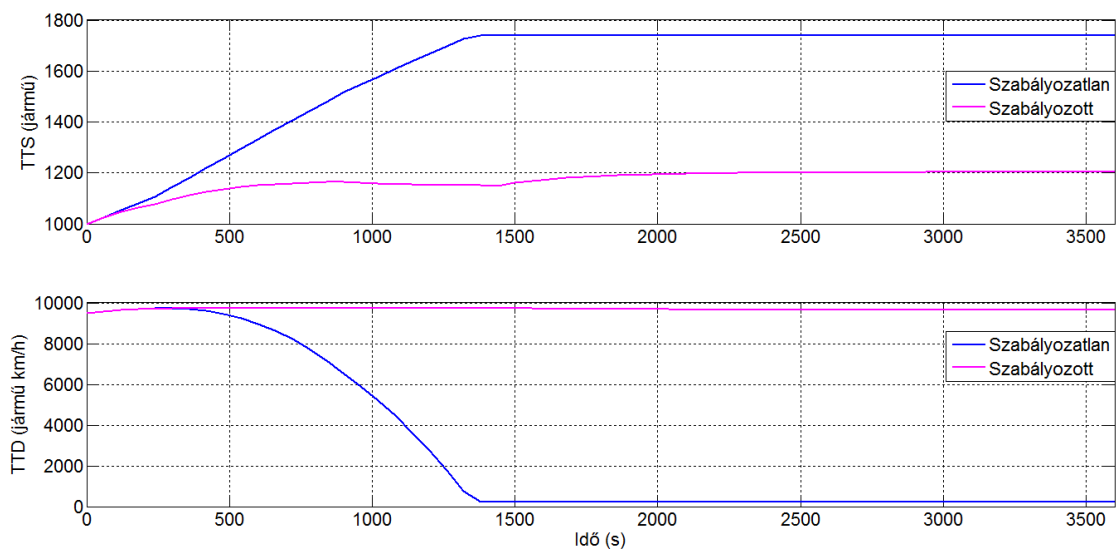
29. ábra: A 3. számú hálózatba belépő forgalom nagyság értékek

A 29. ábrán látható, hogy a belső kapcsolatok miatt a szabályozatlan rendszer esetében nem konstans a gerjesztés, hanem az első és a második hálózat kimeneteinek függvényében változik. Ezt mutatja a görbén mutatkozó törés, ami a második hálózatban jelentkezik.

A szabályozott rendszer esetében (a második hálózatához hasonlóan) látható a zavarások változásának hatása a bemeneteken realizálódó forgalom nagyság értékére.

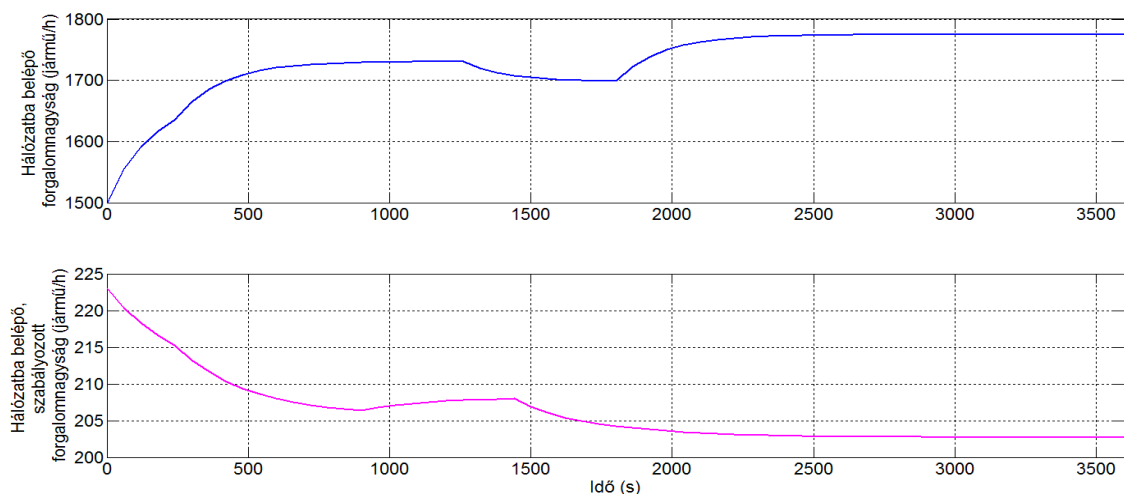
5.2.4 A 4. számú hálózat

A 4. számú hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékeinek változását a szimulációs idő függvényében mind a szabályozatlan, mind pedig a szabályozott rendszerre vonatkozóan a 30. ábra szemlélteti.



30. ábra: A TTS és TTD értékeinek alakulása a 4. számú hálózatban

A négyes hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékek alakulása mind szabályozatlan, mind pedig szabályozott rendszer esetére az előző hálózatok esetében tapasztaltakat mutatja.

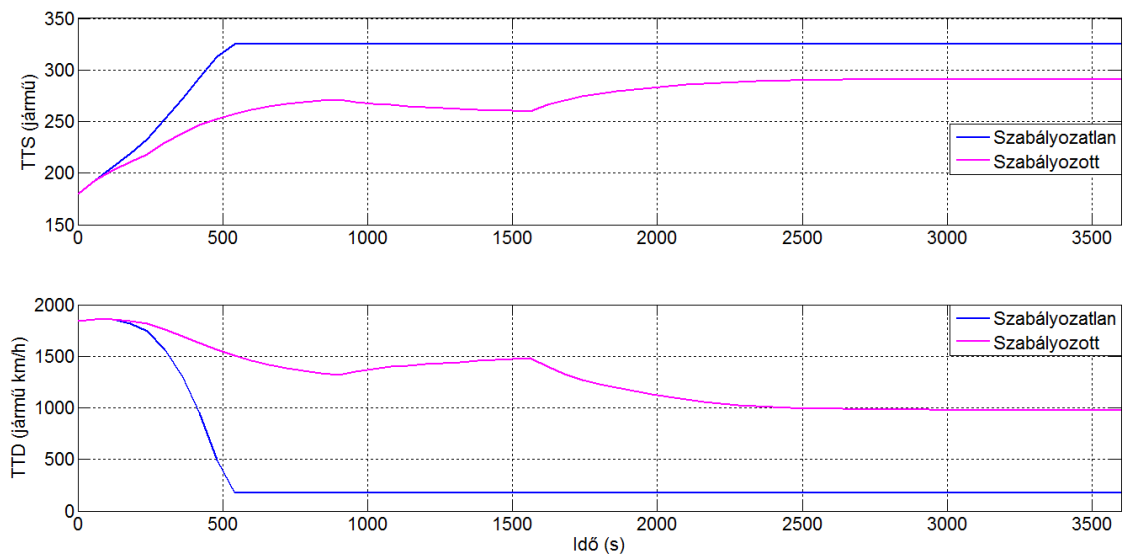


31. ábra: A 4. számú hálózatba belépő forgalom nagyság értékek

A 4. számú hálózat esetében is az elvárásoknak megfelelően alakul a hálózatba belépő forgalom nagyság értéke mind szabályozatlan, mind pedig szabályozott rendszer esetében, ahogy ezt a 31. ábra is mutatja.

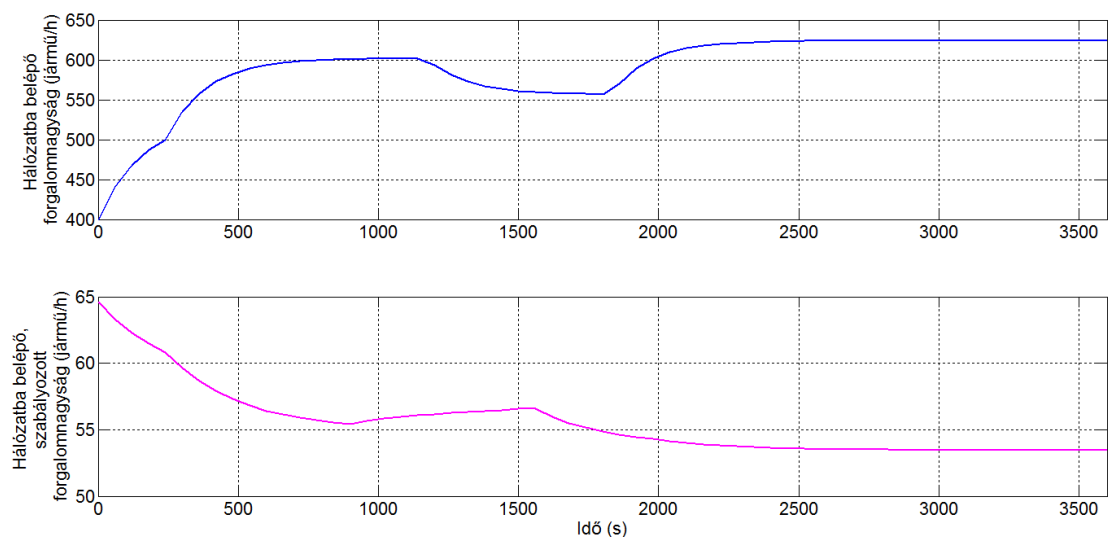
5.2.5 Az 5. számú hálózat

Az 5. számú hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékek változását a szimulációs idő függvényében mind a szabályozatlan, mind pedig a szabályozott rendszerre vonatkozóan a 32. ábra szemlélteti.



32. ábra: A TTS és TTD értékeinek alakulása az 5. számú hálózatban

Az ötös hálózat esetében kialakult TTS és TTD értékek alakulása mind szabályozatlan, mind pedig szabályozott rendszer esetére az előző hálózatok esetében tapasztaltakat mutatja.



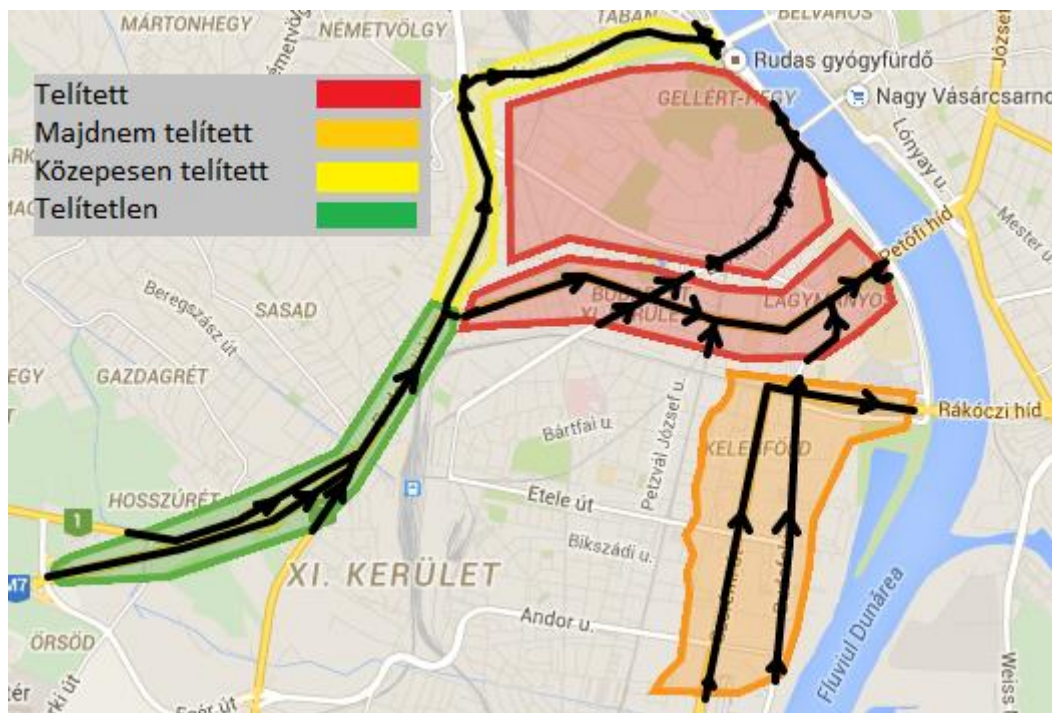
33. ábra: Az 5. számú hálózatba belépő forgalom nagyság értékek

Az 5. számú hálózat esetében is az elvárásoknak megfelelően alakul a hálózatba belépő forgalom nagyság értéke mind szabályozatlan, mind pedig szabályozott rendszer esetében, ahogy ezt a 33. ábra mutatja.

5.3 A rövid szimuláció értékelése

A szimuláció az irányítási célnak megfelelő eredményt hozott az egyes részhálózatok vizsgálata során. A rendszerre tervezett LQ szabályozó képesnek bizonyult a TTS értékének megfelelő kontrolálására, vagyis a választott munkapont körül tartására. Emellett a szabályozott rendszer képes volt kezelni a zavarások hatásait is.

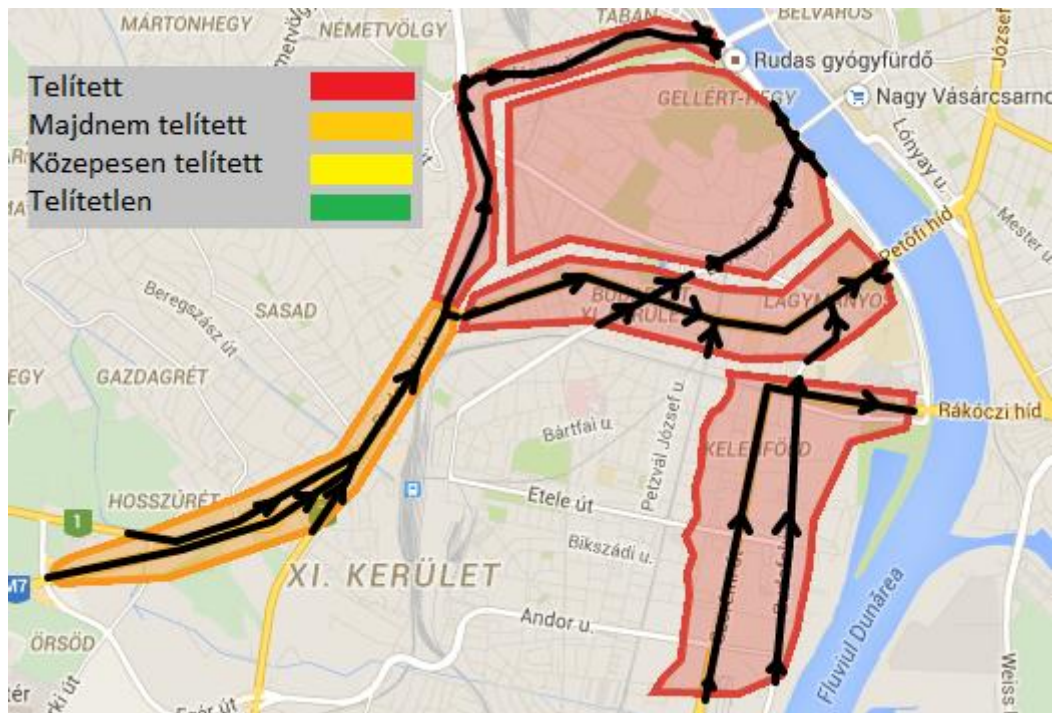
Az összevont, szabályozatlan rendszer esetében kialakuló forgalmi változásokat a következő ábrarozattal reprezentálom. Ezeken az ábrákon a szimuláció során kialakult forgalmi állapotokat, vagyis a hálózaton belüli járműszámot egy színskála segítségével mutatom be. A 34. ábra a szimuláció 900. másodpercében kialakult forgalmi helyzetet mutatja.



34. ábra: A 900. másodpercben kialakult forgalmi állapot

A 34. ábrán látható, hogy a harmadik és az ötödik hálózat már ekkor teljesen telített. Ez azzal magyarázható, hogy egyfelől ez a két legkisebb kapacitással rendelkező hálózat. Másfelől pedig a 3. számú hálózat a két legnagyobb (1. és 2. számú) kapacitású hálózattól is kap forgalmat. Ezenfelül a harmadik és az ötödik hálózat között belső kapcsolat van, tehát ha az ötödik telítődik, akkor ezzel együtt a harmadik is telítődni fog, mivel az egyik kimenetén torlódás alakul ki. Ami a többi hálózatot illeti látható, hogy az egyes hálózatban erős forgalom alakult ki 900 másodperc alatt. A 4-es hálózatban közepes, míg a 2-es hálózatban gyenge forgalom alakult ki.

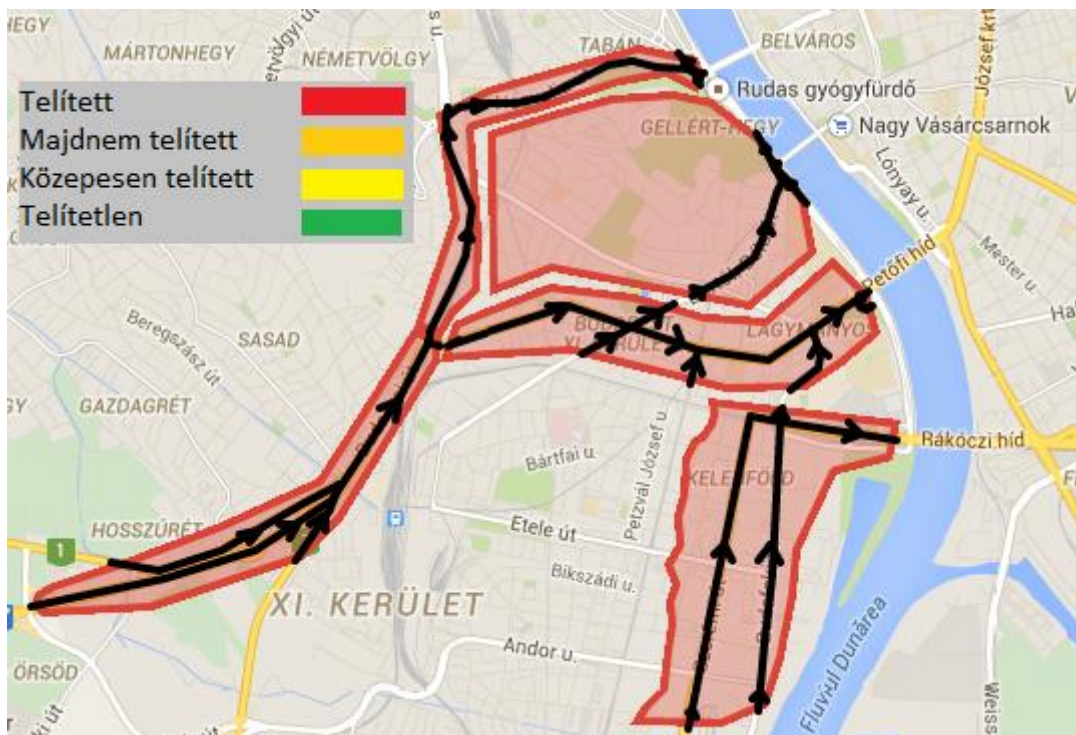
A szimuláció felénél kialakult állapotot a 35. ábra mutatja.



35. ábra: Az 1800. másodpercben kialakult forgalmi állapot

A szimuláció felénél a második hálózat kivételével az összes hálózat „bedugult”. Emellett a második hálózat esetében is erős a forgalom, hiszen mindkét kimenetén torlódás van (mind a 3-as, mind pedig a 4-es hálózatban).

2700 másodpercet követően kialakult állapotot a 36. ábra mutatja.

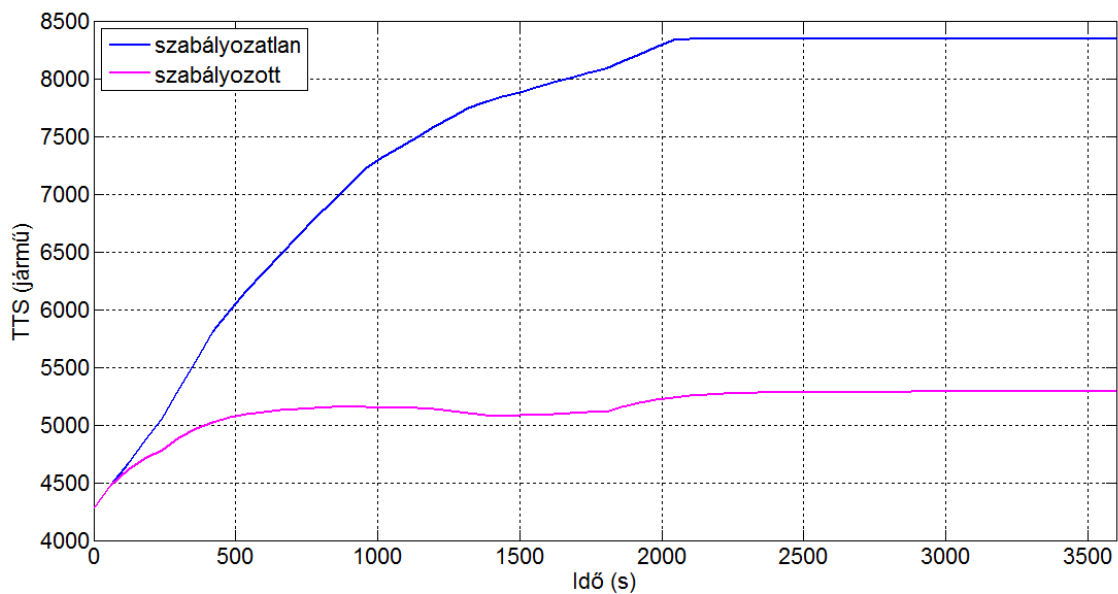


36. ábra: A 2700. másodpercben kialakult forgalmi állapot

Ahogy azt a 36. ábra mutatja, ekkor a teljes hálózat telített és a szimuláció végéig az is marad, mivel a gerjesztések és a zavarások a szimuláció során már nem változnak.

A 34., 35., illetve 36. ábra alapján leírható az irányítási terület ún. „telítődési mechanizmusa”. Vagyis először a legkisebb kapacitású hálózatok (3-as és 5-ös) telítődnek, szinte egyszerre. Ezt követően az első hálózat telítődik, mivel az egyik kimenetén ekkor már torlódás alakul ki, a 3-as hálózat miatt. Ezután a negyedik hálózat telítődik, mivel ennek közepes a kapacitása és kimenetén keresztül nincs belső kapcsolata. Viszont a bementén keresztül kapcsolatban áll a második számú hálózattal, s ezen keresztül jelentős mértékű forgalom érkezik a hálózatba. Legvégül a második hálózatban alakul ki torlódás, mivel ekkor már e hálózat minden kimenetén dugó van.

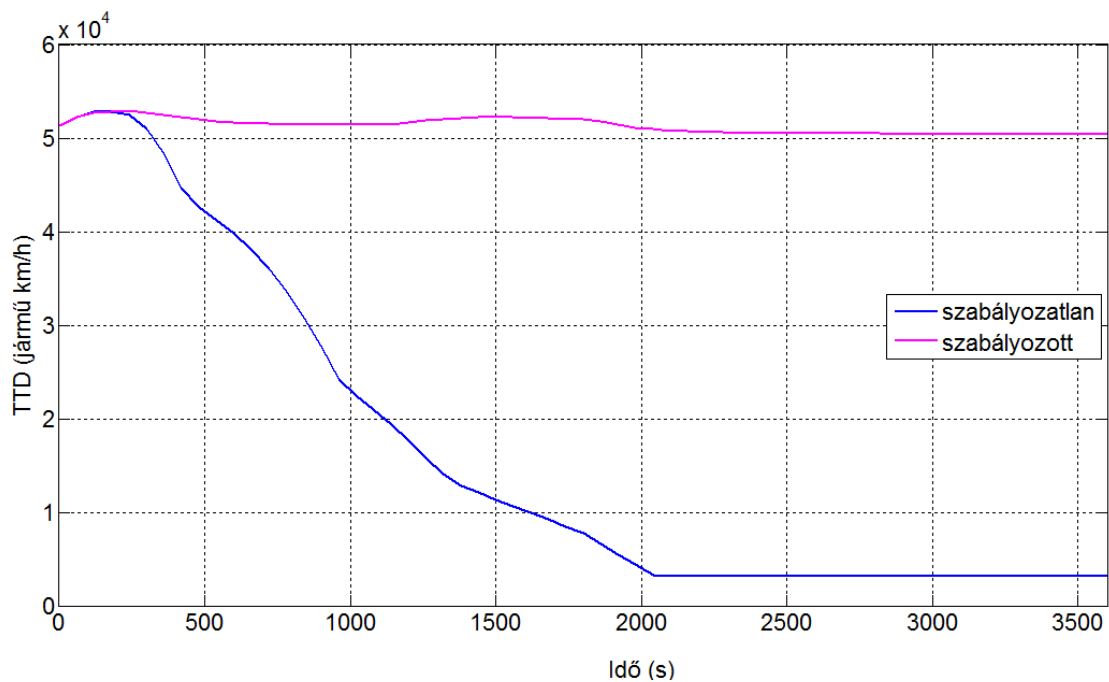
A fent leírtakat alátámasztja mind az 5.2 fejezet, mind pedig a 37. ábra, amely a teljes irányítási hálózaton belüli TTS értékének alakulását mutatja a szimuláció során.



37. ábra: A TTS értékének alakulása a teljes hálózaton

A 37. ábra tanulsága szerint a szabályozott és a szabályozatlan rendszer közötti jelentős különbség mutatkozik, ami az irányítási területen belül tartózkodó járműszámot illeti. A szabályozatlan rendszer esetén a torlódás már a szimulációs idő $\frac{2}{3}$ -a előtt kialakul (kb. 2100 másodpercnél). Mindez alátámasztja azt, hogy a diplomamunkám során kidolgozott szabályozó rendszer hatékonyan alkalmas a kitűzött cél megvalósításra, vagyis a forgalomkorlátozására.

A következő, 38. ábra a teljes irányítási hálózaton belüli TTD értékének alakulását mutatja a szimuláció során.



38. ábra: A TTD értékek alakulása a teljes hálózaton

A 38. ábra a TTD értékek közötti különbséget mutatja a szabályozott és szabályozatlan rendszer esetére. A két rendszervariáns közötti különbség a TTS értékek alakulása (37. ábra) szerint változik, az $F(TTS)$ összefüggés következtében.

A teljes rendszerre vonatkozó TTS érték számszerű változását a 4. táblázat mutatja be.

4. táblázat: A TTS értékeinek változása és az eltérés mértéke a szabályozott és a szabályozatlan rendszer között, a szimuláció során

Szimulációs idő (s)	TTS (jármű)			
	Szabályozott rendszer	Szabályozatlan rendszer	eltérés	realatív eltérés (%)
500	5070	6060	990	83,66
1000	5151	7322	2171	70,35
1500	5081	7884	2803	64,45
2000	5219	8284	3065	63,00
2500	5283	8345	3062	63,31

A teljes hálózat TTS értékei a 2500. szimulációs másodpercet követően nem változnak, mivel ekkor már (lásd 37. ábra) telített a hálózat. A 4. táblázat értékei alapján elmondható, hogy az átlagos eltérés a szabályozott és a szabályozatlan rendszer között 2277 jármű az egy órás szimulációs idő alatt. Vagyis átlagosan a járművek 58.92 %-a tartózkodik az irányítási területen, amely jelentős eredménynek mondható.

A teljes rendszerre vonatkozó TTD érték számszerű változását az 5. táblázat mutatja be.

5. táblázat: A TTD értékeinek változása és az eltérés mértéke a szabályozott és a szabályozatlan rendszer között, a szimuláció során

Szimulációs idő (s)	TTD (jármű km/h)			
	Szabályozott rendszer	Szabályozatlan rendszer	eltérés	relatív eltérés (%)
500	51980	42640	9340	82,03
1000	51450	22490	28960	43,71
1500	52220	11370	40850	21,77
2000	51150	4396	46754	8,59
2500	50460	3107	47353	6,16

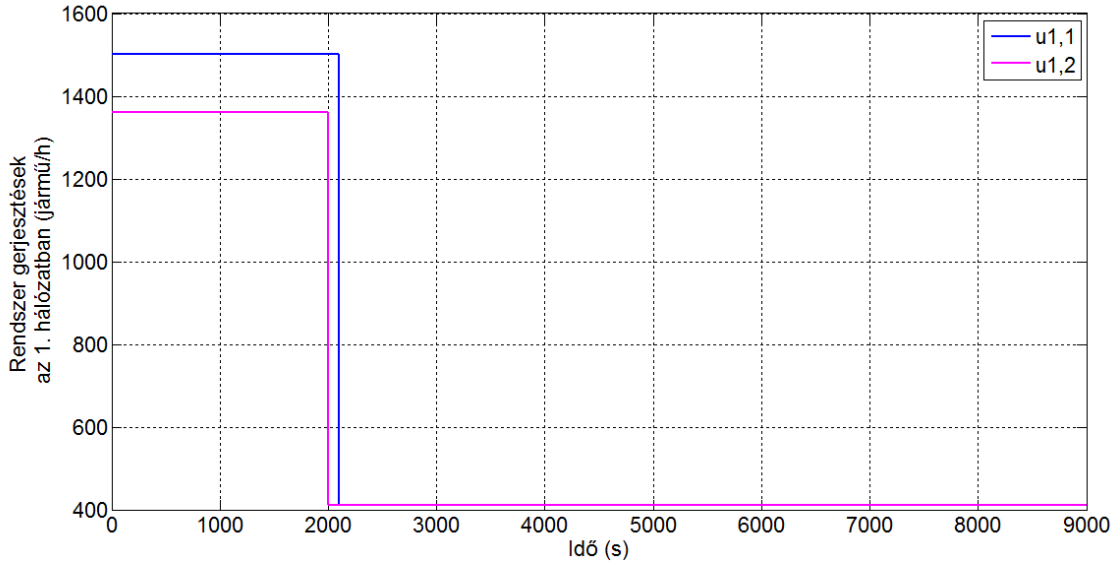
A teljes hálózat TTD értékei a 2500. szimulációs másodpercet követően nem változnak, mivel ekkor már (lásd 38. ábra) telített a hálózat. Az 5. táblázatban található értékek még radikálisabb eltérést mutatnak a szabályozott, illetve a szabályozatlan eset között. Az átlagos eltérés 33495 km óránként, amely elég jelentős mértékű káros anyag kibocsátást, illetve tüzelőanyag felhasználást jelent. Az átlagos relatív eltérés mértéke pedig 21.82 %, vagyis szabályozatlan esetben a forgalmi teljesítmény közel az $\frac{1}{5}$ -ére esik vissza. Itt érdemes megjegyezni, hogy ez az érték Budapest területének csak egy részére vonatkozik (hozzávetőlegesen 10 km^2), vagyis ha ezt a szabályozást kiterjesztenénk a szintén „problémásnak” tekinthető M3 autópálya bevezető szakaszára, a Szentendrei útra, illetve az M5 autópálya bevezető szakaszára, akkor még jelentősebb teljesítmény növekedést lehetne realizálni.

Tehát összességében az mondható el, hogy egy nagy hálózat forgalmi teljesítménye javítható az összevont rendszerre tervezett szabályozó által. Az összevont rendszer modellje a nagy hálózatot alkotó részhálózatok lokális modelljeinek az összefűzésével képezhető.

5.4 A hosszú szimuláció beállításainak ismertetése

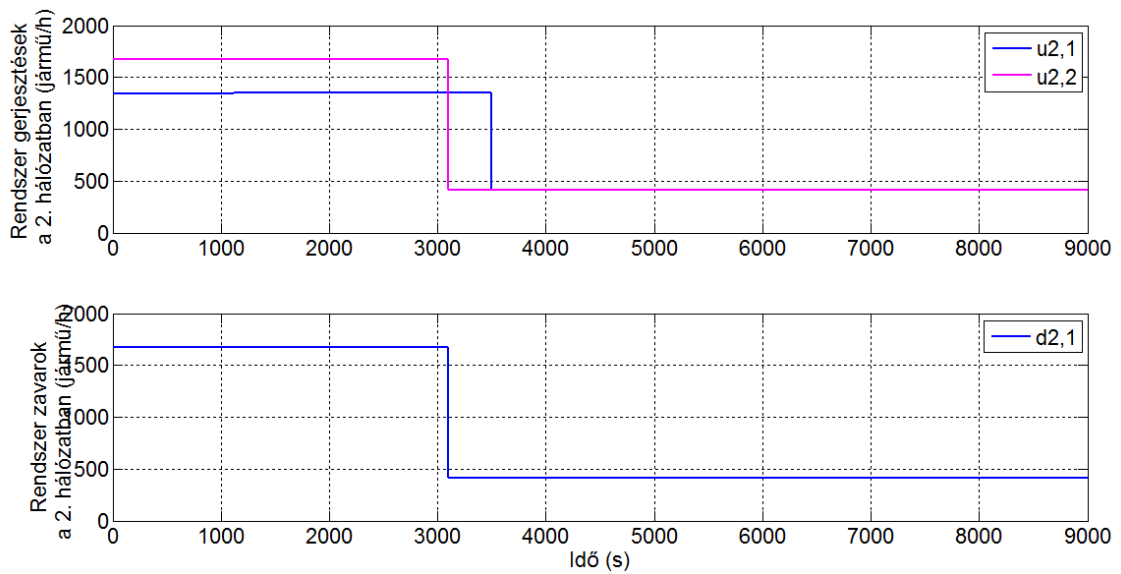
A szimulációkat 9000 másodperces futtatások keretében végzem el. A szimulációk során a mintavételi időt $T_S = 60$ másodperc értékűre választottam. Ezen szimulációk során azt vizsgálom, hogy a hálózat telítettségét követően a csökkenő forgalmi igény hatására hogyan viselkedik a szabályozott, illetve szabályozatlan rendszer, vagyis milyen dinamikával ürül ki a hálózat a telítettségét követően. A szimulációkat ebben az esetben már csak a teljes, összevont rendszer esetében vizsgálom.

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést az 1. hálózatra vonatkozóan a 39. ábra mutatja.



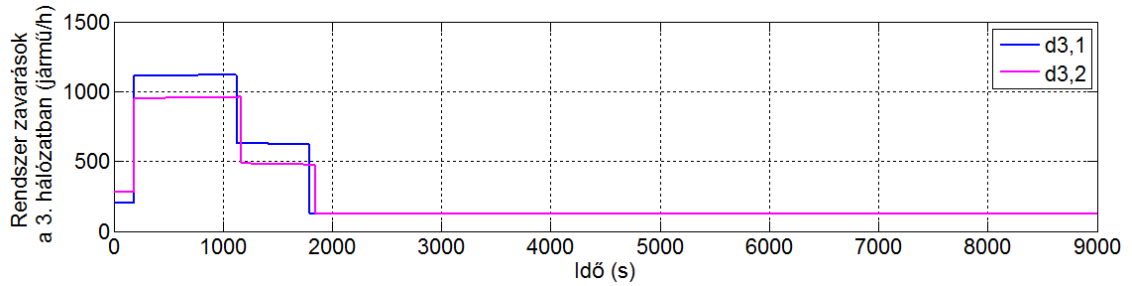
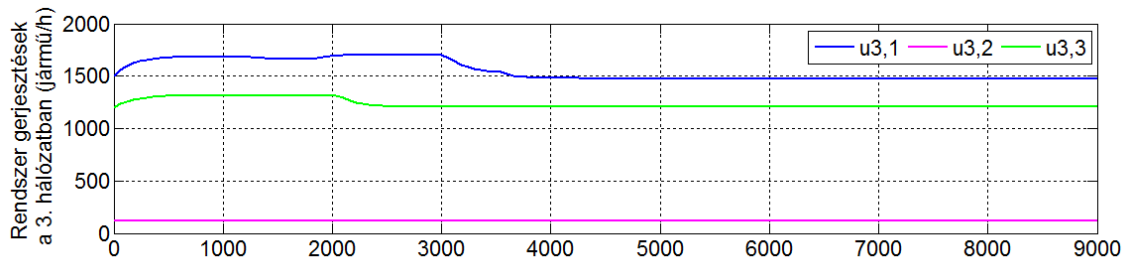
39. ábra: Az 1. hálózatot terhelő gerjesztések a hosszú szimulációk során

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést és zavarást a 2. hálózatra vonatkozóan a 40. ábra mutatja.



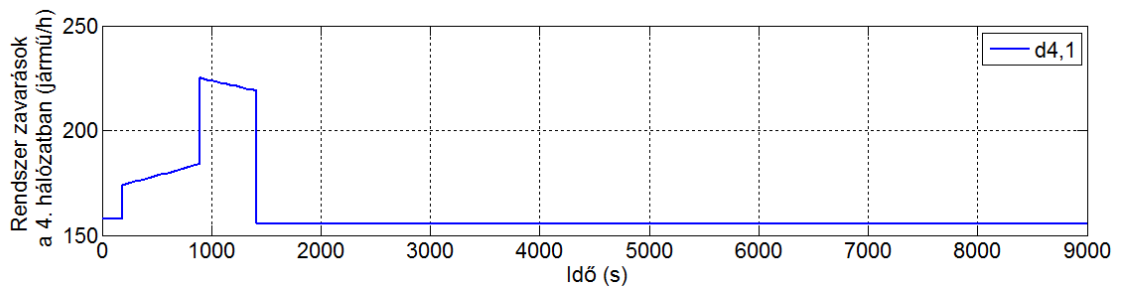
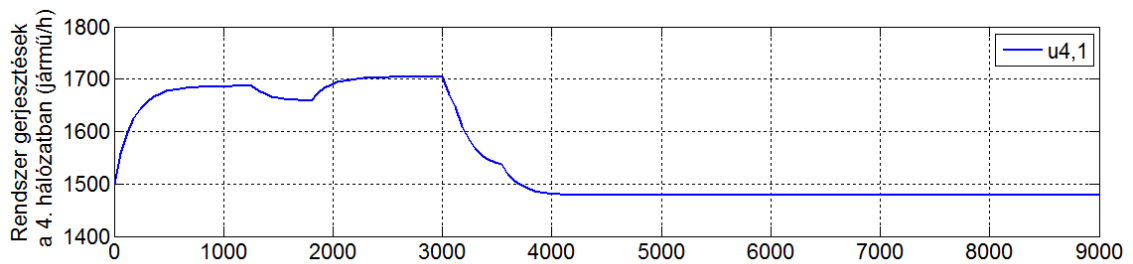
40. ábra: A 2. hálózatot terhelő gerjesztések és zavarások a hosszú szimulációk során

A szimulációk során alkalmazott rendszer gerjesztést és zavarást a 3. hálózatra vonatkozóan a 41. ábra mutatja.



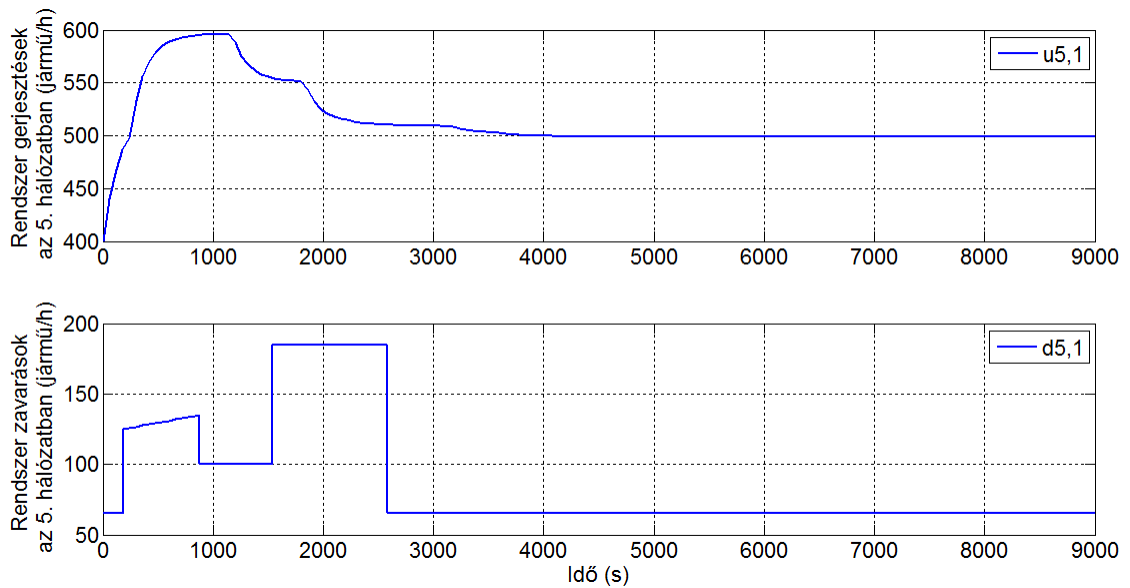
41. ábra: A 3. hálózatot terhelő terhelések és zavarások a hosszú szimulációk során

A szimulációk során alkalmazott rendszer terhelést és zavarást a 4. hálózatra vonatkozóan a 42. ábra mutatja.



42. ábra: A 4. hálózatot terhelő terhelések és zavarások a hosszú szimulációk során

A szimulációk során alkalmazott rendszer terhelést és zavarást az 5. hálózatra vonatkozóan a 43. ábra mutatja.

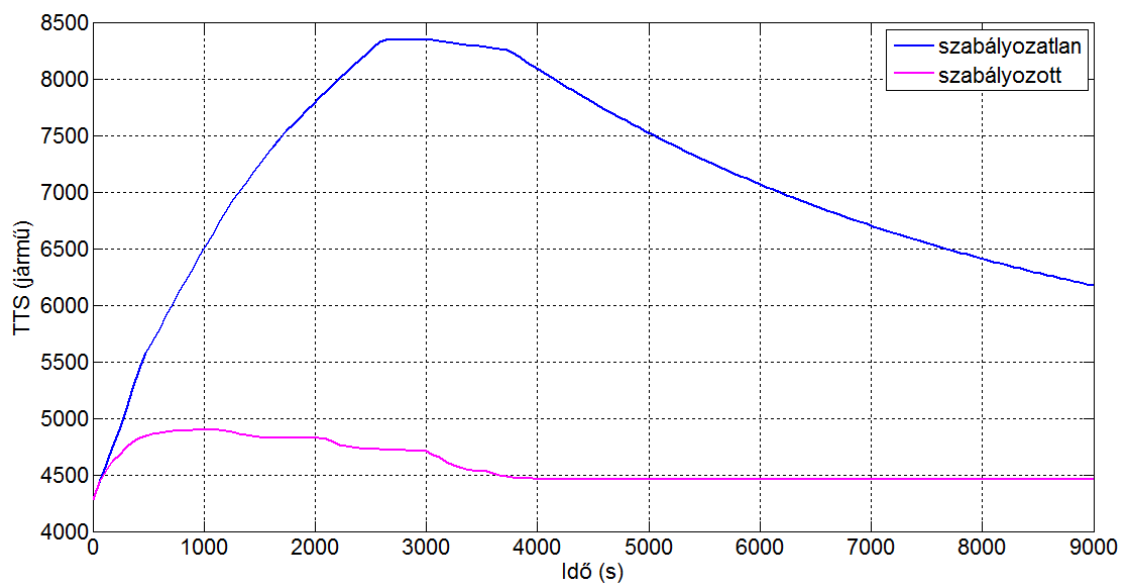


43. ábra: Az 5. hálózatot terhelő gerjesztések és zavarások a hosszú szimulációk során

A 39.-, 40.-, 41.-, 42.-, és a 43. ábrán látszik, hogy a hosszabb szimuláció során úgy választottam meg mind a rendszer gerjesztéseket, mind pedig a rendszer zavarásokat, hogy a szimuláció $\frac{1}{3}$ -ánál telítődjön a hálózat. Ezt követően a gerjesztéseket és a zavarásokat a munkapontoknak megfelelő értékekre redukáltam (lásd 3. táblázat). Ezzel azt vizsgálom, hogy a szabályozott, illetve a szabályozatlan rendszer esetében, milyen gyorsan „cseng le” a túl telítettségi állapot.

5.5 A hosszú szimuláció értékelése

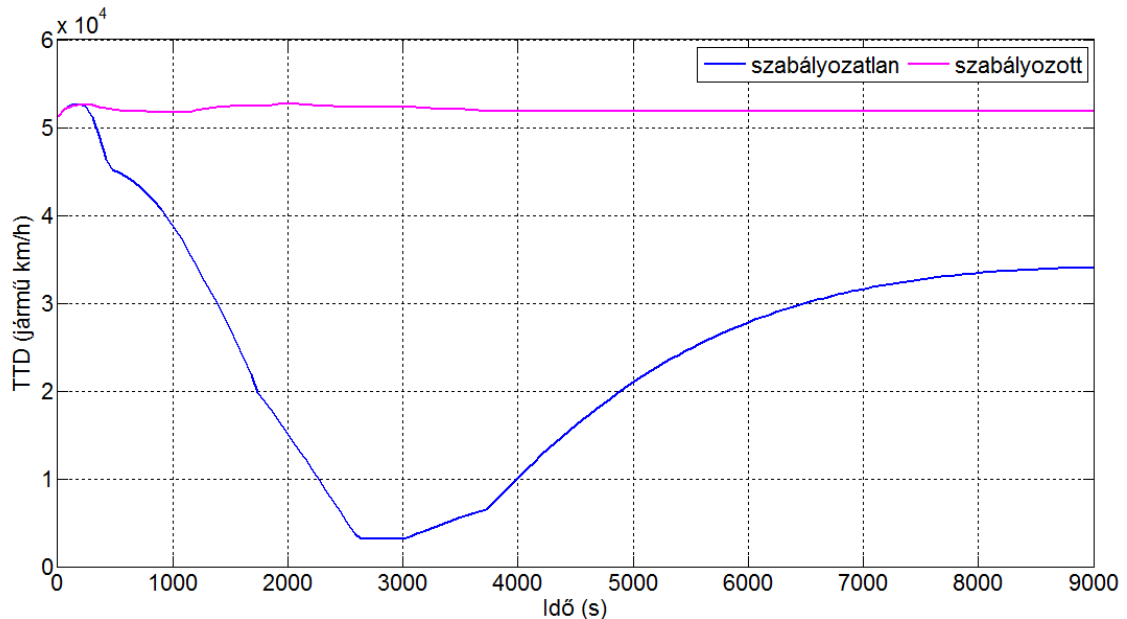
A hosszú szimulációk során a teljes irányítási hálózaton belüli TTS értékének alakulását mutatja a 44. ábra.



44. ábra: A TTS értékének alakulása a teljes hálózaton, a hosszú szimulációk során

A 44. ábrán látható, hogy 2500 és 3000 másodperc között telített a hálózat szabályozatlan rendszer esetén, majd ezt követően folyamatosan csökken az irányítási területen belüli járműszám. Azonban ez a csökkenő tendencia nem elegendő ahhoz, hogy a szabályozatlan rendszer elérje a szimuláció kezdetekor kialakult TTS értéket. A szabályozott rendszer esetében látható, hogy a rendszert érő gerjesztések és zavarások értékének csökkentését követően 1000 másodperc alatt eléri a szimuláció kezdetekor a hálózaton belüli járműszám értékét.

A hosszú szimulációk során a teljes irányítási hálózaton belüli TTD értékének alakulását mutatja a 45. ábra.



45. ábra: A TTD értékének alakulása a teljes hálózaton, a hosszú szimulációk során

A 45. ábrán látható TTD érték az $F(TTS)$ összefüggés értelmében a TTS értékének függvényében változik.

Tehát elmondható az, hogy a szabályozott rendszer nemcsak a megnövekedett forgalmi igények mellett szabályozta megfelelően a forgalom nagyságát az irányítási területen belül, hanem a megnövekedett forgalmi igény lecsökkenését követően képes viszonylag rövid időn belül a munkapont körüli értékre való beállásra is.

Összefoglalás

A diplomamunkám feladatákként a dél-budai területek forgalmának szabályozását jelöltem meg. E szabályozás megvalósíthatóságát a zónaalapú városi forgalomirányítás koncepciójának alkalmazásával vizsgáltam.

A munkám alapjául szolgált tanulmány, amiből kiindultam csak egy hálózatra vonatkozóan végzett szabályozást. Azonban az általam megjelölt terület esetében több részhálózat egységesítésével volt csak lehetséges az irányítás megtervezése, mivel az egyes területek forgalomtechnikai paramétereinek különbözősége (pl. kapacitás) nem tette lehetővé az egy egész hálózatként való kezelhetőséget. Így először minden részhálózatra külön-külön végeztem el a TTD-TTS összefüggés, valamint az egyes hálózatok másik fontos paraméterének, a Γ -nak a meghatározását. Ezt követően felírtam az egyes részrendszerekre vonatkozó nemlineáris állapotegyenleteket. Ezután az egyes részrendszereket, a belső rendszerkapcsolatok figyelembe vételével összevontam, amellyel előállt az összevont, teljes rendszer nemlineáris állapotegyenlete. A következő lépésben mind a részhálózatokra, mind pedig az összevont rendszerre vonatkozóan elvégeztem a linearizálás folyamatát. Ennek eredményeként előállt az összevont, lineáris rendszer. Ez a rendszer már alkalmas az LQ szabályozás megvalósítására.

Az irányítási cél megvalósítását LQ szabályozó rendszer segítségével oldottam meg, amely a hálózaton belüli járműszám (vagyis TTS) optimális értéken tartása, amely egyben (az $F(TTS)$ összefüggés miatt) a TTD értékének maximalizálást is jelenti. Ezen az alapon terveztem LQ szabályozót az összevont rendszerre.

A már meglévő, szabályozott rendszert a MATLAB szoftver, SIMULINK programcsomagjának segítségével modelleztem. Az elkészített modell működését szimulációs vizsgálatok segítségével teszteltem.

A szimulációs eredmények a várt viselkedést mutatták. A szabályozott rendszer képes volt szabályozni a hálózaton belüli járműszámot, mégpedig az előzetesen megtervezett munkapont értékének megfelelően. Emellett a szabályozott rendszer alkalmas volt a rendszert terhelő zavarok hatásainak kezelésére is.

Munkám pozitívumaként a szimulációk eredményeinek tervezettek szerinti alakulását említeném meg, mivel az előzetesen kitűzött céloknak megfelelően viselkedett a tervezett rendszerem az elvégzett szimulációk során.

A diplomamunkámmal kapcsolatban meg kell említeni, hogy a rendszer tervezésénél egyszerűsítéssel éltem a kiindulási modellhez képest, mivel nem vettem figyelembe a szabályozott kapuk előtt kialakuló sorhosszakat. Ezt egyben a munkám egyik továbbfejlesztési lehetőségeként is említeném, mivel ez még jobban alkalmazhatóbbá, a valóságba implementálhatóvá tenné ezt a forgalomszabályozó módszert, eljárást. Továbbá egy másik fejlesztési lehetőségként említem meg az irányítási terület kibővítését.

Felhasznált irodalom

- [1] Tánczos Lászlóné, Török Ádám: A fenntartható közlekedés és a klímaváltozás kapcsolatának elemzése és értékelése
- [2] Erhart Szilárd: A budapesti közlekedési dugók okai és következményei (Közgazdasági Szemle, 2011)
- [3] Luspay Tamás, Tettamanti Tamás, Varga István: Forgalomirányítás (TYPOTEX Kiadó, 2011)
- [4] D. C. Garis: Traffic Theory (Khuner Academic, 2002)
- [5] I. Varga & J. Bokor: New Approach in urban traffic control systems (Periodica Polytechnica, 2007)
- [6] Dr. Péter Tamás, Kulcsár Béla, Bécsi Tamás: Járműforgalmi rendszerek modellezése és irányítása
- [7] Kövesné Gilicze Éva: Közúti áramlatok elemzése és modellezése (Tankönyvkiadó, 1975)
- [8] C. F. Daganzo: Fundamentals of Transportation and Traffic Operations (Pergamon-Elsevier, 1997)
- [9] G. K. Batchelor: An introduction to fluid dynamics
- [10] D. Helbing: Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow (The European Physical Journal, 2009)
- [11] A. Csikós, T. Tettamanti, I. Varga: Nonlinear gating control for urban road traffic network using the network fundamental diagram (2014)
- [12] Mehdi Keyvan-Ekbatani, Anastasios Kouvelas, Ioannis Papamichail, Markos Papageorgiou: Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating (2012)
- [13] K. Aboudolas, M. Papageorgiou, A. Kouvelas, E. Kosmatopoulos: A rolling-horizon quadratic programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks (2010)
- [14] N. Geroliminis, J. Sun: Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic (2008)
- [15] J. Haddad, M. Ramezani, N. Geroliminis: Modell predictive perimeter control for two-region urban cities (2012)
- [16] C. F. Daganzo: Urban gridlock: macroscopic modelling and mitigation approaches
- [17] M. Starting: Coordinated Signal Control for Urban Networks by Using MFD (2010)
- [18] J. Luk, D. Green: Balancing Traffic Density in a Signalized Network (2010)
- [19] M. G. Lay: Handbook of Road Technology (Spon Press, 2009)
- [20] M. Keyvan-Ekbatani, M. Yildirimoglu, N. Geroliminis and M. Papageorgiou: Traffic Signal Perimeter Control with Multiple Boundaries for Large Urban

Networks (Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference of Intelligent Transportation Systems, 2013)

- [21] N. Geroliminis, C. F. Daganzo: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams (2008)
- [22] N. Farhi: Modélisation minipuls et commande du trafic de villes régulières (2008)
- [23] Carl Bergenhem, Henrik Pettersson, Erik Coebingh, Cristofer Englund, Steven Shladover, Sadayubi Tsugava: Overview of Platoonong Systems (2012)
- [24] Bokor József – Gáspár Péter: Irányítástechnika járműdinamikai alkalmazásokkal (TYPOTEX Kiadó, 2008)
- [25] P. B. Hunt, D. I. Robertson, R. D. Bretherton, M. C. Royle: The SCOOT on-line traffic signal optimization technique (Traffic Engineering and Control, 1982)
- [26] P. R. Lowrie: SCATS - the Sydney co-ordinated adaptive traffic system- principles, methodology, algorithm (IEEE International Conference on Road Traffic Signalling, 1982)
- [27] N. H. Gartner: OPAC - a demand-responsive strategy for traffic signal control (Transportation Research Record, 1983)
- [28] J. L. Farges, J. J. Henry, J. Tufal: The PRODYN real-time traffic algorithm (4th IFAC Symposium on Transportation Systems, 1983)
- [29] P. Mirachandi, L. Head: RHODES - a real-time traffic signal control system (Triennial Symposium on Transportation Analysis, 1998)
- [30] C. Diakaki, M. Papageorgiou, K. Aboudolas: A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control (Control Engineering Practice, 2002)
- [31] H. K. Lo, E. Chang, Y. C. Chan: Dynamic network traffic control (Transportation Research, 2001)
- [32] B. De Schutter, B. De Moor: Optimal traffic light control for a single intersection (European Journal of Control, 1998)
- [33] C. Beard, A. Ziliaskopoulos: A system optimal signal optimization formulation (85th TRB Annual Meeting, 2006)
- [34] R. Putha, L. Quadrifoglio, E. Zechman: Using ant optimization for solving traffic signal coordination in oversaturated networks (89th TRB Annual Meeting, 2010)

Ábrajegyzék

1. ábra: Közlekedési folyamat általános szabályozórendszere.....	4
2. ábra: Városi Fundamentális Diagram	9
3. ábra: Irányítási terület.....	15
4. ábra: Az 1-es hálózat áttekintő térképe	18
5. ábra: Az 1-es hálózatra vonatkozó NFD görbe	19
6. ábra: A 2-es hálózat áttekintő térképe	20
7. ábra: A 2-es hálózatra vonatkozó NFD görbe	21
8. ábra: A 3-as hálózat áttekintő térképe	21
9. ábra: A 3-as hálózatra vonatkozó NFD görbe	22
10. ábra: A 4-es hálózat áttekintő térképe	23
11. ábra: A 4-es hálózatra vonatkozó NFD görbe	24
12. ábra: Az 5-ös hálózat áttekintő térképe	25
13. ábra: Az 5-ös hálózatra vonatkozó NFD görbe	25
14. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között az 1-es hálózatban	27
15. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között a 2-es hálózatban	28
16. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között a 3-as hálózatban	30
17. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között a 4-es hálózatban	32
18. ábra: Lineáris összefüggés a TTD és q_{ki} értékek között az 5-ös hálózatban	33
19. ábra: Az 1. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések	50
20. ábra: A 2. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások.....	51
21. ábra: A 3. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások.....	51
22. ábra: A 4. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások.....	52
23. ábra: Az 5. hálózatot a szimulációk során terhelő gerjesztések és zavarások	52
24. ábra: A TTS és TTD értékeinek változása az 1. számú hálózatban	53
25. ábra: Az 1. számú hálózatba belépő forgalomnagyság értékek.....	54
26. ábra: A TTS és TTD értékeinek változása a 2. számú hálózatban	55
27. ábra: A 2. számú hálózatba belépő forgalomnagyság értékek	56
28. ábra: A TTS és TTD értékeinek változása a 3. számú hálózatban	57
29. ábra: A 3. számú hálózatba belépő forgalomnagyság értékek	57
30. ábra: A TTS és TTD értékeinek változása a 4. számú hálózatban	58
31. ábra: A 4. számú hálózatba belépő forgalomnagyság értékek	58
32. ábra: A TTS és TTD értékeinek változása az 5. számú hálózatban	59
33. ábra: Az 5. számú hálózatba belépő forgalomnagyság értékek.....	59

34. ábra: A 900. másodpercben kialakult forgalmi állapot	60
35. ábra: Az 1800. másodpercben kialakult forgalmi állapot.....	61
36. ábra: A 2700. másodpercben kialakult forgalmi állapot	61
37. ábra: A TTS értékének alakulása a teljes hálózaton	62
38. ábra: A TTD értékének alakulása a teljes hálózaton	63
39. ábra: Az 1. hálózatot terhelő gerjesztések a hosszú szimulációk során	65
40. ábra: A 2. hálózatot terhelő gerjesztések és zavarások a hosszú szimulációk során	65
41. ábra: A 3. hálózatot terhelő gerjesztések és zavarások a hosszú szimulációk során	66
42. ábra: A 4. hálózatot terhelő gerjesztések és zavarások a hosszú szimulációk során	66
43. ábra: Az 5. hálózatot terhelő gerjesztések és zavarások a hosszú szimulációk során.....	67
44. ábra: A TTS értékének alakulása a teljes hálózaton, a hosszú szimulációk során ..	67
45. ábra: A TTD értékének alakulása a teljes hálózaton, a hosszú szimulációk során..	68

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Nemlineáris rendszerek munkapontjai	44
2. táblázat: Lineáris rendszerek munkamátrix értékei.....	45
3. táblázat: Lineáris rendszerek munkapontjai.....	46
4. táblázat: A TTS értékeinek változása és az eltérés mértéke a szabályozott és a szabályozatlan rendszer között, a szimuláció során.....	63
5. táblázat: A TTS értékeinek változása és az eltérés mértéke a szabályozott és a szabályozatlan rendszer között, a szimuláció során.....	64

Alkalmazott MATLAB kódok

- **network1.m:** az első számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozást tartalmazó function fájl;
- **network1_szabtlan.m:** az első számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozás nélküli function fájl;
- **network2.m:** a második számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozást tartalmazó function fájl;
- **network2_szabtlan.m:** a második számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozás nélküli function fájl;
- **network3.m:** a harmadik számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozást tartalmazó function fájl;
- **network3_szabtlan.m:** a harmadik számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozás nélküli function fájl;
- **network4.m:** a negyedik számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozást tartalmazó function fájl;
- **network4_szabtlan.m:** a negyedik számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozás nélküli function fájl;
- **network5.m:** az ötödik számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozást tartalmazó function fájl;
- **network5_szabtlan.m:** az ötödik számú hálózat irányítását végző, LQ szabályozás nélküli function fájl;
- **lq_tervezes.m:** az egyes hálózatok LQ tervezéséhez szükséges K vektor számítását végző script fájl;
- **munkapontok.m:** az egyes hálózatok munkapont meghatározását végző script fájl;
- **LQ_teljes.mdl:** a rövid szimulációhoz használt SIMULINK modell;
- **kieg_LQ_teljes.mdl:** a hosszú szimulációhoz használt SIMULINK modell.