



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Forgalom szabályozás fiktív városi környezetben

Teubl Dániel

2013

Konzulens:
Dr. Harmati István

Kivonat

Manapság az életünk egyre több területén használunk intelligens eszközöket, amik legtöbbször még össze is vannak kötve más eszközökkel. Nincs ez másként a közlekedési hálózatokban sem. A fejlettebb országokban már nem csak visszajelzéseket kapunk a hálózattól, hogy éppen merre mehetünk hanem különböző eszközök segítségével mi is információt szolgáltatunk a hálózatnak az aktuális helyzetünkről, vagy éppen az általunk választott útról.

Ezen okból a hozzáértők egyszerű eszközökkel olyan információkat tudnak kinyerni amik segítségével a megfigyelt hálózatban optimalizálni lehet a járművek haladását. Számos módszer létezik a hálózatok lokális vagy globális irányítására viszont ezek sokszor külön infrastruktúra kiépítését igénylik. Az elmúlt évtizedekben elterjedt hálózatokba épített érzékelők és a járművek alapfelszereltségének számító GPS-es segítségével a bonyolultabb forgalom rezponzív és forgalom adaptív szabályzók elterjedését segítik elő. Ezek nagy előnye, hogy képesek alkalmazkodni a változó forgalmi viszonyokhoz ezzel csökkentve a járművek felesleges forgalomban tartózkodását.

A jelen tanulmányban egy fiktív közlekedési hálózat áteresztőképességének növelését tűztem ki célul. Az említett irányítási megfontolások közül elsősorban a forgalom responsive szabályzási módszert alkalmazom kétfajta megközelítésben és hasonlítom össze az előre beállított paraméterű hálózat áteresztőképességével. Ezen felül megvizsgálom, hogy a járművek útvonal tervezésének szinkronizálása a hálózati forgalom alakulásához milyen viszonyban van a járművek által hálózatban eltöltött idővel.

Abstract

Nowadays we are using intelligent devices in more and more areas of our lives, that are often synchronized with each other. This happens the same way in traffic-networks. In developed countries we could not only get feedback from the network about the direction we could go but with the help of different sensors we also give information to the network about our current position or chosen route.

From this data competent people could recover many information that could help them to optimize the movement of the vehicles in the observed network. There are several methods to the local or global controlling of such networks but these mostly need infrastructure installations. The recently built-in sensors in the networks and the GPS systems, which are standard features of any car today, help to spread the complex control methods like traffic responsive and traffic adaptive systems. Their main advantage is that they can adapt to the dynamic traffic situations to minimize the unnecessary travel time of the vehicles.

In this study my goal is to increase the permeability of a fictive traffic network. I apply the traffic responsive control of the above mentioned methods in two approaches and compare them to the permeability of the uncontrolled network using the same parameters. Additionally I examine the relationship between the travelling time spent by the cars in the network and the synchronization of the vehicles route planning to the traffic changes.

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	6
1.1. Felhasznált környezet	6
2. Hálózati modell	7
2.1. Makroszkopikus modell	7
2.2. Mikroszkopikus modell	10
2.3. Csomópontok felépítése	11
2.4. Járművek adatai	11
2.5. Útvonal tervezés	12
2.5.1. Egyszeri útvonal tervezés problémája	12
2.5.2. Ciklikus útvonal tervezés	13
2.5.3. Ciklikus útvonal tervezés súlyozással	13
2.6. Megjelenítés	13
3. Tesztadatok	14
4. Szabályozás mentes - magára hagyott rendszer	15
5. Szabályzási módszerek	15
5.1. Heurisztikus szabályzó	16
5.2. Fuzzy alapú szabályzó	16
5.2.1. Nem teljes lefedés	17
5.2.2. Teljes lefedés	18
6. Optimalizálás	25
6.1. Útvonalak újratervezése	25
6.2. Útvonalak újrasúlyozása	26
7. Eredmények	26
7.1. Szabályozatlan rendszer	27
7.2. Különböző Fuzzy megvalósítások	28
7.3. Heurisztikus módszer	32
7.4. Optimalizálások hatása	33

8. Eredmények összefoglalása	37
8.1. Különböző tesztadatsorok	37
8.2. Fuzzy kontra Heurisztikus szabályzó	38
8.3. Etalon rendszerhez viszonyított eredmények	38
8.4. Felmerülő problémák	42
9. Tovább lépési lehetőségek	43
9.1. Kanyarodási lehetőségek előírása a forgalom függvényében	43
9.2. Többlépéses predikció alkalmazása	44
9.3. Folytonos idejű modell	44
9.4. Multi ágens megközelítés	45
9.5. Zöld hullámok kialakítása	45
9.6. Irányítási módszerek szinkronizálása	46
10. Megvalósítási lehetőség	46
11. Köszönetnyilvánítás	47

1. Bevezető

Manapság az élet számos területén használunk valamilyen mesterséges úton kialakított hálózatot azért, hogy megkönnyítsük vele a mindennapjainkat. Legtöbb esetben ezek a hálózatok – vízvezeték, telefon, internet vagy közlekedés – ténylegesen teljesítik a feladatukat és megkönnyítik a legtöbb használója dolgát.

Kivételt képeznek talán ezek közül a városi közlekedési hálózatok. Ezeknek legtöbbször akkor mutatkozik meg a gyengesége, amikor tervezettnél nagyobb forgalmat kell kezelniük. Ez a probléma viszont az egyre növekvő városiasodás és a túlguló agglomerációs körzetek miatt fokozatosan növekszik. A hálózat túlterhelésekor kialakuló minimális sebességgel mozgó járműfolyamok az mellett, hogy a környezetüket szennyezik a káros anyag kibocsátás miatt, nagyon lassú áthaladást tudnak biztosítani a járművek utasainak számára.

Célszerű megoldás lehet ezeknek a hálózatoknak az áteresztő képességének növelése. Egy városi környezetben viszont a legkézenfekvőbb megoldás, miszerint újabb sávok beiktatásával egyszerűen növeljük az áteresztőképességét, nem használható az évtizedek alatt kialakult városszerkezet miatt. Ilyen esetekben érdemes a hálózat irányítására szolgáló eszközöket, és a szabályozási algoritmusokat fejleszteni. Ahogy azt a [1] [2] tanulmányokban láthattuk, megfelelő szabályozási elvek mellett jelentősen javítható egy hálózat áteresztőképessége.

Ezért a jelen tanulmányban egy korábban kidolgozott modellt [1] bővítünk ki a 2. fejezetben úgy, hogy a hálózatban lévő járművek aktuális helykoordinátái ne csak a folyamatszervezésen keresztül a hálózat irányítására hassanak, hanem a többi jármű útvonalának alakulását is befolyásolhassák. Az így kialakított modellre kipróbálunk többfajta szabályozási – 5. fejezet –, illetve optimalizálási módszert – 6. fejezet – és teszteljük őket különféle helyzetek alapján.

1.1. Felhasznált környezet

A projekt elkezdésekor egyik fő szempont számomra a szakmai fejlődés mellett egy olyan szoftverkörnyezet megismerése amelyben könnyen fel tudok építeni egy valóságos vagy azt megfelelő mértékben közelítő modellt és ennek eredményeit többféle képen tudom ábrázolni. Így a teljes projekt MATLAB és Simulink szoftverkörnyezetben készült el. Már a tervezési fázisban világossá vált, hogy a szokásos függvényábrázolási módok nem lesznek megfelelőek a teljes hálózat értékeinek megfigyelésére ezért készítettem VRML környezet-

ben egy virtuális megjelenítő felületet.

2. Hálózati modell

A közlekedési hálózatok vizsgálata egyszerűen szétbontható két alapjaiban eltérő módszerre. A makroszkopikus modellek alapvetően magasabb szinten, a forgalom haladásával foglalkoznak és a forgalmat a járművek áramlásaként kezeli, hasonló megközelítésben mint a folyadékok áramlása. Ezzel szemben a mikroszkopikus modell alacsonyabb szinten, azaz az egyes járművekkel mint külön entitásokkal foglalkozik, és a hálózat egyes kanyarodó sávjai is megjelennek ebben a megközelítésben.

Jelen tanulmányban a kétfajta megközelítést egyszerre alkalmazzuk oly módon, hogy az alacsony szintű modell értékei szolgálnak kezdőfeltételként a magasabb szintű modellnek, és az utóbbi végértéke pedig egyfajta korlátozásként jelentkezik az előbbi végértékének számolásakor.

Mintahálózatnak a kezelhetőség és az egyszerűség kedvéért egy négyzetháló alapú 25 csomópontos elrendezést választottam. Ennek előnye, hogy a paraméterek megfelelő megválasztásával egy tetszőleges valóságban is létező 25 csomópontból álló hálózati rész modellezhető vele. A jelen tanulmányban viszont minden csomópont azonos paraméterekkel rendelkezik, ami kihasználható a teljes rendszer felparaméterezésekor.

2.1. Makroszkopikus modell

A magasabb szintű megközelítéshez egy korábbi tanulmányban már megfogalmazott modellből indulunk ki [1]. A modellben a hálózat egy gráffal írható le, amely $z \in Z$ élből - egyenes útszakaszból - és $j \in J$ csomópontból - kereszteződésből - áll. Tekintsünk egy jelzőlámpával ellátott j kereszteződést, aminek I_j bemenő és O_j kimenő csatlakozása van. Az eredeti modellnek megfelelően feltételezzük, hogy:

- A járművek a szakaszokon állandó sebességgel közlekednek, a szakaszok végén található keresztezésekben pedig egymás után tárolódnak a zöld jelzésre várva.
- Minden lehetséges kanyarodási kombináció kap zöld jelzést, egymás után ciklusba szervezve.

- A j kereszteződés C_j ciklusideje és az L_j teljes időveszteség adott. Az egyszerűség kedvéért $C_j = C$ minden $j \in J$ kereszteződésben.
- A j kereszteződés jelzőlámpa irányítása fix F_j halmazba tartozó állapotokkal operál és v_z jelöli azon állapotok számát, amelyek ezek közül zöld jelzést kapnak a z útszakaszról.
- Az S_z szaturációs folyam ismert minden $z \in I_j$ esetén. - Ennél több jármű nem tud áthaladni egységnyi idő alatt az adott szakaszon, pl a kiadott sebességkorlátozás miatt.
- A $t_{z,w}$ fordulási tényező fix és ismert minden $z \in I_j$ és $w \in O_j$ esetén.

Az eddigi definíciók alapján a következő összefüggések elmondhatóak:

$$\sum_{i \in F_j} g_{i,j} + L_j = C \quad (1)$$

$$g_{i,j} \geq g_{i,j,min}, \forall i \in F_j \quad (2)$$

ahol a $g_{i,j}$ a hatásos zöld jelzés ideje a j -dik kereszteződés i -dik állapotában, és $g_{i,j,min}$ ennek a minimális nagysága.

Az M és N keresztezések közötti z útszakasz ($z \in O_M, z \in I_N$) dinamikája az 1. egyenlet alapján az

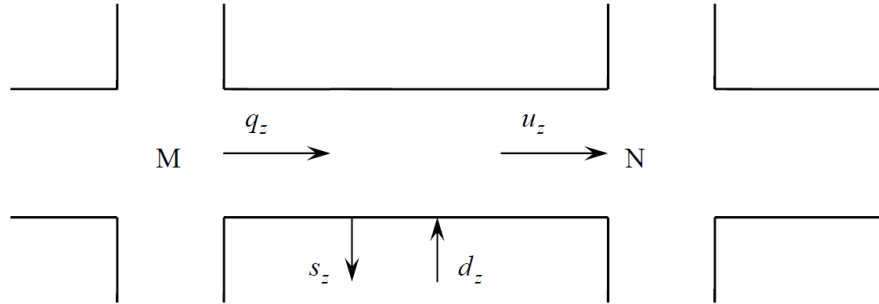
$$x_z(k+1) = x_z + T[q_z(k) - s_z(k) + d_z(k) - u_z(k)] \quad (3)$$

egyenlettel írható le, ahol x_z a z útszakaszon található járművek száma, q_z és u_z az útszakasz bemenő és kimenő forgalmi járműfolyama T irányítási periódus mellett a $[kT, (k+1)T]$ időintervallumban, d_z és s_z az útszakasz forrás és célforgalmának járműfolyama.

Továbbá feltételezzük, hogy:

- $s_z(k) = t_{z,o}q_z(k)$, ahol $t_{z,o}$ egy fix és ismert célforgalmi tényező.
- A d_z forrásforgalmi járműfolyam állandó és ismert
- A z útszakasz bemenő forgalmi járműfolyam:

$$qz(k) = \sum q \in I_M t_{w,z} u_w(k) \quad (4)$$



1. ábra. Egy városi útszakasz

ahol $t_{w,z}, w \in I_M$ a fordulási tényező az M kereszteződés w -dik bemenő csatlakozásáról a z útszakaszra.

- Ha a z útszakaszon elengedő hely van a járművek részére és x_z elég nagy (normális eset), akkor u_z egyenlő az S_z szaturációs járműfolyammal zöld jelzésnél. Ellenkező esetben (abnormális eset) $u_z = 0$.
- A T irányítási periódus a C ciklusidőnél nem kisebb. Ez azt jelenti, hogy átlagos bemenő járműfolyam vehető alapul:

$$u_u(k) = \frac{S_z G_z(k)}{C} \quad (5)$$

ahol a G_z a hatásos zöld jelzés ideje a z útszakaszon:

$$G_z(k) = \sum_{i \in v_z} g_{N,i}(k) \quad (6)$$

- Minden j kereszteződés minden i állapotához tartozik a zöld jelzéseknek egy nominális, fix $g_{j,i}^n$ időterve az $1 \dots n$ irányítási periódusra, amelyek egy g^n vektorba foghatók össze.
- A nominális g^n zöld jelzés időterv és az ehhez szerkezetileg hasonlóan konstruálható d^n járműfolyam vektor egy $x^n = [x_1^n x_2^n \dots]^T$ stacionárius állapotot eredményez.

A fentiekben megfogalmazott feltételek a 3 dinamikus egyenletben figyelembe vehetők, ami a

$$x_z(k+1) = x_z(k) + T \left[(1 - t_{z,0}) \sum_{w \in I_M} t_{w,z} \frac{S_w \sum_{i \in V_w} g_{M,i}(k)}{C} + d(k) - \frac{S_z \sum_{i \in V_z} g_{N,i}(k)}{C} \right] \quad (7)$$

dinamikus egyenlethez vezet.

A jelenlegi tanulmányban az eredeti megfontolások mellett feltételezzük, hogy az alábbi esetek teljesülnek:

- A hálózatban minden jármű a megengedett maximális sebességgel mozog.
- Egy csomópontban csak piros és zöld jelzések lehetnek. Ezek közötti váltás nem okoz holtidőt a rendszerben.
- A 3 alakban található d_z és s_z paramétereket a makroszkopikus modell állítja elő így ezek időben változnak.
- Az egyes járművek egy mintavételben csak 1 db szakaszt tud előre haladni.

2.2. Mikroszkopikus modell

A korábban megemlített módon ezen a szinten már külön kezeljük az egyes útszakaszok sávjait - ami abban nyilvánul meg, hogy ha a magasabb szintű modell eredményei alapján még van hely az adott szakaszon, de a sáv úgymond betelt akkor már több jármű nem fog ráhajtani erre a sávra. - Ez a rész felel az egyes sávokon lévő járművek folyamba szervezésért, hogy a magasabb szintű modell jól tudjon működni.

Korlátozások

Ez mellett természetesen még feladata ennek a résznek a dinamikus és statikus korlátok alapján a járművek új pozícióinak meghatározása. A beállított hálózati paramétereknek köszönhetően egy jármű egy mintavételben maximum egy sávot tud előre haladni. A store-and-forward elv értelmében pedig ha egy jármű sikeresen áthaladt a számára soron következő szakaszra akkor azon addig várakozik amíg az ezt követő mintavételek egyikében tovább nem tud haladni. Az egyes szakaszokon a járművek globális sorszámuk szerint állnak sorban. Értelem szerűen az alacsonyabb sorszámú helyezkedik legközelebb a csomóponthoz, így megfelelő jelzések esetén ő fogja legelőször elhagyni a szakaszt. A jobb

eloszlás érdekében nem különítjük el az egyes kanyarodó sávokat így biztosítva hogy rövidebb jelzések esetén is ne csak egy sávról jussanak ki járművek.

Előfordulhat olyan eset, hogy egy adott szakasz már megtelik az újonnan behajtó és néhány korábról ottmaradt alacsony sorszámú járművel, viszont egy magasabb számozásúnak a kényszerek betartása miatt maradnia kell az útszakaszon. Ilyen esetben a rendszer folytonosságát sérthetjük meg ami nem valós eredményeket eredményezne, illetve olyan mértékű torlódást az egyes útvonalakon ami fizikailag nem fordulhat elő. Ezt a problémát is ezen a szinten le kell kezelni, hogy ne okozhasson máshol problémát. A megoldás megvalósítása egyszerű, visszakeressük az utolsó a szakaszra behajtó járművet majd azt visszaléptetjük a korábbi helyére.

2.3. Csomópontok felépítése

A teljes hálózati rész kialakításában arra törekedtem hogy az egyes részek később átláthatóak legyen és könnyen paraméterezhetőek legyenek. Ezért a csomópontokat egy teljesen szimmetrikus felépítés köré szerveztem és ennek a mintájára alakítottam ki az összes többi megfigyelt csomópontot. Ez azért is fontos szempont mert így egy bármilyen elrendezésű és felépítésű csomópont könnyedén kialakítható ami nem haladja meg a mintahálózat lehetőségeit.

A teljes csomópontra érvényes kanyarodási kényszerek könnyen felírhatóak egy $n \times n$ -es szomszédossági mátrix segítségével. A csomópontok felépítése és a hálózat szisztematikus tervezése miatt utóbbi felparaméterezése egyszerűen megoldható a kereszteződéseket leíró mátrixok alapján. A csomópontokat leíró szomszédossági mátrixokat szétbonthatjuk olyan részekre, amik megfelelnek a globális hálózat azonos hálózati részét leíró elemeknek.

Ezt kihasználva akár egy a mostaninál is nagyobb tesztkörnyezet felépítése is egyszerűen gépiesített eszközökkel megvalósítható, ha a hálózat strukturálisan rendezett. Ez után pedig minden ettől eltérő változást elég a csomópontra felvenni ez által pedig a teljes hálózat leírása is megváltoztatható. Ennek a megoldásnak az egyéb lehetőségeiről a 9.1 fejezetben bővebben kitérek.

2.4. Járművek adatai

Valójában a teljes szimuláció lelke a járművek adatait tároló leíró mátrix. Ez a mátrix egyszerűen kezelhető és folyamatosan szemlélhető vele a járművek helyzetének alakulása.

Az $n \times m$ es mátrix lényege, hogy egyrészt tárolja a teljes szimulációs időre vonatkozóan a járművek helyzetét másrészt ezeket az információkat folyamatosan frissíti. m adja a lehetséges járművek számát, n pedig a vizsgált mintavételi időpontokat. Ez alapján belátható, hogy K -dik mintavételben a mátrix $k = K$ -dik sora megadja a járművek aktuális helyzetét a $0 < k < K$ -dik sorok megadják a járművek által már bejárt útszakaszokat és korábbi helyzetüket a $K < k < n$ -dik sorok pedig megadják az egyes járművek által bejárni kívánt szakaszokat azok megfelelő sorrendjében.

Az első típusú tesztadatsorban az eredmények könnyű összehasonlításának érdekében minden jármű a hálózat globális forrásai felől a globális nyelők felé halad egy számára előre meghatározott útvonalon. Ezen felül elmondható, hogy a járművek a makroszkopikus modellben megfogalmazottak alapján, a globális sorszámoknak megfelelő sorrendben várakoznak az egyes szakaszokon. Az egyes szakaszok hossza illetve a kanyarodó sáv elhelyezkedése biztosítja azt a feltételt, hogy a modellben alkalmazott mintavételi idő alatt egy jármű egy mintavétel alatt maximum egy sávot tud haladni. Ez az eredmények pontos kiértékelhetősége szempontjából fontos.

2.5. Útvonal tervezés

Mint minden valós útvonal tervezési feladat kapcsán jelen esetben is felmerült a kérdés, hogy mi a fontosabb, gyorsabb vagy pontosabb algoritmus. Természetesen a fő célt figyelembe véve ha kevesebb lépésből be tudunk járni egy útvonalat akkor az adott jármű szempontjából az jobb megoldás, így nagyobb hangsúlyt kapott a pontosság.

Mivel a jelen tanulmányban nem volt céлом egy jól működő és feladat orientált útkereső algoritmust tervezni, így a dijkstra mellett döntöttem. Ennek oka, hogy ennek volt egy olyan változata [3] ami számomra elérhető és kompatibilis az eddig használt gráfleíró adat-szerkezettel. Ennek az algoritmusnak a legnagyobb hátrányáról és annak kiküszöböléséről a 8.4 fejezetben térek ki.

2.5.1. Egyszeri útvonal tervezés problémája

Általánosan elmondható, hogy ha kevés paraméter alapján számolunk akkor nem mindig a legrövidebb útvonal lesz a legjobb ezért érdemes lehet a folyamatos újratervezés bevezetése. Elég csak feltételezni azt az esetet, ha egymástól függetlenül több jármű is ugyan azt az útvonalat jelöli ki a legrövidebbnek. Ekkor értelemszerűen egy nagyobb áteresztőképességű

ségű szakasz is könnyen telítődhet ami egy előre látóbb módszerrel könnyedén elkerülhető. Manapság már kaphatóak olyan eszközök amik a többi hasonló készülék jeleit figyelik így szükség esetén kis módosításokat hajthatnak végre az útvonalon, így képesek elkerülni torlódásokat.

Ezekkel szemben ha az egyes készülékek nem csak megfigyelik egymás jelét, hanem előre tudják a forgalomban lévő összes többi jármű aktuális helyét és teljes útvonalát akkor ezek figyelembe vételével ténylegesen optimális útvonalak tervezhetőek. Ebből az alapfeltevésből kiindulva kétféle módszert alkalmaztam a járművek útvonaltervezésének optimalizálására.

2.5.2. Ciklikus útvonal tervezés

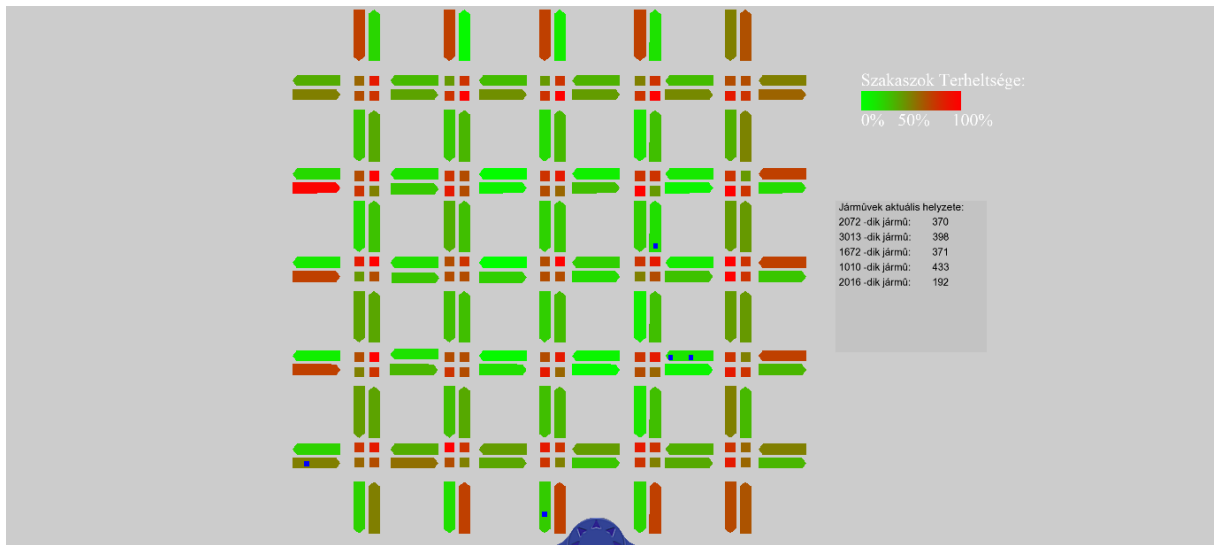
A hálózat jelzési ciklusokhoz szinkronizáltan minden ciklus elején újratervezzük a hálózatban aktívan résztvevő járművek útvonalát. A hálózatot leíró gráfot az egyes szakaszokon lévő aktuális járműszám alapján súlyozzuk, és számoljuk újra az egyes járművek útvonalát. Ezzel a módszerrel ha futás közben a hálózat alakulás miatt az aktuálisan használt útvonalnál van jobb, akkor az egyes járművek azt fogják választani. Így elkerülhetőek az olyan esetek, amikor egy korábban tervezett útvonal a hálózati forgalom alakulása miatt lényegesen rosszabb lesz, mintha adott pillanatban újraterveznénk azt.

2.5.3. Ciklikus útvonal tervezés súlyozással

A 2.5.2 módszerhez hasonlóan minden ciklusban újratervezzük az egyes útvonalakat, viszont itt az újratervezés során a járművek egyes új útvonalait tovább súlyozzuk. Ez azért is lehet hasznos, mert ha sok jármű választja ugyanazt az útvonalat akkor egy út helyett több felé lesznek elterelve. Ezek alapján a 2.5.1 vázolt problémát nem csak utólagosan javítja mint a 2.5.2 megoldás, hanem előre tervezéssel megpróbálja azt megelőzni.

2.6. Megjelenítés

A 1.1 fejezetben említett megjelenítő felület előnye, hogy egy helyen látható és megfigyelhető a hálózat minden útszakaszának aktuális terheltsége és az egyes kereszteződésekhez tartozó zöld jelzés eloszlások. Ezen felül előre választott járművek egyes mintavételben elfoglalt helyei mind grafikusán, mind számérték szerűen fel vannak tüntetve. Így ez a felület megfelelő mértékben alkalmas az egyes zöld jelzéseknek és a járműforgalom alakulásának viszonyának szemléletes megjelenítésére.



2. ábra. Egy pillanatként a hálózatról szimuláció közben az elkészített megjelenítő felület segítségével

3. Tesztadatok

A tesztek során két fajta tesztadatsort használtam. Mindkét tesztadatsorban a járművek cél és kezdőkoordinátája jelent nagy eltérést. Mindegyik fajtából 5 db különböző, teljesen független adatsor készült - csak az elvek maradtak meg - ezzel is elősegítve kiértékelésekor az általánosabb eredmények meghatározását.

1. teszt adatsor - Globális források és nyelők használata

Ezzel a fajta megközelítéssel azt lehet jól vizsgálni, hogy hogyan viselkedik egy nagyobb város kisebb városrésze, ahol az egyes járműveknek csak áthaladásra van lehetősége. Így az összes jármű valamelyik globális hálózati forrásból indul, és a vizsgált részen áthaladva távozik a hálózatból valamelyik szakaszon keresztül ami a forgalom kivezetésére szolgál.

2. teszt adatsor - Lokális források és nyelők használata

Mivel a makroszintű modell alapján lehetséges az, hogy bármelyik a hálózatban szereplő szakasz lehessen forrás is és nyelő, így terveztünk egy olyan tesztadatsort ami pont ezt használja ki. Itt az egyes járművek a hálózat bármely szakaszából indulhatnak és bármelyik

szakaszába érkehetnek. Az egyetlen megkötés egy minimális úttávolság volt, ami meg kell tenniük mielőtt kilépnek a rendszerből. Ez miatt ezekkel az adatokkal egy olyan környezetet lehet jól vizsgálni, ahol a járművek leparkolhatnak az utak szélén vagy parkolókbán.

Ezen adatsor eredményeihez hasonló forgalom eloszlás figyelhető meg a késő délutáni órákban, amikor a legtöbben végeznek a munkájukban és indulnak hazafelé. Itt persze feltételezzük, hogy végtelen sok jármű elfér ezeken a parkoló helyeken.

Ebből az adatsorból csak az egyikre sikerült minden módszert kipróbálnia megnövekedett szimulációs idő miatt.

4. Szabályozás mentes - magára hagyott rendszer

A legtöbb olyan területen ami struktúrájában hasonló a feljebb vázolt négyzethálós elrendezéshez ott elmondható, hogy átlagosan az egyes csomópontokba a becsatlakozó szakaszok egyenlő arányban részesülnek használható zöld jelzés időből. Ez alapján a kiinduló helyzetünk az, hogy minden csomópontban minden becsatlakozó szakasz azonos hasznos jelzés időt kap az egyes ciklusokban. Ez lesz az etalon rendszer, aminek különböző értékeinek javítása a cél.

5. Szabályzási módszerek

Manapság többfajta közlekedés szabályzására alkalmas módszer létezik [4], ezek hatékonysága és alkalmazhatósága természetese eltérő. A felgyorsult világban célszerű olyan rendszereket tervezni, amik képesek lépést tartani a rendszer folyamatos változásával. Ezen megfontolásból a forgalom rezponzív rendszereket vizsgáljuk a továbbiakban. Ezen módszer lényege, hogy a szabályzó az aktuális jármű folyam alakulása alapján képes az egyes csomópontok zöld jelzéseit gyors ütemben változtatni. Az egyes változásokra pedig nagyon gyorsan reagál. Az implementált szabályzók ciklusideje teljes szinkronban van a hálózat zöld jelzéseinek ciklus idejével. Tehát minden zöld jelzés ciklus megkezdése előtt a hálózat aktuális értékei alapján frissítjük szakaszok beavatkozó jeleit.

Kétfajta megközelítésben oldottuk meg a problémát. Első körben a járműfolyamok aktuális méretétől függően egyszerű heurisztikus módszerrel osztottuk szét az egyes csomópontok zöld jelzésit a becsatlakozó szakaszoknak. Másik megközelítésben egy FLC-t – fuzzy logic controller – [5], [12] alkalmaztunk különböző alakokban.

Minden esetben az állandó ciklus időközön belül a hasznos zöld jelzések megfelelő kiosztása volt a cél. Minden esetben megvizsgáltuk, hogy a járművek útvonalának újraszámolása illetve a már terhelt útvonalak újra súlyozása milyen hatással volt az áteresztőképességre, átlagosan forgalomban töltött illetve tilos jelzések miatti várakozási időre.

5.1. Heurisztikus szabályzó

A kiindulási modell eredményei és a valóságos rendszerek megfigyelése alapján a szabályzási megfontolás az volt, hogy az egyes csomópontokban azon szakasz részesüljön nagyobb zöld jelzésből ahol több jármű van. Ezt természetesen minden csomópontban külön számoljuk így egyfajta lokális irányítást alakítunk ki. Az egyes csomópontokban oda kell figyelni, hogy a kiosztott zöld jelzésekre érvényes maradjon a teljes valószínűség tétele.

A fentiek alapján az n -dik kereszteződés i -dik bemenő szakaszának hasznos jelzése:

$$gt(i) = C_{n,max} \frac{z_{n,i}}{\sum_{k=1}^4 z_{n,k}} , \quad \forall i \in k \quad (8)$$

alakban írható fel. Az egyenlet előnye, hogy megfelelően tömör és egyszerűen implementálható akár nagyobb rendszer esetén is.

5.2. Fuzzy alapú szabályzó

A megvalósított nemlineáris modell szabályzásához jelen esetben egyszerű volt találni egy matematikai összefüggést aminek a hatására érezhetően javulnak a hálózati paraméterek. Szükség esetén egy tömören leírt alakba nehezen tudunk speciális eseteket belefoglalni. Ezért indokolt lehet az egyes csomópontok szabályozására bonyolultabb nem lineáris szabályzót alkalmazni.

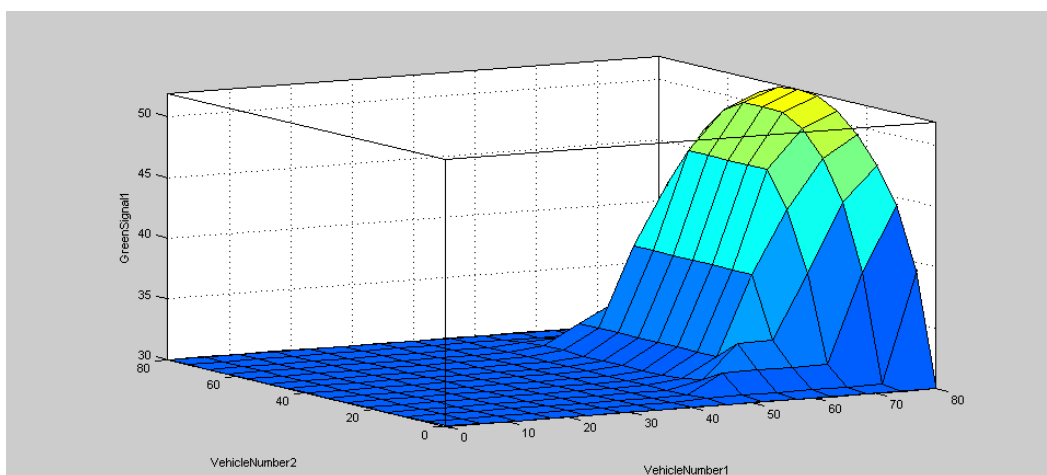
Egy fuzzy szabályzási rendszer használatával a fentieket könnyedén megtehetjük illetve tagsági függvények módosításával különböző lehetőségeket érhetünk el.

Tekintve hogy az egyes csomópontokra alkalmazott fuzzy szabályzók 4 bemenetűek és 4 kimenetűek, az egyes kialakított szabályrendszerek száma a felhasznált tagsági függvények számától függően nagyon nagy is lehet. Ezért minden csomópontra azonos tagsági függvényekkel és szabályrendszerrel rendelkező szabályzót terveztem. Ez mellett az egyes változók leírásához 3 db gauss-os tagsági függvény használtam. Így a teljes szabályrendszer lefedéséhez 81 db szabályt kell definiálni. Ez mellett nagy egyszerűséget jelent még, hogy

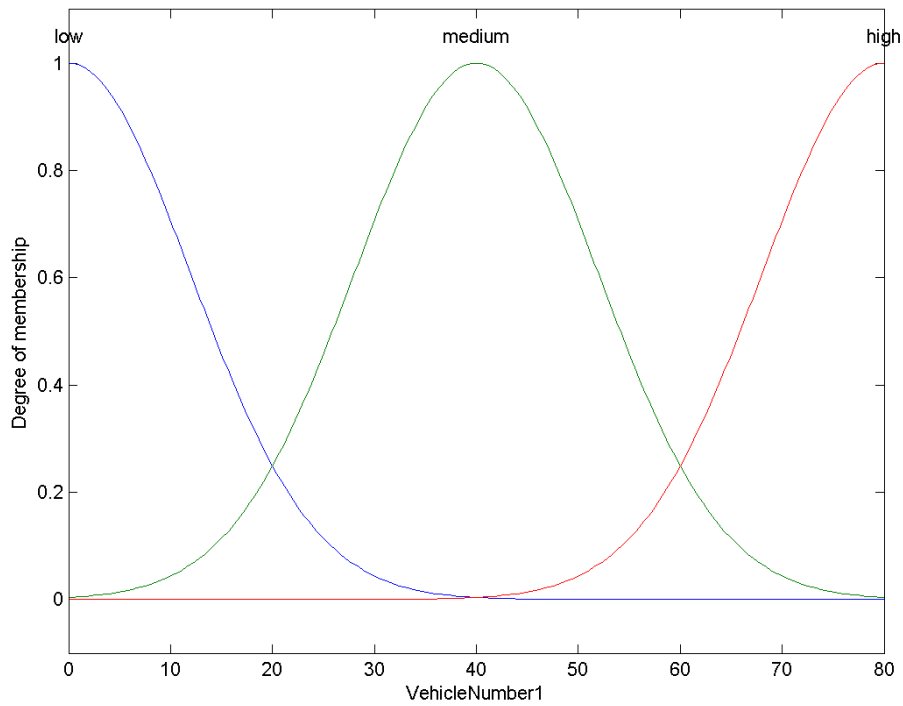
a bemeneti változók alakulását szolgáló módon követik a kimenetek. Tehát logikusan ha az egyik szakaszhoz magas járműszám tartozik akkor ő magas jelzést szeretne magának. Minden megvalósításban az egyes kimeneti változók zérus és maximális ciklusidő között vehetnek fel értéket és a szabályzók által visszaadott eredményeit még normaljuk úgy, hogy teljes valószínűség tétele érvényes maradjon minden csomópontban. Az összes változat megvalósításához Mamdani implikációt és az egyes változók között t-normákat alkalmaztam.

5.2.1. Nem teljes lefedés

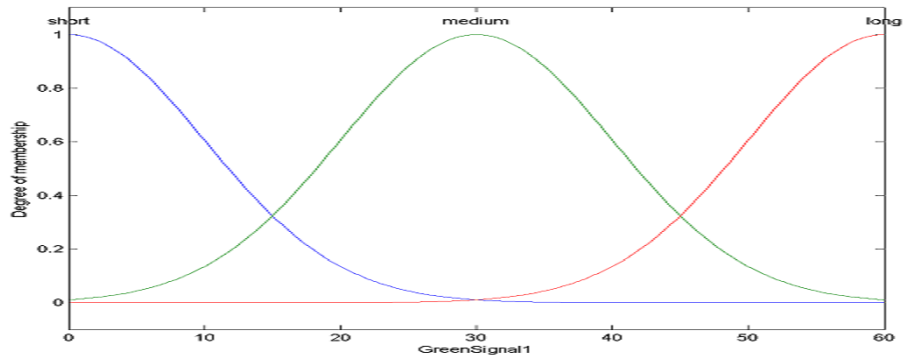
Mivel a lefektetendő szabályrendszer sok és a szabályozást nélkülöző rendszer eredményi alapján nem indokolt minden lehetséges változatra kombinációt lefedni így első körben egy 18 szabálybázison alapuló rendszert tesztelünk. Itt csak a leggyakrabban előforduló esetek leírására térünk ki.



3. ábra. Szabálybázis



4. ábra. Bemeneti változó tagsági függvénye



5. ábra. Kimeneti változó tagsági függvénye

5.2.2. Teljes lefedés

A teljes szabálybázis lefedése esetén a tagsági függvények módosításával elérhetünk különböző közel lineáris vagy nemlineáris kapcsolatot az egyes szakaszok terheltsége és a rá eső

zöld jelzés között. Ezt a lehetőséget kihasználva 3 fajta megközelítést alkalmaztunk teljes lefedés esetén. Az egyes megvalósításokban a tagsági függvények paramétereit változtattuk. Az egyes megvalósítások minden csomópontokban szakaszonként megegyeznek.

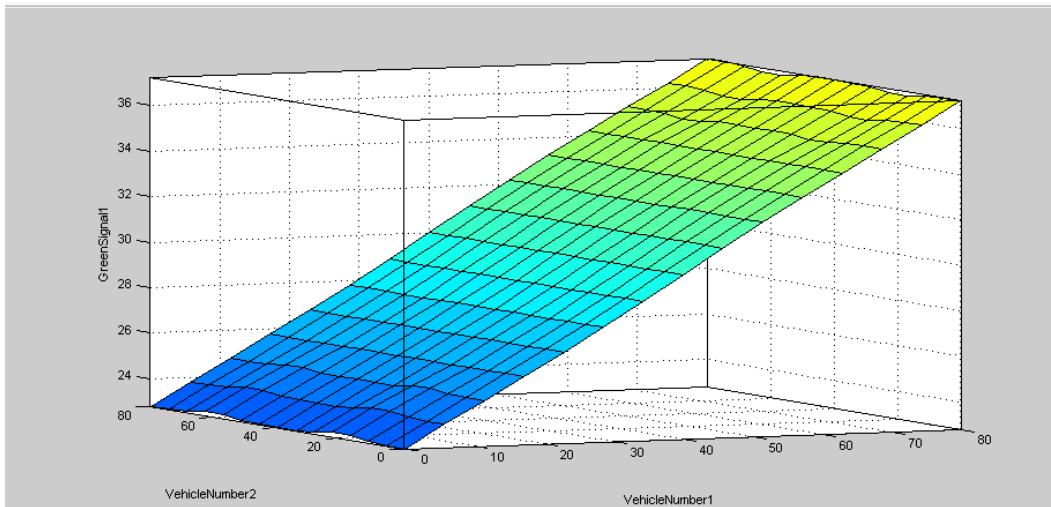
Az 1. táblázatban a FLC alkalmazásakor az egyes szakaszokhoz használt különböző gauss görbe alakú tagsági függvények értékei találhatóak.

1. táblázat. Megvalósított tagsági függvények

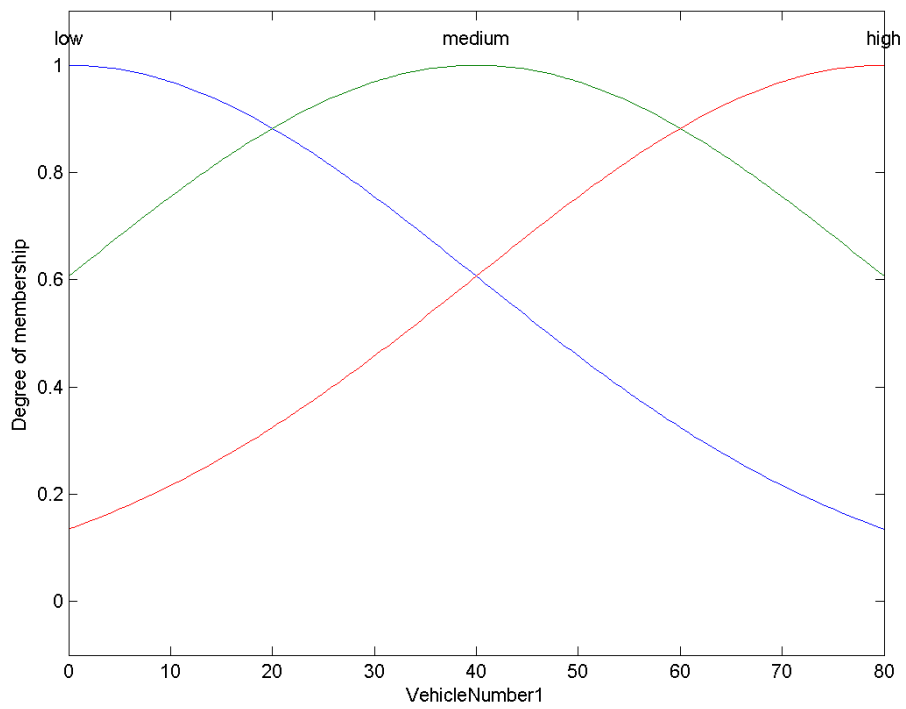
	Bemenő szakasz			Zöld jelzések		
	low	medium	high	short	medium	high
nem teljes lefedés	$\mu = 0$ $\sigma = 12$	$\mu = 40$ $\sigma = 12$	$\mu = 80$ $\sigma = 12$	$\mu = 0$ $\sigma = 10$	$\mu = 30$ $\sigma = 10$	$\mu = 60$ $\sigma = 10$
lineáris közelítés	$\mu = 0$ $\sigma = 40$	$\mu = 40$ $\sigma = 40$	$\mu = 80$ $\sigma = 40$	$\mu = 0$ $\sigma = 5$	$\mu = 30$ $\sigma = 5$	$\mu = 60$ $\sigma = 5$
Exponenciális közelítő	$\mu = 0$ $\sigma = 15$	$\mu = 40$ $\sigma = 1$	$\mu = 80$ $\sigma = 15$	$\mu = 0$ $\sigma = 5$	$\mu = 30$ $\sigma = 10$	$\mu = 60$ $\sigma = 5$
lineárisnál laposabb	$\mu = 0$ $\sigma = 10$	$\mu = 40$ $\sigma = 40$	$\mu = 80$ $\sigma = 10$	$\mu = 0$ $\sigma = 30$	$\mu = 30$ $\sigma = 5$	$\mu = 60$ $\sigma = 30$

Lineáris közeli kimeneti görbe

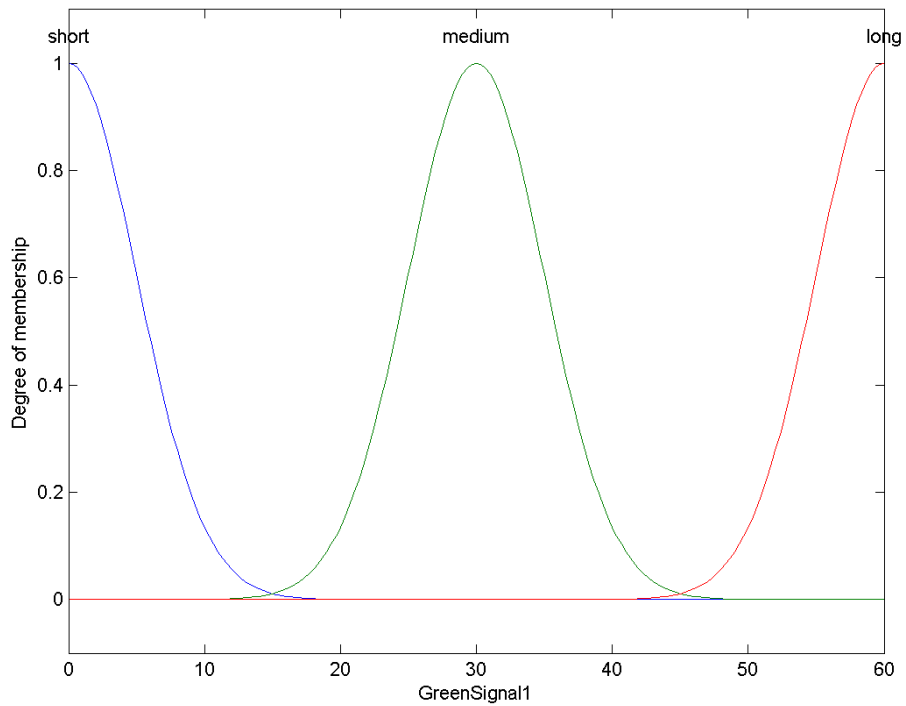
Lineáris megközelítésben a jelzések alakulása egy közel egyenes szakasz mentén halad a 6 görbe alapján.



6. ábra. Szabálybázis



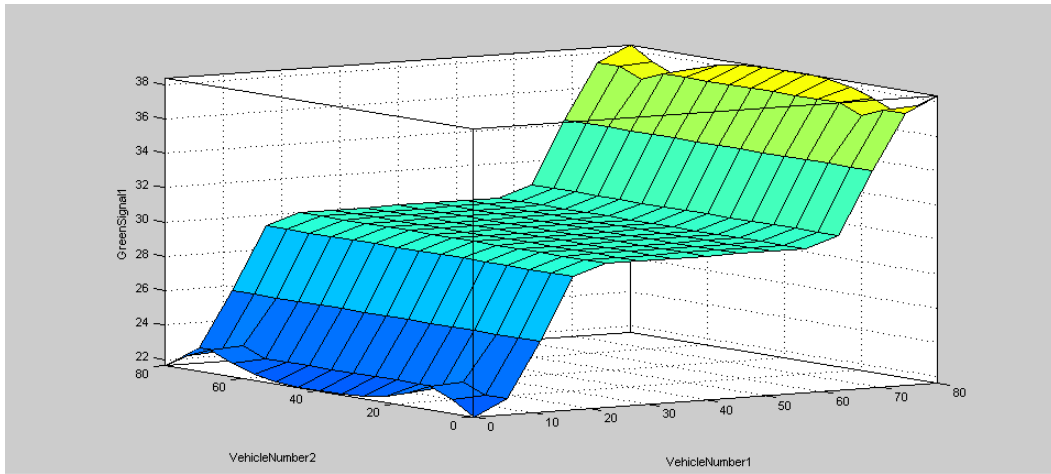
7. ábra. Bemeneti változó tagsági függvénye



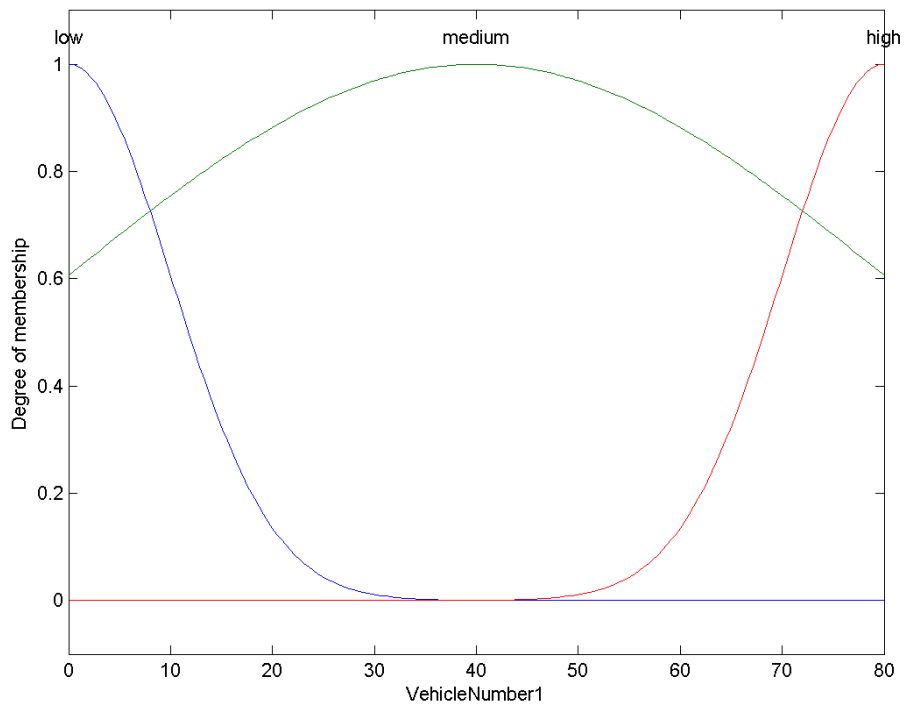
8. ábra. Kimeneti változó tagsági függvénye

Lineárisnál laposabb kimeneti görbe

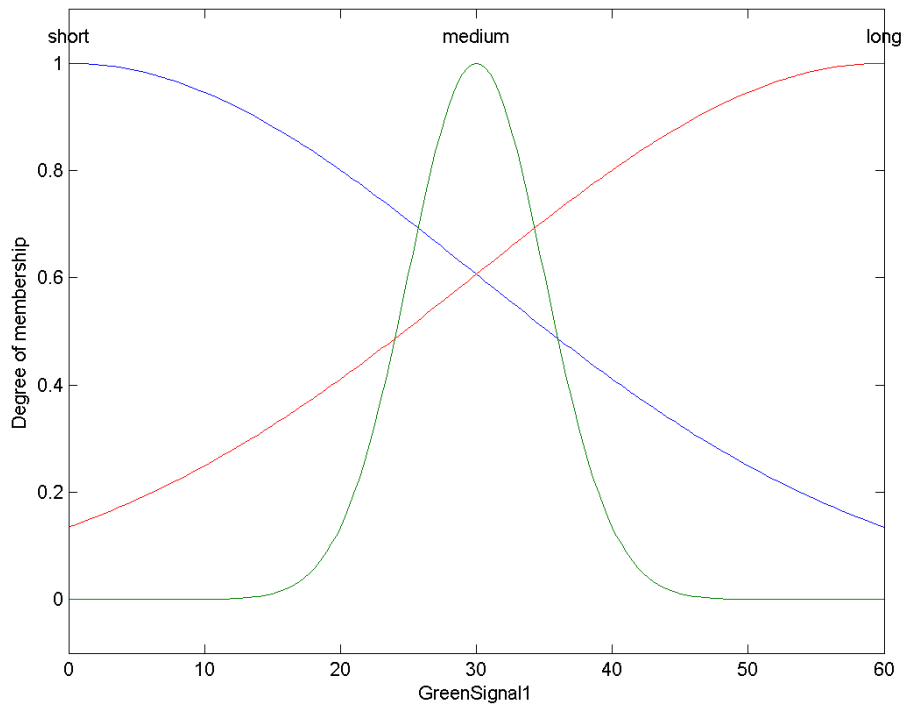
A teljes szabályrendszer lefedése után a 9. ábrához hasonló kimeneti görbék születtek a 10 és 11 -ban használt tagsági függvényekkel. Ezért kicsi módosítással a bemeneti változó kezdő és végétérteke környékén nagyobb meredekséget alkalmaztunk.



9. ábra. Szabálybázis



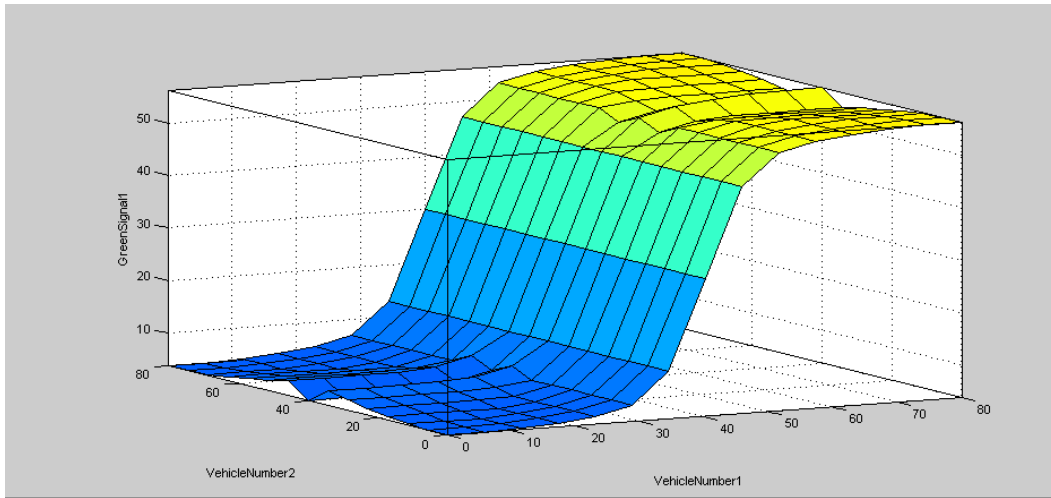
10. ábra. Bemeneti változó tagsági függvénye



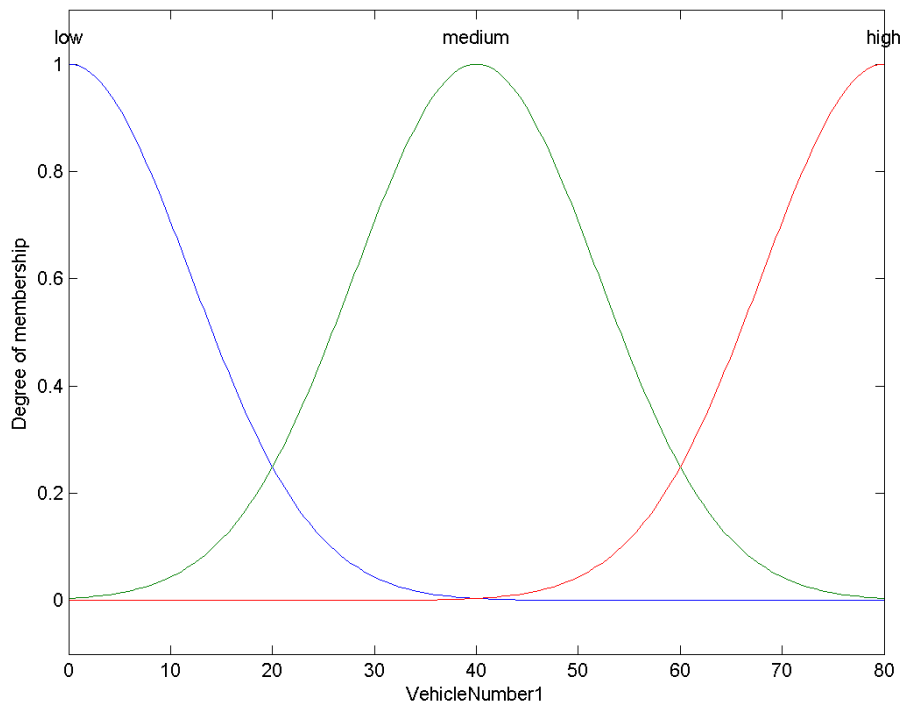
11. ábra. Kimeneti változó tagsági függvénye

Exponenciálist közelítő kimeneti görbe

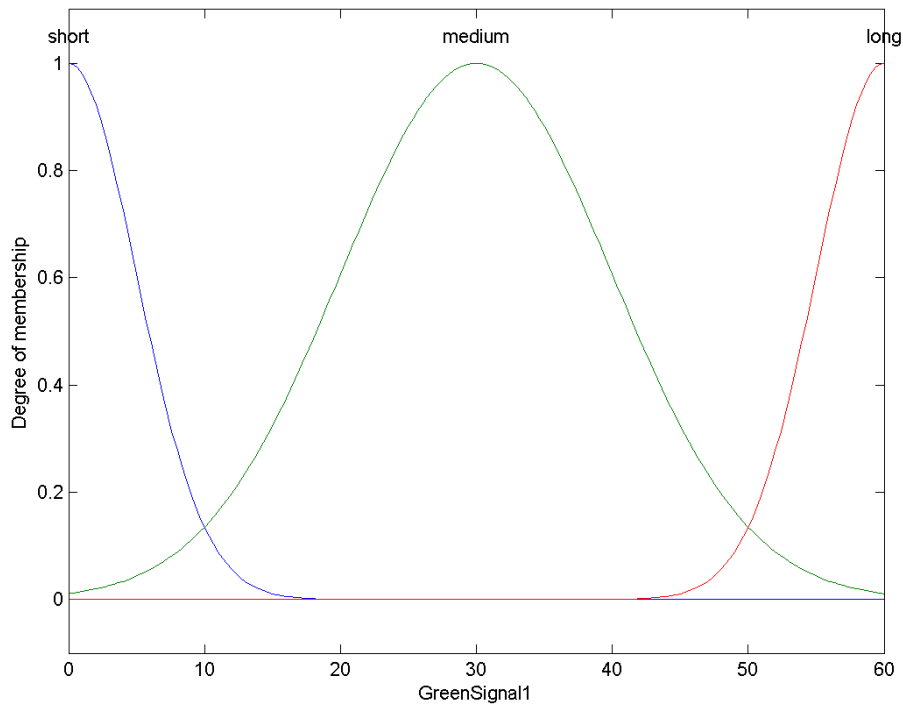
A 9 megvalósítás fordítottját csináltuk ebben az esetben, és a kimeneti görbe középpértéknél alkalmaztunk nagy meredekséget. Így a bemeneti és kimeneti változók leírásához 13 illetve 14 tagsági függvényeket alkalmaztunk.



12. ábra. Szabálybázis



13. ábra. Bemeneti változó tagsági függvénye



14. ábra. Kimeneti változó tagsági függvénye

6. Optimalizálás

A különböző szabályzási módszerek mellett érdemes a nem szabályzott paramétereket is időnként módosítani, optimalizálni. A valós környezetben is az egyes járműveknek meghatározott útvonal legtöbbször csak abban az időpillanatban optimális amikor az meghatározásra kerül. Viszont a teljes rendszer folyamatos változása miatt lehetséges, hogy egy korábban meghatározott és legjobbnak vélt útvonal helyett már mást tekintünk optimálisnak. Ez könnyen belátható mivel a forgalom eloszlása folyamatosan változik a teljes hálózatban. Ezt a problémát próbálja megoldani az egyes járművek útvonalának újratervezése és súlyozása.

6.1. Útvonalak újratervezése

A hálózati folyamatok és jármű eloszlások folyamatos változásának hatását figyelembe tudjuk venni, ha az egyes járművek útvonalát nem csak az elindulás pillanatában választjuk

meg. Érdemes lehet időnként újratervezni a haladási irányokat úgy hogy az aktuális járműűréségeket figyelembe vesszük. Jelen tanulmányban a hálózati irányítási ciklusokkal szinkronban minden a hálózatban mozgó járműnek az útvonalát újraszámoltuk az aktuális szakasz terheltségek függvényében. Ezzel megpróbáljuk kiküszöbölni azt a problémát, ha a kezdetben meghatározott útvonal idő közben lassabb haladást biztosít mint egy másik útvonal.

6.2. Útvonalak újraszűlyozása

Ezen felül érdemes foglalkozni egy olyan problémával ami tesztek folyamán előfordult, és valós környezetben gyakori probléma. Mégpedig az, hogy a sofőrök gyakran a jól bejáratott útvonalat használják, és ezt az útvonalat sokan részesítik előnyben a többivel szemben. Ennek hatása, hogy egy ilyen útvonalon nehezebben és lassabb lehet haladni mint egy más, esetenként hosszabb vonalon.

Ez a mi esetünkben úgy valósul meg, hogy az összes olyan jármű aminek azonos a kezdő illetve végpontja, azok ugyan azt az útvonalat választják. Viszont ezt az vonalat mások is használják, így könnyen telítődésbe futhat. Erre az esetre próbálunk megoldást keresni úgy, hogy az egyes járművek által meghatározott útvonalat felsűlyozzuk. Így a soron következő jármű már kevésbé kedvezőnek fogja vélni azt így mást is választhat majd. Ezért a korábban azonos útvonal helyett 2-3 különböző útvonalon fog haladni és jobban kihasználják a hálózatot.

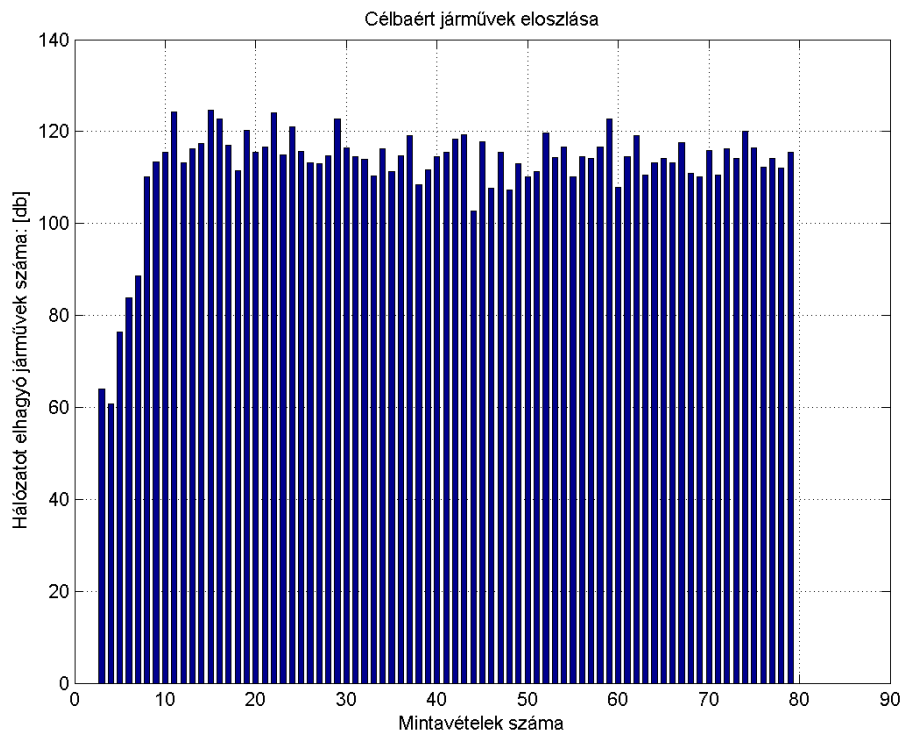
7. Eredmények

Egyszerű megközelítés alapján, ha az egyes járművek kevés időt töltenek a hálózatban akkor több jármű érheti el a célját. Ez abból kiindulva, hogy több jármű esetén azok nagyobb valószínűséggel fognak azonos útvonalon haladni, így sorban állásra kényszerülhetnek az egyes csomópontokban, ami lassítja a haladásukat. Ez a feltevésünk minden tesztünk esetében igaznak bizonyult és elmondható, hogy az az algoritmus és optimalizálási eljárás aminek hatására az egyes járművek minimális időt töltöttek a hálózatban, ott volt a hálózatnak az áteresztőképessége a legnagyobb, és ott kellett az egyes járműveknek a legkevesebbet várakozniuk piros jelzések hatására. Ezeket az értékek a [2] és [3] táblázatok tartalmazzák.

7.1. Szabályozatlan rendszer

1. teszt adatsor

A 4. fejezetben vázolt rendszer erre az adatsorra adott értékei alapján az 15. ábra szemlélteti legjobban a hálózat áteresztőképességét. Ez annyit jelent, hogy szabályozás nélkül percenként 450 db jármű éri el a célját. Más megközelítésből a hálózatban célba ért 9000 db járműnek egyenként 1200 métert tesz meg átlagosan 205 másodperc alatt. Ezeket az értékeket össze hasonlítva közel azt az eredményt kapjuk mintha google maps [8] segítségével számoltunk volna magunknak útvonalat Budapesten a Goldmann György tér és az Irinyi József ut 42. között.

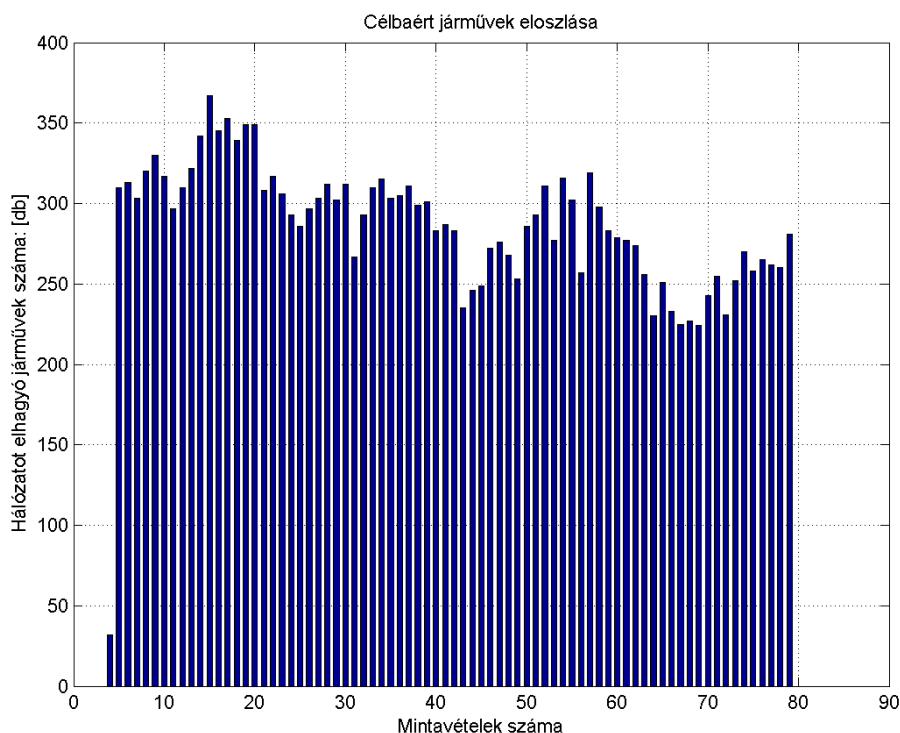


15. ábra. Egyes mintavételekben a kiáramlott járművek száma

2. teszt adatsor

Erre az adatsorra a hálózatunk áteresztőképessége az 16. ábrán figyelhető meg. Jól láthatóan itt az egyes mintavételkor jóval több jármű tudott eljutni a céljáig. Ez mellett viszont jelentősen megnövekedett a járművek által a hálózatban töltött idő illetve a piros

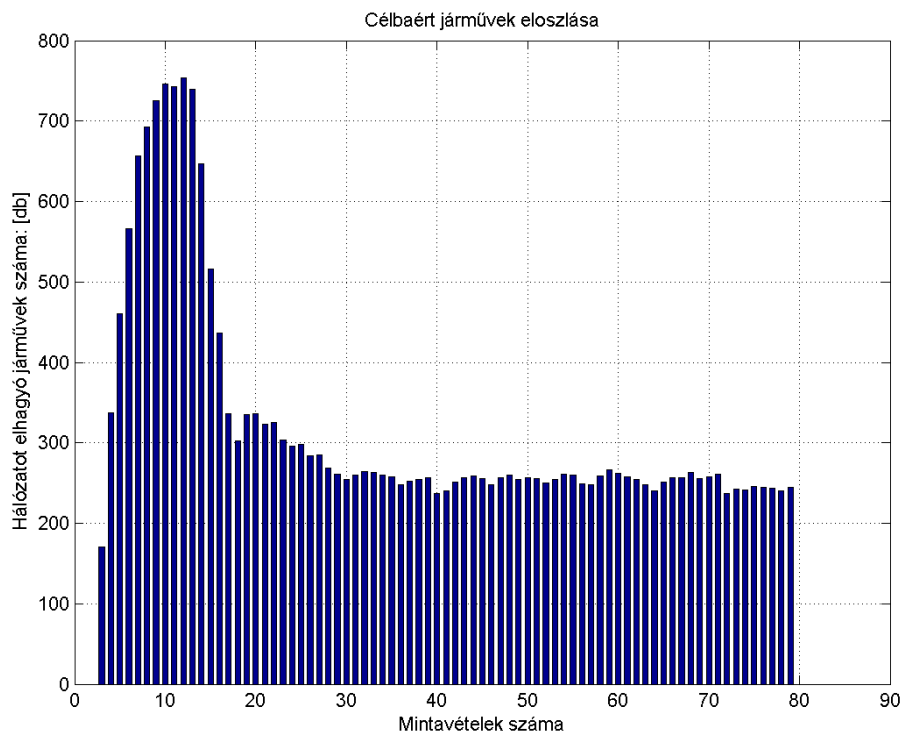
jelzésekkor a várakozási idő. A korábbi analógiával élve, ugyan azt az utat két perc késéssel tudnánk megtenni.



16. ábra. Egyes mintavételekben a kiáramlott járművek száma

7.2. Különböző Fuzzy megvalósítások

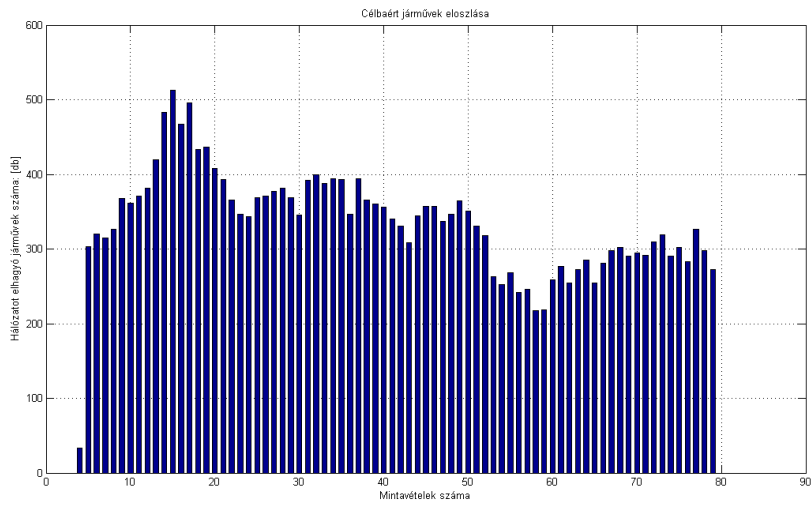
Az egyes megvalósításokról elmondható, hogy mindegyiknek sikerült túlszárnyalnia [4]-ben kapott eredményeket, de megvalósításonként eltérő módon. A első tesztadatsorral az összes Fuzzy szabályzásnál az egyes mintavételekben kiáramlott járműszám alakulása a 17 ábra szerint alakul. Ebben megfigyelhető, hogy a 20. mintavételig nagyon sok jármű hagyja el a hálózatot minden mintavételben utána pedig ez az érték lecsökken arra a szintre amit a szabályozatlan rendszernél is tapasztaltunk. Ez a jelenség annak tudható be, hogy az eddig a pillanatig képesek voltak azok a járművek átmenni a hálózaton, amiknek kezdeti úthossza jóval az átlagos alatt volt.



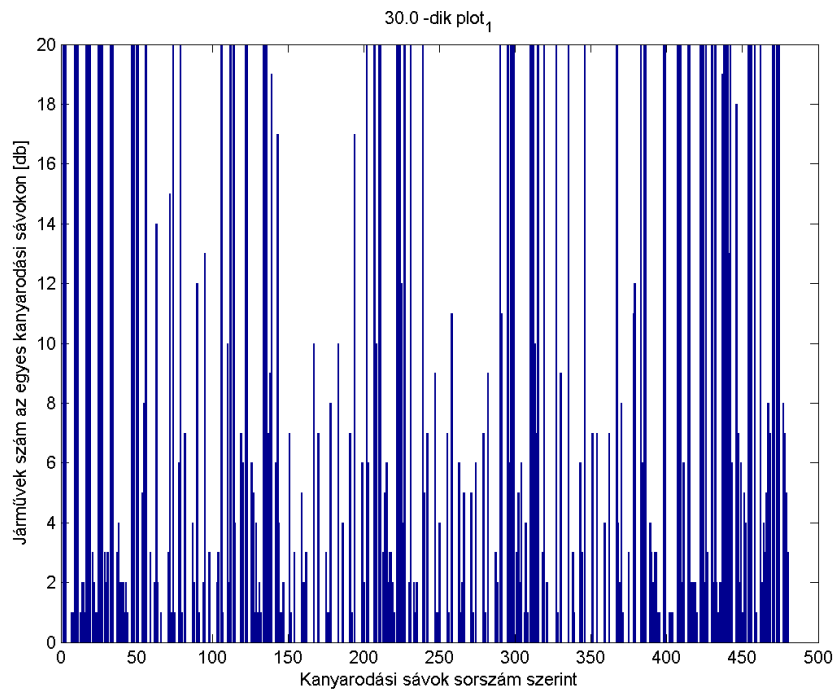
17. ábra. Egyes mintavételekben a kiáramlott járművek száma exponenciálisan közelítő Fuzzy megvalósítás mellett az első tesztadatsor használatával

A második fajta tesztadatsorra az egyes mintavételekben a kiáramlott járművek száma az 18. ábra alapján alakul. Ebben az esetben már nem jelenik akkora túske a szimuláció korai szakaszában. Illetve a 3. táblázat értékei alapján látható, hogy nem okoz akkora változást a szabályzó mint az első tesztadatsor alkalmazása esetén.

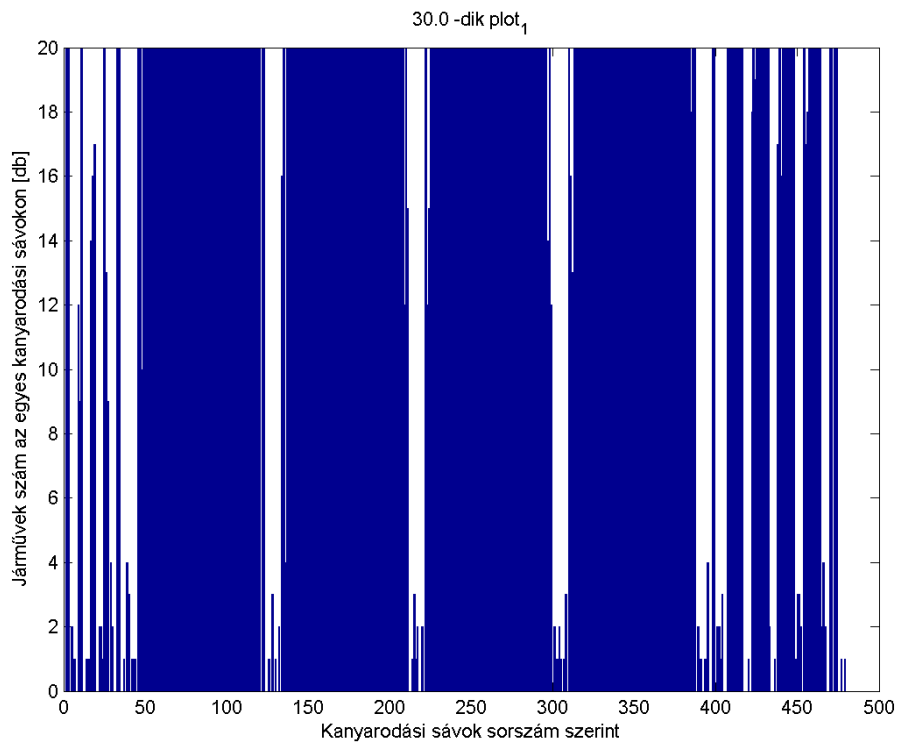
Ez könnyen belátható, ha megfigyeljük a két különböző tesztadatsor esetén a járművek számának alakulását az egyes szakaszokon. Amíg az első tesztadatsor mellett csak némelyik szakasz telített teljes mértékben 19. ábra addig a második tesztadatsorral szinte az összes szakaszon maximális a járműszám 20. ábra .



18. ábra. Egyes mintavételekben a kiáramlott járművek száma exponenciálist közelítő Fuzzy megvalósítás mellett a második tesztadatsor használatával



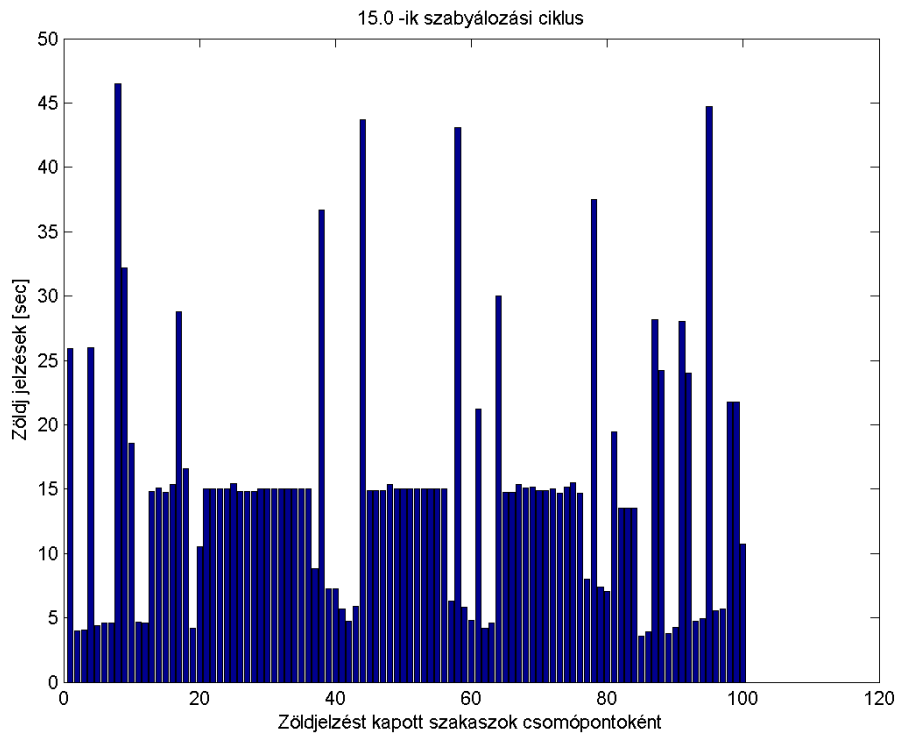
19. ábra. Járművek számnak eloszlása az egyes mintavételekben az egyes tesztadatsor használatával



20. ábra. Járművek számnak eloszlása az egyes mintavételekben a második tesztadatsor használatával

Ezeknél a megvalósításoknál elmondható, hogy mindkét tesztadatsor használata mellett közel azonos eredményeket mutatnak az egyes vizsgált paraméterekben. Egyik megvalósítás sem emelhető ki a többi közül, mert amelyik az egyik paraméterben jónak bizonyult akkor egy másikban alulmaradt a többivel szemben.

Ez annak is betudható, hogy az egyes csomópontokban a minimális járműszámra nem reagálnak jól és olyankor ott a szabályozatlan rendszerhez hasonlóan működnek. Ez a jelenség jól megfigyelhető a 21. ábrán.

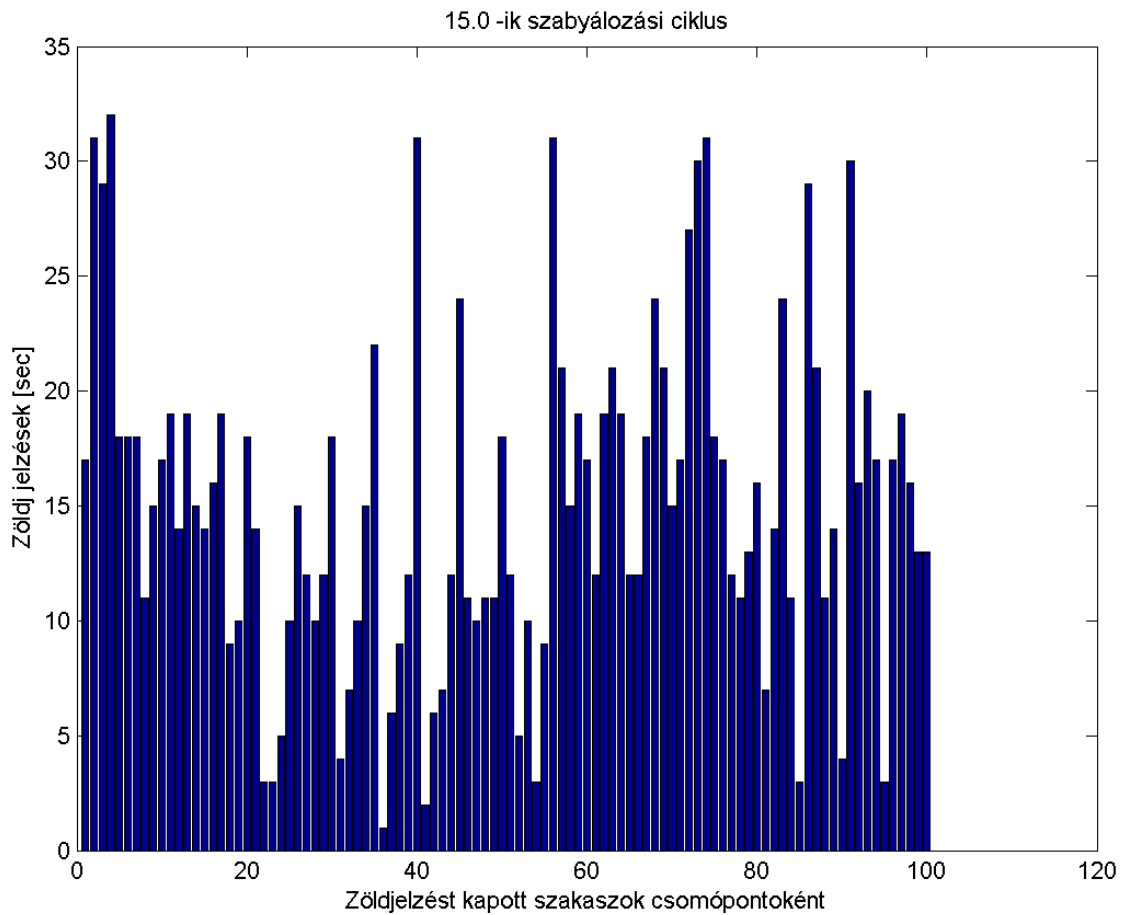


21. ábra. Zöld jelzések alakulása exponenciálisan közelítő fuzzy használata mellett

7.3. Heurisztikus módszer

Ez a módszer az egyszerűsége ellenére meglepően jó eredményeket produkált szinte minden megfigyelt paraméterben. A járművek áteresztőképességét az eredeti rendszer több mint 3-szorosára képes növelni az első tesztadatsorra, és az egyes járművek várakozási idejét is képes közel a harmadára csökkenteni. Második tesztadatsor használata mellett is jelentős javulást mutat a többi szabályzáshoz képest.

Mindkét tesztadatsorra teljesen hasonlóan alakul az egyes mintavételben kiáramlott járművek száma a fuzzy szabályzókhoz képest. Lényeges különbség a zöld jelzés ciklusok alakulásában van. Ezen szabályzó a többi megvalósításhoz képest jobban reagál az egyes szakaszokon a járművek számának alakulására. Így az egyes csomópontokban a zöld jelzések eloszlása – 22.ábra – kiegyensúlyozottabb mint a többi szabályzónál.



22. ábra. Egy átlagos zöld jelzés eloszlás heurisztikus szabályzás mellett az első tesztadat-sorra

7.4. Optimalizálások hatása

A kétfajta útvonal optimalizálási megközelítésről elmondható, hogy a szabályozatlan rendszer leszámítva a legtöbb esetben legalább az egyik hozzájárult a vizsgált paraméterek javulásához. Heurisztikus szabályzóval minden esetben az összetettebb, több útvonalra terelő változat kiemelkedő eredményeket mutat. Ezekről a módszerekről valószínűsíthető, hogy a valóságot jobban közelítő rendszerben is jól szerepelnének.

Az szabályozatlan rendszerhez jellemzőihez viszonyított értékeket különböző szabályzások és optimalizálási megfontolások mellett a 23, 24, 25, 26, 27 és a 28. ábrák tartalmazzák.

2. táblázat: I. típusú teszt adatsor eredményei

Szabályzási módszerek	hálózatban töltött idő	Várakozási idő piros jelzések mellett	Áthaladt járművek száma
Szabályozatlan rendszer	200	157	8863
Szabályozatlan rendszer útvonal tervezéssel	206	162	8865
Szabályozatlan rendszer útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	205	160	9000
Heurisztikus	136	45,4	25277
Heurisztikus útvonal tervezéssel	126	42.8	26633
Heurisztikus útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	121.6	41.4	26838
Fuzzy teljes lefedés nélkül	127.7	65.5	17208
Fuzzy teljes lefedés nélkül útvonal tervezéssel	124.2	57.9	18401
Fuzzy teljes lefedés nélkül útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	126.4	61.3	18463
Közel lineáris Fuzzy	135	64.3	16526
Közel lineáris Fuzzy útvonal tervezéssel	129.2	63	17215

Folytatás a következő oldalon

táblázat 2 – Folytatás az előző oldalról

Szabályzási módszerek	hálózatban töltött idő	Várakozási idő piros jelzések mellett	Áthaladt járművek száma
Közel lineáris Fuzzy útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	126.2	61.9	17467
Lineárisnál laposabb Fuzzy	136	66.5	15348
Lineárisnál laposabb Fuzzy útvonal tervezéssel	132.2	67.4	15977
Lineárisnál laposabb Fuzzy útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	130.4	68.6	15750
Exponenciálist közelítő Fuzzy	132.9	56.4	21789
Exponenciálist közelítő Fuzzy útvonal tervezéssel	133.4	55.2	23336
Exponenciálist közelítő Fuzzy útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	133.2	55.2	23036

3. táblázat: II. típusú teszt adatsor eredményei

Szabályzási módszerek	hálózatban töltött idő	Várakozási idő piros jelzések mellett	Áthaladt járművek száma
Szabályozatlan rendszer	318	230.5	22229

Folytatás a következő oldalon

táblázat 3 – Folytatás az előző oldalról

Szabályzási módszerek	hálózatban töltött idő	Várakozási idő piros jelzések mellett	Áthaladt járművek száma
Szabályozatlan rendszer útvonal tervezéssel	315	227.5	22390
Szabályozatlan rendszer útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	329	241	21950
Heurisztikus	274.7	221.5	23186
Heurisztikus útvonal tervezéssel	266.1	209.5	24335
Heurisztikus útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	249.3	161.7	29458
Fuzzy teljes lefedés nélkül	281.4	194	25740
Fuzzy teljes lefedés nélkül útvonal tervezéssel	273.5	186	26470
Fuzzy teljes lefedés nélkül útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	277.5	190	25753
Közel lineáris Fuzzy	280.62	193.17	25716
Közel lineáris Fuzzy útvonal tervezéssel	274.69	187.19	26866

Folytatás a következő oldalon

táblázat 3 – Folytatás az előző oldalról

Szabályzási módszerek	hálózatban töltött idő	Várakozási idő piros jelzések mellett	Áthaladt járművek száma
Közel lineáris Fuzzy útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	274.87	187.34	26366
Lineárisnál laposabb Fuzzy	280.16	192.7	26128
Lineárisnál laposabb Fuzzy útvonal tervezéssel	272.98	185.51	26786
Lineárisnál laposabb Fuzzy útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	273.9	186.36	26316
Exponenciálist közelítő Fuzzy	279.6	192.2	25956
Exponenciálist közelítő Fuzzy útvonal tervezéssel	275.8	188.34	26481
Exponenciálist közelítő Fuzzy útvonal tervezéssel és újrasúlyozással	272.2	184.7	25644

8. Eredmények összefoglalása

8.1. Különböző tesztadatsorok

A kipróbált szabályzások és útvonal optimalizálások közül mindkét tesztadatsorra egyértelműen kimagasló eredményeket értünk el a heurisztikus irányítás és súlyozásos útvonal tervezés kombinációjával. Az első tesztadatsor használata mellett vizsgált időszelést első

5 percében a hálózat elérte az maximális áteresztőképességének határait. Ez annyit jelent, hogy ideális esetben a beállított paraméterek mellett a globális forrásokon közel 2-3 db jármű hagyta el a hálózatot másodpercenként. Ez az érték valós rendszerekben is egy ideális maximumnak tekinthető.

8.2. Fuzzy kontra Heurisztikus szabályzó

Többször felmerült a kérdés a tesztelések során, hogy vajon miért tudott egy egyszerű megközelítés jobb eredményeket produkálni minden esetben mint egy összetettebb szabályzó. A válasz kézenfekvő amint végignézzük a jelen tanulmányban alkalmazott fuzzy megvalósításokat.

A hálózati modellünk előírja számunkra, hogy az egyes csomópontokban az effektív zöld jelzés hosszoknak teljesíteni kell a teljes valószínűség tételét, így ezek összegének minden esetben meg kell egyeznie a jelzési ciklusidővel. Ezt kétfajta megoldással tudjuk elérni.

- a Az egyes kiszámolt időigények összegét normáljuk a maximális ciklusidőhöz.
- b Ciklusidőt részhalmazokra bontjuk, és ezeket osztjuk szét megfelelő arányban az egyes szakaszoknak.

A fuzzy szabályzók megvalósításakor a tervező felületben - MATLAB fuzzy toolbox - nem találtam módot arra, hogy a b. megoldást kivitelezni tudjam. Ez miatt az így létrehozott fuzzy szabályzók ebben a formában nem optimálisak. A 3, 6, 9 és a 12 ábrákon látható is, hogy az egyes szakaszok zöld jelzései jóformán csak az adott szakasz járműszámától függ. Ez az oka annak is, hogy sokszor azonos jelzéseket kaptak egy csomóponton belül a szakaszok minimális terheltségek mellett.

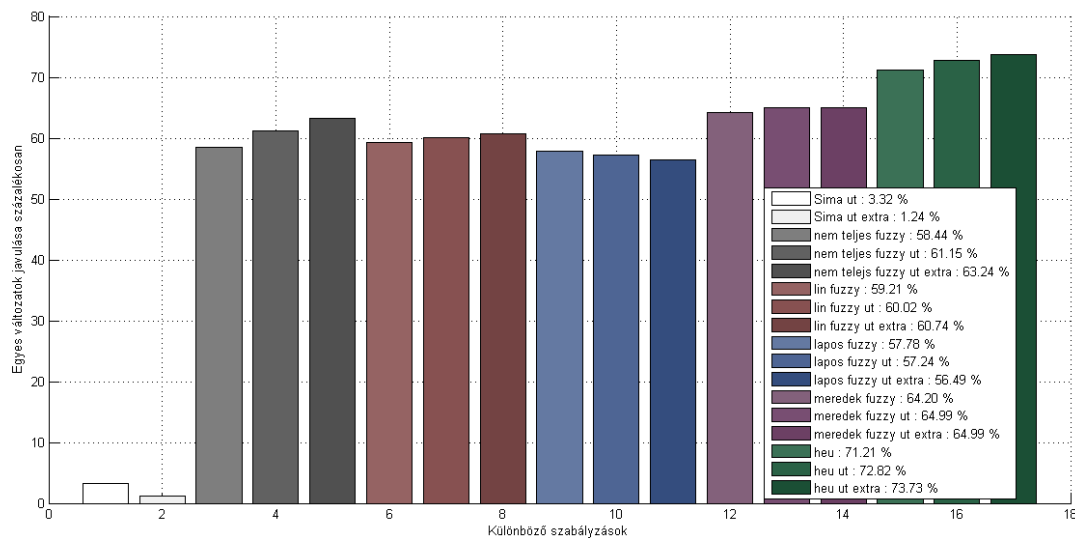
Érdemes lehet a továbbiakban egy összetettebb fuzzy szabályzást tervezni, ami a teljes valószínűség tételének nem normálás miatt tesz eleget, hanem a b. feltételt egyben magában hordozza.

8.3. Etalon rendszerhez viszonyított eredmények

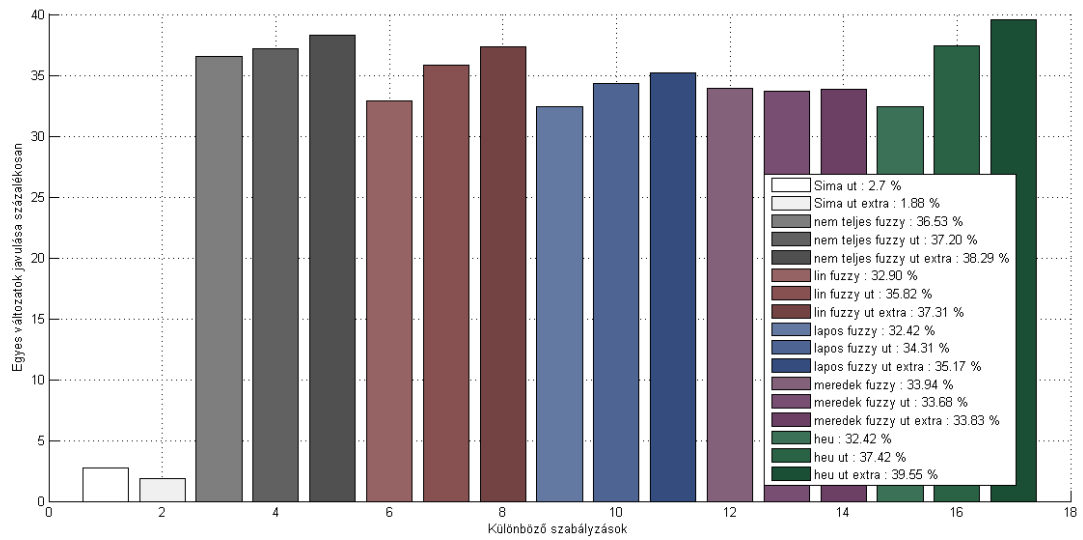
Az egyes szabályzók és optimalizálások kombinációit legegyszerűbben a szabályozatlan rendszerhez képest lehet megfigyelni. A fontosabb paramétereket jóságát a 9.

$$y = 100 \left(\frac{x - x_0}{x_0} \right) \quad (9)$$

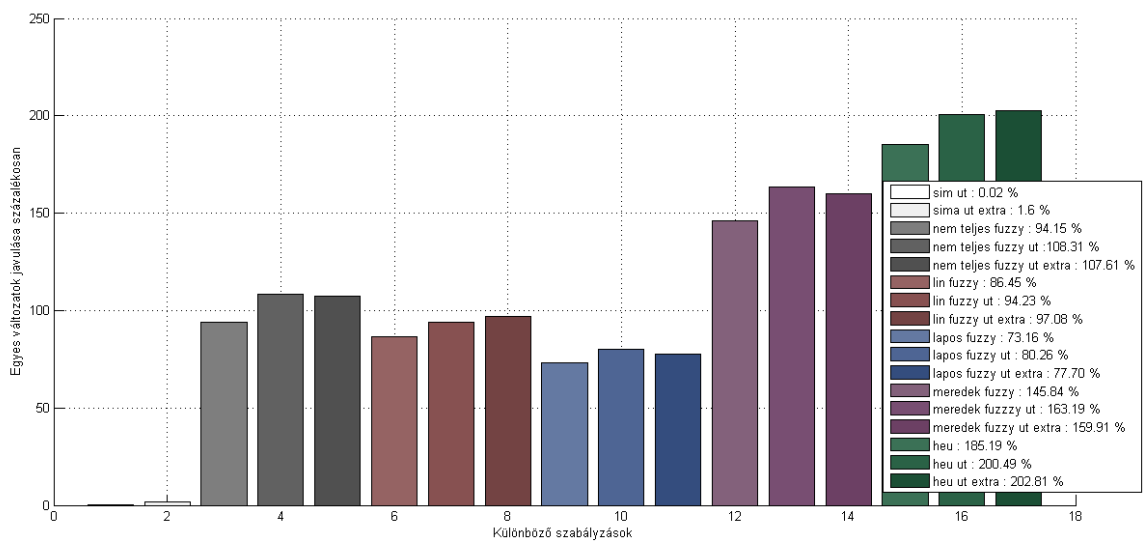
képlet alapján határoztam meg. Ahol x_0 mindig a szabályozás és optimalizálás mentes rendszer valamely paramétere, x pedig a különböző szabályozási illetve optimalizálási megfontolások kombinációjából adódó azonos paramétere. Így a 23., 24., 25. ábrák az első típusú, a 26., 27. illetve a 28. ábrák pedig a második típusú tesztadatsor alapján számolt értékeket tartalmazzák.



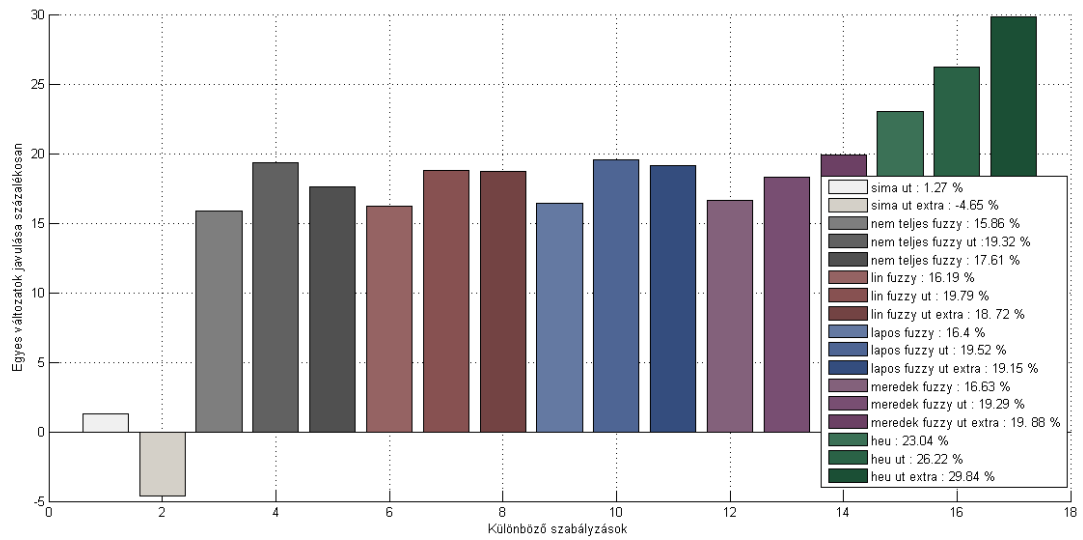
23. ábra. Várakozási idők javulása különböző szabályzóknál az egyes tesztadatsorra



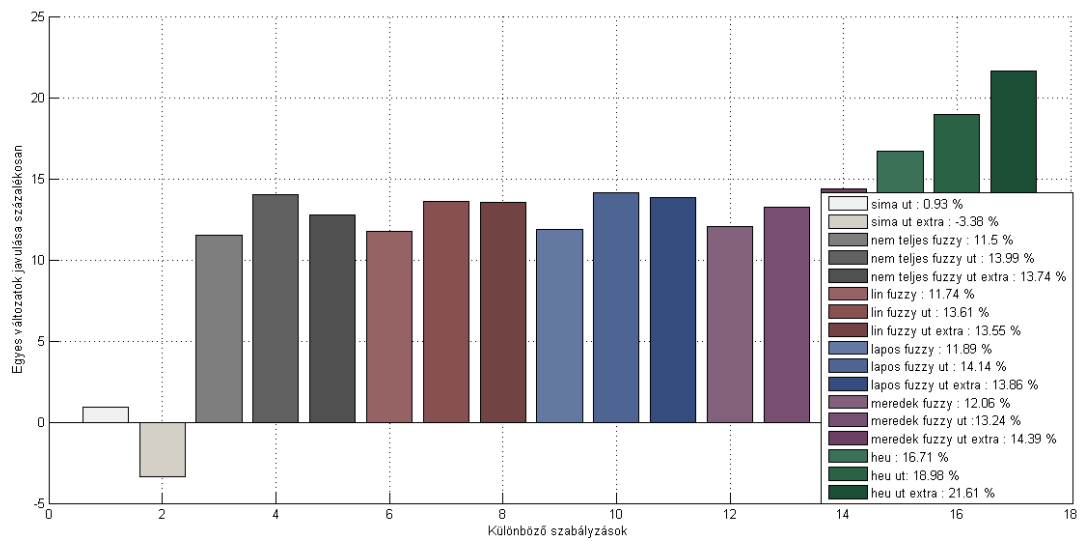
24. ábra. Hálózatban töltött idő javulása különböző szabályzóknál az egyes tesztadatsorra



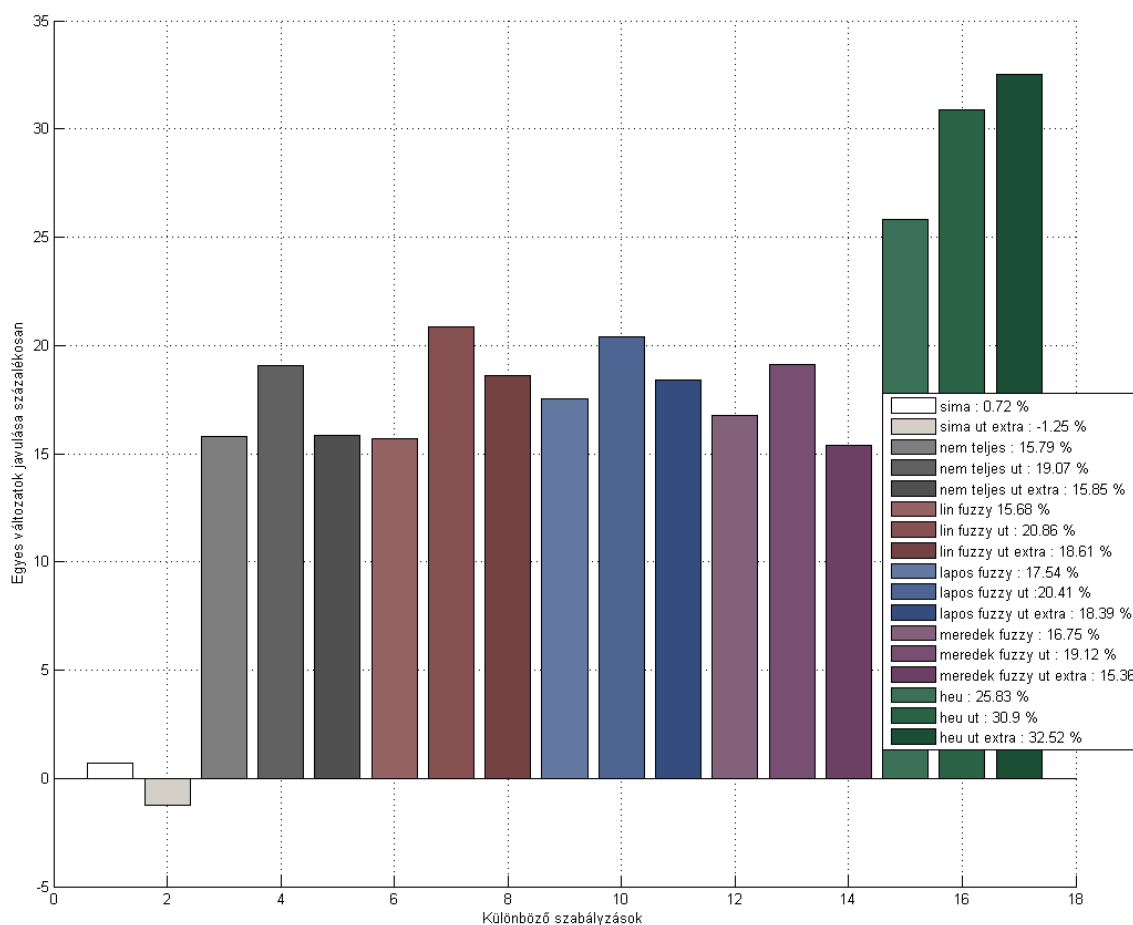
25. ábra. Célba ért járművek számának javulása különböző szabályzóknál az egyes tesztadatsorra



26. ábra. Várakozási idők javulása különböző szabályzóknál a kettes tesztadatsorra



27. ábra. Hálózatban töltött idő javulása különböző szabályzóknál a kettes tesztadatsorra



28. ábra. Célba ért járművek számának javulása különböző szabályzóknál a kettős tesztadatsorra

8.4. Felmerülő problémák

A felhasznált dijkstra algoritmusnak a legnagyobb hátránya, hogy lassú. Ez a második tesztadatsorban mutatkozik meg leginkább. Ciklusonként közel 400 másodpercet vett igénybe csak a hálózatban lévő járművek útvonalának meghatározása. Ez annyit tesz, hogy legjobb esetben minimum 2 órás szimulációval kell számolni. Tekintve, hogy valós időben csak 20 perces időszelét vizsgálata ilyen hosszú ideig tart a jelenlegi megvalósítás semmi képen sem alkalmas valós környezetben való használatra. Ezért különféle hardveres

és szoftveres gyorsításokat kell alkalmazni.

A kialakított szimuláció nagy számításigénnyel rendelkezik, így egy esetlegesen gyengébb architektúrájú eszközön a nettó futásidő meghaladhatja a 168 órát. Ez miatt indokolt mind hardveres mind szoftveres gyorsítás alkalmazása.

Erre többféle lehetőség adódik. Mindenképpen érdemes több útvonal tervezőt kipróbálni. Akár lágy számítási módszeren alapuló [9], akár egy hagyományos szemléletű A* [10] érdemes próbálkozni. Ez mellett kézenfekvő lenne több szálal végrehajtási [11] módot választani. Ezt az adatszerkezet és a probléma engedi nekünk, viszont klaszteres és GPU-s gyorsításhoz nem állt rendelkezésemre megfelelő eszköz.

9. Tovább lépési lehetőségek

Az egyes feladatok megvalósítása közben számos olyan lehetőségbe futottunk amit érdemes kipróbálni, viszont azok idő hiányában a jövőben készülnek el. Ezek nagy részétől a szimuláció több eredményének a javulását várjuk, illetve segítségükkel közelebb hozható a virtuális környezet a valódihoz.

9.1. Kanyarodási lehetőségek előírása a forgalom függvényében

Ahogy egy valóságos környezetben az eddigi tesztek eredménye is azt mutatja, hogy a járművek által kedvelt és legtöbbit használt szakaszok a legjobb irányítás mellett is hamar telítődnek és lassul rajtuk a forgalom. Ez a szituáció egyszerűen érhető, hiszen mindenki a lehető legjobbat fogja választani viszont minél többen használnak egy útvonalat, annál könnyebben fog túlcsoportulni és nagyobb valószínűséggel alakul ki nem kívánt torlódás.

Ez elkerülhető, ha lokálisan az egyes csomópontokban a kevésbé használt kanyarodási sávokat kiszolgáltatjuk a jobban terhelt sávnak. Ezt tehetjük úgy, hogy csak hozzá adjuk a terhelt sáv célsávját a legkihasználatlanabb kanyarodósáv célsávjához, vagy adott időszetekig teljesen kiszolgáltatjuk neki. Így csomópontként egy adott irányba való haladási lehetőséget akár duplázzhatjuk vagy szélsőséges esetben minden sávot ráfordíthatunk a dedikált irányba.

Hasonló megoldás már pár ország található is pl. Magyarországon ehhez hasonlót használnak az autópályáján kötelező haladási irány kijelölésére, illetve balesetek esetén a forgalom terelésére. Egy ilyen rendszer felhasználása városi környezetben a forgalmasabb

időszakokban növelheti az egyes hálózati részek áteresztőképességét.

9.2. Többlépéses predikció alkalmazása

A mikroszkopikus és makroszkopikus modellek összevonásának nagy előnye, hogy a hálózat és benne lévő járművek minden paraméterét nem csak visszamenőlegesen tudjuk hanem előre megtudjuk határozni. Ehhez elég csak előre szimulálni a teljes rendszert, majd ezek értékeit felhasználni az éppen aktuális irányítási ciklus beavatkozójának meghatározására.

Ez a módszer azért tud hatékony lenni, mert nem az aktuális haladási kényszerek és járműsűrűségek alapján állíthatjuk be az egyes csomópontok zöld jelzéseit hanem a teljes irányítási ciklus alatt beérkező folyamat figyelembe tudjuk venni. Tipikusan jobb eredményt érhetünk el abba az esetben ha ciklus elején még minimális járműsűrűségünk van minden becsatlakozó szakaszon, de ez a ciklus felénél megváltozik egy olyan arányba, hogy 1 szakaszra torlódik az összes jármű és a többi szakasz pedig kiürül. Ilyenkor a korábban bemutatott módszerek mellett ugyan úgy kiürül az összes szakasz kivéve az amelyiken torlódás alakul ki. Az utóbbin ráadásul feleslegesen várakoztatjuk a teljes folyamat mivel a többi szakasz is zöld jelzést kap akkor is amikor azok már teljesen kiürültek.

Az ilyen és ehhez hasonló esetek elkerülhetőek már egy minimális predikció alkalmazása esetén, de több paraméter figyelembe vételekor nagyságrendekkel csökkenthető az ehhez hasonló esetek száma.

9.3. Folytonos idejű modell

A tanulmányban alkalmazott diszkrét idejű modell legnagyobb hibája, hogy az egyes szakaszokon a zöld jelzéseket az irányítási ciklusidőhöz viszonyítva jelennek meg. Ez természetesen kedvez a járműfolyam alapú modellnek viszont itt az egyes zöld jelzések alakulásáról csak annyit tudunk elmondani, hogy mennyi jut az egyes szakaszokra adott ciklusidőkben. Viszont nem tudjuk megmondani a jelzések sorrendjét illetve egy dedikált szakaszon a hasznos jelzés ideje alatt valóban áthaladt járművek számát.

Pontosabb eredményeket érhetünk el egy folytonos idejű modell alkalmazásával amiben ki tudjuk kötni a szakaszok hasznos jelzésének sorrendjét. Egy ilyen esetben továbbra is használható mind a makroszkopikus és a mikroszkopikus megközelítés is. Ezen felül további lehetőségeket tudunk kialakítani a rendszerben ami a globális irányításoknak kedvezhet, mert bele tudjuk kalkulálni a zöld jelzések alakulásába azok sorrendjüket is. Illetve külön-

böző optimalizálási eljárásoknál fel tudjuk használni, ha előre pontosan ismerjük ezeket az értékeket.

9.4. Multi ágens megközelítés

Valós környezetben mind az egyes járművek mind pedig az egyes csomópontok felfoghatóak több egy-egy multiágens rendszernek[7]. Ezeknek az előnye, hogy az egyes egyedekhez tudunk rendelni saját intelligenciát, így az a saját érdekei szerint tud cselekedni adott környezetben. Ez mellett pedig a teljes rendszerhez is tudunk rendelni különböző megfontolások alapján valamiféle szabályzási stratégiát.

Ahogy a [2] megvalósításban is láttuk, hasonló megfontolások mellett a játékelméleti módszerek jól alkalmazhatóak és érdemleges eredményeket lehet vele elérni. Egy egyszerű szituációban is jobb döntés hozható, ha több iteráción keresztül újrapróbáljuk azt. Ennek legnagyobb hátránya természetesen az egyes feladatok számítási igényessége. Viszont ezen problémát a mai eszközök segítségével minimalizálni lehet.

9.5. Zöld hullámok kialakítása

A közlekedési hálózatokban nagy forgalom áteresztő képességet lehet elérni a csomópontok lámpáinak megfelelő szinkronizálásával. Tipikusan ilyen megvalósítás az amikor adott forgalmasabb szakaszokon zöld hullámokat alakítunk ki. Ez napjainkban leginkább statikus eszközökkel történik, a fejlettebb városokban már képesek a rendszerek ezt automatikusan elvégezni. Bizonyított [6], hogy zöld hullám alapú szabályzások képesek csökkenteni a káros anyag kibocsátást és a várakozási időket.

Az eddigi lehetőségek alapján érdemes kialakítani egy teljes hálózatra kiterjedő irányítás struktúrát aminek a célja minden idő ciklusban a lehető legtöbb zöld hullám kialakítása. Természetesen nagyobb áteresztőképesség érhető el, ha az így szervezett ciklusok összefüggnek egymással és a kialakított jelzeshullám tovább folytatódik a következő jelzesciklusban is. A folyam alapú modellek segítségével akár egymással szorosan összefüggő egymásba be illetve kicsatlakozó jelzeshullámokat lehet kialakítani a kialakuló nagyobb jármű konvojoknak. Egy ilyen módszerrel minimálisra lehetne csökkenteni főbb folyamágakban a várakozási időt.

9.6. Irányítási módszerek szinkronizálása

Mint minden komplexebb rendszerről így egy közlekedési hálózatról is elmondható, hogy minél több paraméterét tudjuk megfigyelni és minél több változója alapján tervezünk hozzá irányítást annál pontosabban tudjuk kezelni. Természetesen a szabályzási megfontolásunk bonyolódik és nehezebb lesz egy optimális rendszer kialakítása.

Az eddigiekben csak lokális irányításokat próbáltunk ki és ezekkel is már számottevő javulást tudtunk elérni. Egy globális irányítás kialakítása, ahol a csomópontok kölcsönösen odafigyelnek a szomszédjaik szándékaira feltehetően ehhez képest is javulást tudunk elérni.

Egy az eddig kipróbált módszereknél előnyösebb megközelítés lehet ha az egyes járművek útvonal tervezését, a csomópontok zöld jelzés kialakítását és a hálózatra érvényes haladási kényszereket egymás függvényében határozzuk meg. Ekkor viszont érdemes lehet felállítani egy optimum függvényt ami az említett paramétereiktől függ. Az így kialakított függvény minden irányítási ciklus előtt optimalizálni.

Ezen felül pedig mindenképpen egy járható út ha bonyolultabb szabályzásokat összekötjük legalább egy ciklusidőnyi predikcióval. Vagy esetlegesen előre kipróbáljuk a legoptimálisabbnak tűnő eseteket és azok közül valósítjuk azt meg a hálózaton ami ezek közül a legjobb eredményt adta.

Ezek a módszerek nagy része már komoly futásidőbeli problémákat von maga után, és legtöbb esetben egy ténylegesen valós környezetben komolyabb infrastrukturális háttér nélkül egyenlőre csak komoly befektetések árán valósíthatóak meg.

10. Megvalósítási lehetőség

Többfajta megoldást el lehet képzelni a fent vázolt elveknek, természetesen a megvalósítások száma erősen függ az aktuális város infrastrukturális fejlettségétől. A legjobb működést egy olyan környezetben lehet elérni ahol a minden jármű teljesen önműködő módon képes közlekedni, illetve az összes kereszteződésben jelzőlámpás forgalomszabályozás folyik. Ezek az alapfeltételek talán már nem is annyira távoli jövőben kielégíthetők.

Természetesen a jó kezelhetőség feltétel az, ha kiküszöböljük a rendszerből a kritikus elemeket. Ez pedig jelenleg az emberi tényező, ennek meglétét pedig jogszabályok írják elő. Ezen felül pedig nagyon sokan gondolják azt, hogy ők jobban tudják az adott dolgot. Viszont ez a hozzáállás manapság kezd az ellenkező irányba fordulni és már akkor is el-

hisznek minden a műszereknek ha azok teljesen valótlan értékeket mutatnak. Ez mellett a jogszabályok is változhatnak ezért lehet jövője következő rendszereknek.

A vázolt jövőbeni városban egy nagyobb központi szerverparkban valósulna meg mind az egyes csomópontok jelzéseinek kialakítása, mind a járművek ciklusonkénti frissített útvonalának újraszámolása.

Egy így kialakított rendszerben a legtöbb mai rendszerekben általános érvényűnek vett probléma egyszerűen kezelhető lenne. Példának okáért a teljes hálózatban könnyedén ki lehetne alakítani hosszabb akár egymással is kapcsolatban lévő zöldhullám csatornákat. Ezzel a kora délelőtti és a délutáni megnövekedett járműforgalom egyszerű csökkentését érhetjük el. Ugyan ezzel elvvel megkülönböztetett jelzésű járművek számára akadálymentes utat lehet biztosítani egy esetleges baleset helyszínre, így a súlyos sérülteket hamarabb el tudják ezzel pedig sokszor életüket lehetne menteni.

Ezen felül pedig a különböző tanuló rendszerek segítségével az egy helyen felhalmozott adatok felhasználásával teljesen környezet specifikus rendszereket tudunk létrehozni. A fejlettebb szimulációs rendszerek bevetésével pedig a teljes hálózatban a forgalom az aktuális helyzethez mérten előre jósolható - természetesen véges, de kellően nagy ideig. Ezek felhasználásával elérhető egy olyan rendszer minnek a használatával az abnormális esetek - balesetek, fennakadások torlódások - jóformán csak a hálózat működésétől független események válhatnak ki.

11. Köszönetnyilvánítás

Ez a projekt nem jöhetett volna létre konzulensem, Dr. Harmati István közreműködése illetve a Simonyi Károly Szakkollégium LEGO körének eszköztámogatása nélkül. Ez úton köszönöm nekik a támogatást.

Hivatkozások

- [1] Vaya Dinopoulou, Christina Diakaki, Markos Papageorgiou "Application of the urban traffic control strategy TUC", *European Journal of Operational Research* , vol. 175, issue 3, pp. 1652–1655, 2006
- [2] Dr. Harmati István, *MATLAB programfejlesztés városi forgalmi jelzőlámpák együttes irányítására játékelméleti módszerekkel*. Tanulmány, Elektronikus Jármű és Járműirányítási Tudásközpont, 2006 június.
- [3] Dimas Aryo. Dijkstra Algorithm <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/> 2013. szeptember 30.
- [4] Robert L. Gordon, Warren Tighe, *Traffic Control Systems Handbook*, Dunn Engineering Associates, Siemens Intelligent Transportation System, New York, 2005
- [5] Dr. Lantos Béla *Fuzzy systems and genetic algorithms*, Műegyetemi kiadó, Budapest, 2002
- [6] Blaise Kelly A 'Green Wave' peprieve, BEndg MSc, 2011
- [7] Yoav Shoham, Kevin Leyton-Brown *Multiagent Systems – Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*, Cambridge University Press, 2009
- [8] <https://www.google.com/maps> , 2013. október 23.
- [9] Yong Deng, Yuxin Chen, Yajuan Zhang, Sankaran Mahedevan, "Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment", *Applied soft computing*, vol. 12., issue 3, pp. 1231-1237., 2012
- [10] <http://www.policyalmanac.org/games/aStarTutorial.htm>, 2013. október 20.
- [11] <http://www.mathworks.com/products/parallel-computing>, 2013. október 20.
- [12] Retter Gyula *Fuzzy, neurális genetikus, kaotikus rendszerek – Bevezetés a "lágyszámítás" módszereibe*, Akadémiai kiadó, Budapest, 2006