Tartományszintű forgalom-és környezeti terhelést figyelembe vevő optimális közúti irányítás

Dr. Péter Tamás

Széchenyi István Egyetem, Járműipari Kutató Központ,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék,
(e-mail: peter.tamas@mail.bme.hu)

Kivonat: Az új hálózati modell által elvégezhető a teljesen általános és rendkívül bonyolult nagyméretű közúti hálózatok uniformalizálása. Az új hálózati modell térkép-gráf invariáns, amely speciális hipermátrix struktúrával írható le. Bemutatjuk a közlekedési hálózatok tartományi szintű optimális irányítását Lyapunov függvény alkalmazásával. A leírt irányítást kiterjesztjük a közlekedési folyamatokból származtatható környezet- és légszennyezés csökkentésére is. Példát mutatunk be Győr úthálózatán.

Kulcsszavak: új hálózati modell, tartományszintű intelligens hálózatirányítás, Lyapunov függvény, torlódás, környezet, optimálás, ITS hálózati rendszer

1. BEVEZETÉS

Egy közlekedési hálózat belső forgalomlebonyolódását, a forgalom törvényszerűségeinek feltárását, a terepen végzett mérések időben és finanszírozási szempontból igen korlátolt jellegéből fakadóan sok esetben szimulációs szoftverek segítségével szokás megállapítani. A forgalmi szimulációk futtatásához azonban szükség van bizonyos mennyiségű és minőségű mérésre, amelyek a számítások kezdeti értékeit meghatározzák. A bemenő paraméterek szimulációs szoftverenként jelentősen eltérhetnek; tekintsük át a hagyományos módszert alkalmazó szoftverek által várt adatstruktúrát és annak alapvető jellemzőit.

A hagyományos módszeren alapuló forgalmi szimulációk utazás-felvételi vagy klasszikus forgalomszámlálási módszerekből indulnak ki. Előbbi esetben forgalomkeltés és forgalomvonzás esetéről beszélhetünk legtöbbször, amelyet honnan-hová mátrixok formájában is ki tudunk fejezni. Ez a felmérési módszer igen alapos körültekintést igényel, hiszen reprezentatívnak kell lennie, ugyanakkor a reprezentativitásnak megfelelő számú felmérés elvégzése rendkívül költséges lehet, ezért általában csak valamilyen előre meghatározott szisztéma szerint elvégzett mintavételezésről beszélhetünk csupán. A városi körzetek modellezése során számos modellt ismerünk (Lill-féle utazástörvény, Stouffer-féle hipotézis, Detroit módszer, Fratar módszer, Furness módszer, Voorhees modell, Alkalom-modell /Intervening Opporutnities Model/, Versengő lehetőségek modellje /Competing Opportunities Model/, Többszörös regressziós modell, Utazási költség-modell, Elektrosztatikus modell, egyéb szintetikus modellek), amelyek nehezen vagy egyáltalán nem mérhető növekedési tényezőkkel, indexekkel, empirikus kitevőkkel, stb. operálnak. A modellezés bemenő paraméterei tehát sok esetben csak mértékadónak tekinthetők, így természetesen a szimuláció produktuma is csak az ennek megfelelő szignifikanciával vehető figyelembe.

A második típusú modellek csomóponti, illetve keresztmetszeti forgalomszámlálásokon alapulnak, amelyek jól definiált, útügyi szabványban is rögzített módszereket alkalmaznak, és a közlekedés tervezése során is általánosan elfogadottnak tekinthetők. A forgalom számlálása járműfajták szerint történik, amelyeket egységjárműben kifejezve szorzótényezőkkel súlyoznak. A forgalomszámlálás különböző napszakokban, szezonálisan végzendő, és eredményeként napi gépjárműforgalom, mértékadó óraforgalom (MOF), nappali és éjszakai forgalom számítható. Az ilyen jellegű forgalomszámlálásokkal operáló szimulációs szoftverek előnye az, hogy az elfogadható biztonsággal megállapított bemeneti értékekhez a szakma számára jól értelmezhető, megfelelő minőségű eredmények párosulhatnak. A forgalomszámlálásokat alkalmazó rendszerek hátránya ugyanakkor az, hogy a forgalomnagyság, az átlagsebesség és a járműsűrűség közötti összefüggések nem adnak egyértelmű hozzárendelést; így pl. egy adott forgalomnagysághoz több átlagsebesség érték is tartozik. A rendszer tehát határozatlanságokat hordoz magában, ami abból adódik, hogy a hagyományos keresztmetszeti vagy csomóponti forgalomszámlálás módja információ veszteséggel jár.

A jelzőlámpás csomópontokban a lámpabeállítások meghatározásakor különös tekintettel kell lenni a mikroszkopikus és makroszkopikus forgalmi jellemzőkre is.

Mikroszkopikus jellemzők között említhető a járművek indulásának késlekedése, a jármű, kereszteződésen való áthaladásának időszükséglete, az ívben haladás sebesség csökkentő hatása, stb.

Makroszkopikus jellemzők között a leglényegesebb tényező az egymáshoz kapcsolódó jelzőlámpával szabályozott csomópontok egymáshoz hangolásának megvalósítása. Az ún.

zöldhullám kialakítása számos ismert előnnyel jár, a forgalomszabályozó hatásától, a károsanyag kibocsátás csökkentésén át az üzemanyag fogyasztás és forgalomban töltött idő csökkenéséig.

A most bemutatásra kerülő anyagban javasolt új megközelítést több olyan alapkérdés motiválja, amelyeket a jelenlegi modellezési technikákban elhanyagolnak, viszont a gazdaságilag jelentős problémákra választ kereső nagyméretű ITS - hálózati modellek alkalmazásakor már nem hanyagolhatunk el és nem kerülhetünk meg, Péter, T., Stróbl, A., Bede, Zs., Kalincsák, I., Fazekas, S. (2013). Ez a motiváció igen fontos a kutatás szempontjából, mert új irányt szab a közlekedés, mint kiemelt iparágakhoz kapcsolódó célzott alapkutatások folytatása területén.

Rá kell mutatnunk arra, hogy a hagyományos modellezési szemlélet alkalmazása igen sok megválaszolatlan kérdést vet fel és állandóan méretproblémákkal küzd. Természetesen, maga a feladat is igen összetett: a közlekedési hálózat rendkívül bonyolult, belső automatizmusok, humán tényezők, sokféle szabály, geometriai, adat, szezonalítás, stb. jellemzi. Minden részhálózat más, sokféle az egyedi szabály, ennek kapcsán, bármely részhálózat önmagában vizsgálva, csak egy nagyon kis rész az egészből és minden esetben csak a nagy hálózatból kivett példa lehet!

Ezen a területen a hagyományos modellezés technikában eddig fel nem vetett kérdés, hogy lehet-e ezekből - a példákból - következtetni az egészre, a teljesre? Ha megoldjuk egy résznek az optimálását, nincs válasz arra, hogy mi van a komplementerrel, nem tudjuk, hogy nem toltuk-e át oda a problémát? Ha csupán szoftveresen algoritmizált modelleket alkalmazunk, ezek nem alkalmasak arra, hogy szélesebb körű egzakt matematikai következtetéseket, ill. eredmények adjanak! A nagyméretű globális hálózat nem állandó anyagáramú tiszta Euler hálózat, amely további új irányt szab a kutatásoknak. Hagyományos modelleknél probléma a parkolók szerepe is a modellekben, mivel más típusú szereplők, mint az útszakaszok, u.n. idegen elemek.

A közlekedési folyamatok komplexitása magas szintű automatizáltságot és intelligens közlekedési rendszerek (ITS) alkalmazását követeli meg, melynek közös alapjai a közlekedési modellek. Számos közismert modell létezik. Természetesen minden modellnek vannak előnyei és hátrányai a performancia, adatigény és pontosság tekintetétben. Az új makroszkopikus modellünk egy térkép-gráf invariáns, speciális hipermátrix struktúrával írható le Péter, T. (2012.1), Péter Tamás (2012.2) Péter T, and Bokor J (2010.1), Péter T, and Bokor J (2010.2), Peter, Fülep and Bede (2011) Péter and Bokor J (2011). A modell fő erőssége a rendkívül bonyolult hálózat uniformalizálása és a számítási gyorsaság. Ennek köszönhetően a hálózatok valós idejű szabályozására alkalmazható és különösen a nagyméretű hálózatok modellezésére alkalmas.

A kutatásaink az egyes esetekben külön-külön is vizsgálják a közlekedési folyamatokat a trajektóriák mentén T. Peter, and M. Basset (2009) és a tartományokon is, így pl. a környezeti kihívásokat mindkét esetben. Forgalmas utak mentén fellépő környezetterhelésre, gyorsított számítási-előrejelzési módszereket dolgoztunk ki és vizsgáljuk az ehhez is kapcsolható ITS irányítást, amelynél IDM csoportok optimális átvezetésének hatékonyságát elemezzük O. Derbel, T. Péter, H. Zebiri, B. Mourllion and M. Basset (2012) és Derbel, Peter, Zebiri, Mourllion and Basset (2013). A környezetterhelés optimálása Lyapunov–függvény alkalmazásával viszont, tartományszinten történik. Ez utóbbinál megvalósítható automatikus irányítás elvezet a kooperatív ökoszisztémát ötvöző, integrált közlekedés és szállítás-irányításhoz.

A torlódásokkal kapcsolatos problémák megoldására, gyakran hasznos figyelembe venni az aszimmetrikus forgalmi terhelések fellépést is, amikor a kapacitásnövelés állapotfüggő optimális irányítással valósítható meg. Ezt is figyelembe vesszük a kutatásainkban, különböző területeken MPC elvet alkalmazva, pl. a változtatható irányú sávok működtetésével, Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2010) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.1) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.2) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter and Ferenc Szauter (2013).

2. CÉLKITŰZÉSEK A NAGYMÉRETŰ BONYOLULT HÁLÓZATI PROBLÉMÁK VIZSGÁLATÁNÁL, MODELLPARADIGMÁK ÉS AZ ÚJ DINAMIKUS MODELL

Célkitűzéseink:

I. Fontos cél a hatékonyság. Ezért a nagyméretű bonyolult hálózati problémák modellezésére új paradigmákon alapuló dinamikus modell kutatásán dolgozunk és új elvű optimális irányítási módszerek bevezetését vizsgáljuk.

II. Célunk a nagyméretű közúti hálózatok dinamikus modellezésre kifejlesztett és a jelen állapotában már validált és kutatásra használt szoftver piacorientált továbbfejlesztése. A továbbfejlesztett szoftvernek felhasználóbarát módon alkalmasnak kell lenni nagyméretű ipari modellezésre és az intelligens közúti hálózatok esetén, valós idejű irányítási feladatok ellátására.

III. Cél, az új kutatások hatékony alkalmazási lehetőségeinek feltárása pl. Győr közúti forgalmi folyamatainak vizsgálatánál és ezzel kapcsolatos átfogó rendszerterv elkészítésére Győr intelligens városi hálózati közlekedéséhez.

IV. Cél, a városi trajektórák menti komplex környetetterhelés, biztonság és veszély analízisére gyorsított módszerek kifejlesztése.

A modellezésére praktikusan makroszkopikus hálózati modellt építettünk fel. Ezzel kapcsolatban foglaljuk össze az új modellparadigmákat.

P.1. A közúti járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljét egy új pulzáló irányított gráf határozza meg.

Követjük azt az ismert eljárást, amely szerint a közlekedési-topológiai gráf éleit, (praktikusan a térképen látható út-sávokat) szektorokra bontjuk. Ekkor az úthálózaton létrejövő közlekedési folyamat a szektorok, mint hálózati elemek sokasága között fellépő dinamikus kooperációk eredménye.

Ebben a főszereplők a kooperáló szektorok és ők az új gráf csúcsai! Ezek a csúcsok egyúttal állapotjellemzőkkel (dinamikus járműsűrűségekkel) is rendelkeznek. A csúcsok közötti élek szintén dinamikusak. Ők egyszerre szabályozzák az anyagátadás (jármű-átadás) sebességét és mennyiségét is. A dinamikus éleknél az anyagáram-sebesség a kooperáló csúcsok állapotaitól, az őket körülvevő (segítő/akadályozó) környezettől, és időtől is függenek. A dinamikus éleknél az anyagátadás-mennyiségét környezettől és időtől függő disztribúciók szabályozzák.

P.2. A járműsűrűség definiálására a szektorok térbeli lefedettségét használjuk, amely matematikailag egzakt fogalom és bármilyen hosszúságú szektor esetében [0,1] intervallumban helyezkedik el. Ez a definíció kiterjeszthető bármilyen alakú parkolóra is.

Ennek eredményeként a parkolók, mint (általánosított) szektorok vesznek részt a járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljében. Ők ugyanolyan (állapotjellemzővel és anyagátadás-kooperációval bíró) dinamikus elemek, mint a hagyományos szektorok. Nagyon fontos következmény, hogy a rendkívül bonyolult és nagyméretű közúti hálózatokhoz kapcsolódó járműforgalmi folyamatok egységes dinamikus modelljét, ily módon sikerült egyféle elemek sokaságából felépíteni.

P.3. A vizsgált tartományában elhelyezkedő valós közlekedési hálózati rendszert egy virtuális zárt görbével határoljuk körül. (A tartomány nem feltétlenül egyszeresen összefüggő). A virtuális zárt görbe megnevezés a modellezés igen fontos tulajdonságát emeli ki! Ily módon, a körülhatárolás következtében, nem szűnik meg az a dinamikus kapcsolatrendszer, amely a külső és belső hálózatok között, a vizsgálatunktól függetlenül létezik. A modellben ez azt jelenti, hogy az input szektorok és belső szektorok között, valamint az output szektorok és belső szektorok között ugyanazon típusú dinamikus átadási kapcsolatok valósulnak meg, mint a belső-belső szektorok között. Tehát, az u.n. „kapuknál” nem forgalom megadása történik, mint a hagyományos modelleknél.

P.4. A belső és külső hálózat szektorai között négy féle kapcsolata van. A teljes hálózat esetében alapvető fontossággal bír a hálózatot definiáló kapcsolati hipermátrix. A teljes (belső és külső) hálózat dinamikus működését a kapcsolati hipermátrix foglalja egy rendszerbe. A kapcsolati hipermátrix megadja bármely szektor esetében, hogy milyen más szektorokkal áll és milyen dinamikus átadási kapcsolatban. A kapcsolati hipermátrixot tartalmazó differenciálegyenlet-rendszer írja le a hálózat minden szektorának a működését, azaz a teljes hálózat működését. (A belső tartomány kapcsolatainál mindenféle kapcsolat fellép, kivéve a külső-külső kapcsolatokat. A külső tartomány kapcsolatainál mindenféle kapcsolat fellép, kivéve a belső-belső kapcsolatokat.)

P.5. A belső és külső hálózat járműforgalmi folyamatait egyszerre leíró univerzális hálózati modellt írunk fel. Módszerünk lényeg, hogy egyszerre vizsgálunk egy tetszőleges belső hálózati szektor összes dinamikus átadási kapcsolatát és egy tetszőleges külső hálózati szektor összes dinamikus átadási kapcsolatát. Az univerzális hálózati modell nemlineáris pozitív differenciálegyenlet-rendszer.

P.6. Globális hálózati modellhez jutunk el, oly módon, hogy az univerzális hálózati modell belső hálózatát tartalmazó tartományát addig növeljük, amíg a külső tartomány üres halmazzá nem válik. Ezzel ekvivalens, ha a külső hálózatot tartalmazó tartományát addig növeljük, amíg a belső tartomány üres halmazzá nem válik. (Végeredményben az történik, hogy a korábbi n db. belső szektoron a sűrűségek jelölései megmaradtak: $x_1, x_2, \dots, x_n$, a korábbi m db. külső hálózati szektornál viszont, átjelölést hajtunk végre: $x_{1+m}, \dots, x_{n+m}$).

P.7. A szűkített hálózati modell esetében, a belső hálózati tartományban n db. $x_1, x_2, \dots, x_n$, sűrűségű állapotjellemzővel rendelkező szektor van. A külső tartomány, azt az m db. $s_1, s_2, \dots, s_m$, mért sűrűséggel rendelkező szektort foglalja magában, amelyeknek közvetlen input vagy output átadási kapcsolata van valamely belső szektorral. (Ez utóbbi modellt alkalmazzuk pl. valós idejű modellezésre és irányításra. Az Univerzális és Globális modellek általános rendszerelméleti tulajdonságok vizsgálatára és megismerésére szolgálnak.)

Modellünk tehát a hálózati elemeknek egy egyedi struktúráját definiálja. Az új struktúra eredményeként a dinamikus úthálózat azonos típusú elemekből épül fel és minden állapotjellemező értékkészlete a [0,1] intervallumban helyezkedik el. Ilyen módon a parkolókat általánosított útszakaszként kezelhetjük a modellben, és ugyanolyan dinamikus elemei a hálózatnak, mint a sávszakaszok. A szakaszok kooperációi alkotják az irányított gráf éleit.

Makroszkopikus modellünk, a nagyméretű közúti hálózatokon a közlekedési folyamatok modellezése a pozitív nemlineáris rendszerek osztályába tartozik.

A pozitív rendszerek első definícióját Luenberger, (1979) adta meg: *A pozitív rendszer egy olyan rendszer, amelyben az állapotváltozók nem negatívak.* A vizsgált közúti közlekedési folyamatok többségében az állapotok eredeti fizikai jelentése alapján megfelelnek ennek. A klasszikus irodalomban a közúti folyamatok leírása során a legtöbb esetben általános lineáris rendszer egyenleteket állítanak fel és nem használják ki a folyamat pozitív tulajdonságait. Azt gondolhatjuk, hogy az általános lineáris rendszereknél megismert tulajdonságok minden probléma nélkül igazak a pozitív rendszerekre is, azonban ez nem így van. A pozitív rendszerek irányíthatóságának és a megfigyelhetőségének a feltételei nem vezethetők le egyértelműen az általános rendszereknél megismert módszerekből. A probléma különösen igaz, ha nemcsak az állapotokra, de még a beavatkozó jelre is nem negatív értékkészletet követelünk meg. Ezért, a közúti folyamatok tisztán pozitív rendszerként történő leírása az irányítástechnikai szempontból nem triviális feladat. Az irányítási feladat ebben az esetben azt jelenti, hogy úgy kell egy állapotból egy másik állapotba irányítani a rendszert, hogy az állapotátmenet közben is érvényes, hogy nem negatív értékeket vehetnek fel az állapotok. A tárgykörben a rendszerek leírását és irányíthatóságát Caccetta and Rumchev, (2000) és Farina and Rinaldi, (2000) rendszerező munkái, továbbá Bacciotti, (1983), Coxson and Shapiro, (1987) és Valcher, (1996) adták meg. Boothby, (1982) és Sachkov, (1997), Varga, (2007) publikációikban az irányításelméletben alkalmazott *A* valós mátrixot tekintve, kijelenthető a következő tétel: A rendszer pontosan akkor pozitív, ha az *A* mátrix Metzler mátrix, azaz a főátlón kívüli elemek mind nemnegatívak, a főátlóban lévő elemek pedig tetszőlegesek lehetnek.

Jelen kutatásban a teljes hálózatot vizsgáljuk, ezért esszenciális a sebesség-sűrűség elvének analízise a teljes hálózatra vonatkoztatva. A szakirodalomban fellelhető eredmények a sebesség és sűrűség kapcsolatában Greenberg (1959), Greenshields (1935), Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003) az *x* (geometriai) sűrűségre is alkalmazhatók (Greenshileds, Kladek, Pipes és Munjal, Drake és Zachor, Drew, Underwood, stb.), azonban ezek az elméletek csak a hálózat egy adott szakaszára érvényesek, és nem általánosíthatók tetszőleges, a hálózat egynél több elemét tartalmazó trajektóriájára. A következő *n* változós sebesség-sűrűség összefüggés (Péter, 2012.2) bármely n≥1 számú szakaszból álló trajektória esetén érvényes:

$$v(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{V_i}[1 + f_i(x_i)]} \qquad (2.1)$$

ahol $V_i>0$ a maximális sebesség; l_i az *i* szakasz hossza; $x_i=x_i(t)$ a *i* szakasz *t* időpillanatbeli sűrűség értéke; és $f_i(x_i)$ a hálózat *i* szakaszára vonatkozó valós magfüggvény, figyelembe véve, hogy $f_i(x_i)\geq 0$, $f_i(0)=0$ és $f_i(x_i)$ szigorúan monoton növekvő függvény a [0,1] intervallumon. A gyakorlati számítások miatt az $f_i(x_i)$ függvény differenciálhatósága is szükséges.

A maximális sebességérték a trajektóriára:

$$V(x_1, x_2, \ldots, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{V_i}} \qquad (2.2)$$

A hálózat matematikai modelljének felépítésekor a hálózatot definiáló kapcsolati mátrix – amely hipermátrix – alapvető fontosságú. A kapcsolati mátrix meghatározza azt a kapcsolatot, amelynél a *j* szakasz kooperál az *i* szakasszal.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle L \rangle^{-1} & \\ & \langle P \rangle^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11}(x,s) & K_{12}(x,s) \\ K_{21}(x,s) & K_{22}(x,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

Ahol:

$x \in \Re^n$ a belső szektorok állapotjellemző vektora,

$s \in \Re^m$ a külső szektorok állapotjellemző vektora,

$\dot{x} \in \Re^n$ a belső szektorok állapotjellemző vektorának idő szerinti deriváltja,

$\dot{s} \in \Re^m$ a külső szektorok állapotjellemző vektorának idő szerinti deriváltja,

a belső szektorok és a külső szektorok hosszát tartalmazó diagonális mátrixok az alábbiak:

$$\langle L \rangle = \langle l_1, l_2, \ldots, l_n \rangle, \quad \langle P \rangle = \langle p_1, p_2, \ldots, p_m \rangle$$

$K_{11} \in \Re^{nxn}$, $K_{12} \in \Re^{nxm}$, $K_{21} \in \Re^{mxn}$, $K_{22} \in \Re^{mxm}$ és $x \in \Re^n$, $s \in \Re^m$.

A K_{11} és K_{22} fődiagonálisában 0 vagy negatív értékek lépnek fel, minden más elemük nemnegatív értéket vesz fel. A K_{12} és K_{21} minden eleme nemnegatív értéket vesz fel. Tehát ezek a mátrixok Metzler matrixok, következésképpen az általuk meghatározott teljes kapcsolati rendszert leíró *K* kapcsolati hipermátrix is Metzler matrix.

A vizsgált modell alkalmas nagyméretű közúti közlekedési hálózatok szimulációs tesztjére és tervezésére, és a forgalmi rendszerek szabályozására (Péter és Szabó, 2012).

3. LYAPUNOV FÜGGVÉNY ALKALMAZÁSA

A hivatkozott cikkekben szűkített hálózati modell kerül tárgyalásra, amely egy tetszőleges „G” zárt görbével körülhatárolt n szektorból álló belső hálózatból és m db. s_1, s_2, …, s_m, sűrűségű külső szektorokból áll, amelyek közvetlen kapcsolatokkal rendelkeznek valamely belső szektorral és ez utóbbiak állapotát mérés alapján ismertnek tekintjük. Ezt a modellt alkalmazzuk a szoftveres vizsgálatoknál is. Ennél a modellnél a kapcsolati hipermátrixot alkotó mátrixok közül, csak a K_{11} és K_{12} mátrixok játszanak szerepet, mert általuk képviselve van minden átadás, amely a belső szektorokra vonatkozik. A modell differenciálegyenlet-rendszere az alábbi:

$$\dot{x} = \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x,s)x + K_{12}(x,s)s] \qquad (3.1)$$

Ahol: $x \in \Re^n$, $\forall$ $x_i \in [0,1]$, (i=1,2,…,n), $\dot{x} \in \Re^n$, $s \in \Re^m$, $\forall$ $s_i \in [0,1]$, (i=1,2,…,m), $L = \mathrm{diag}\{l_1, \ldots, l_n\}$, l_i a főátlóban a belső szakaszok hossza ($\forall l_i>0$, i=1,2,…,n), $K_{11} \in \Re^{nxn}$, $K_{12} \in \Re^{nxm}$.

A hálózat működését a $\boldsymbol{K}_{11}$ és $\boldsymbol{K}_{12}$ kapcsolati mátrixok foglalják egy rendszerbe. A kapcsolati mátrixok egyrészt megadják minden szektor esetében, hogy milyen más szektorokkal állnak kapcsolatban, másrészt a kapcsolati mátrixokat tartalmazó differenciálegyenlet-rendszer írja le a hálózat minden szektorának a dinamikus működését, azaz a szűkített hálózat működését.

Egy nemlineáris pozitív rendszernek számos egyensúlyi pontja lehet. A stabilitását vizsgálhatjuk Lyapunov függvény módszerével a (3.2) Lyapunov függvényt felhasználva:

$$V(x) = \underline{L} \cdot \underline{x} \qquad (3.2)$$

amely az **L** =[l_1, l_2, … l_n] és **x** skaláris szorzata és a V(**x**) skalár-vektor függvény pozitív definit.

Az alkalmazott Lyapunov függvény fizikai jelentése az adott *t* időpillanatban a belső úthálózaton a járművek által elfoglalt összes úthosszat adja meg:

$$V(x_1, x_2, ..., x_n) = l_1 \cdot x_1 + l_2 \cdot x_2 + ... + l_n \cdot x_n \quad (3.3)$$

Tehát, *V*(*t*) *t*-szerinti deriváltjának negatív értéke az összes elfoglalt úthossz csökkenését jelenti a belső úthálózaton, amely az összes járműszám csökkenését jelenti.

Ha *V*(*t*) *t*-szerinti deriváltjának értéke zérus, akkor nem változik a járművek által elfoglalt összes úthossz, ha a *V*(*t*) *t*-szerinti deriváltjának értéke pozitív, akkor pedig növekszik a járművek által elfoglalt összes úthossz.

A továbbiakban a V függvény *t* szerinti deriváltját vizsgálva a fenti (3.1) állapotegyenlet figyelembe vételével:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = L \cdot < \mathrm{L} >^{-1} [\mathrm{K}_{11}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{x} + \mathrm{K}_{12}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{s}] \quad (3.4)$$

Az *n* dimenziós összegző vektorral írjuk fel az előbbi egyenletet:

$$L \cdot \langle L \rangle^{-1} = [1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = [1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \cdot [\mathrm{K}_{11}(\mathrm{x,s})\,\mathrm{x} + \mathrm{K}_{12}(\mathrm{x,s}) \quad (3.6)$$

A (9)-ben szereplő első szorzatot vizsgálva, ennél, a K_{11}(x,s) konstrukciója miatt a főátlóbeli *i*-ik elemeknél rendre megjelentek a K_{13} kapcsolati mátrix *i*-ik oszlopában elhelyezkedő elemek összegének ellentettjei is, tehát figyelembe vesszük a K_{11} főátlójában szereplő v_{ii} elemeket (i=1,2, …, n):

$$v_{ii} = -\left[\left(\sum_{r=1;(r\neq i)}^{n} v_{ri} + \sum_{w=1}^{m} v_{wi}\right)\right] \quad (3.7)$$

Ez alapján:

$$[1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \cdot K_{11} = \left[-\sum_{w=1}^{m} v_{w1} \quad -\sum_{w=1}^{m} v_{w2}, \quad \cdots \quad ,-\sum_{w=1}^{m} v_{wn}\right] \quad (3.8)$$

Ennek a vektornak, x vektorral alkotott skaláris szorzata adja a Lyapunov függvény deriváltjának első tagját:

$$\left[-\sum_{w=1}^{m} v_{w1}, \quad -\sum_{w=1}^{m} v_{w2}, \quad \cdots \quad ,-\sum_{w=1}^{m} v_{wn}\right] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} = -\left(\sum_{w=1}^{m} v_{w1} \cdot x_1 + \sum_{w=1}^{m} v_{w2} \cdot x_2 + ... + \sum_{w=1}^{m} v_{wn} \cdot x_n\right) \quad (3.9)$$

A (3.6)-beli második szorzat a K_{12} kapcsolati mátrix *i*-ik oszlopában elhelyezkedő elemek összegét adja:

$$[1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \cdot K_{12} = \left[\sum_{i=1}^{n} v_{i1}, \quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2}, \quad \cdots \quad ,\sum_{i=1}^{n} v_{im}\right] \quad (3.10)$$

Ez utóbbi vektor és s vektor skaláris szorzata adja a Lyapunov függvény deriváltjának második tagját:

$$\left[\sum_{i=1}^{n} v_{i1}, \quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2}, \quad \cdots \quad ,\sum_{i=1}^{n} v_{im}\right] \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s_m \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n} v_{i1} \cdot s_1 + \sum_{i=1}^{n} v_{i2} \cdot s_2 + \quad \cdots \quad + \sum_{i=1}^{n} v_{im} \cdot s_m \quad (3.11)$$

Figyelembe véve (3.9) és (3.11) egyenleteket a következőt állapíthatjuk meg:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\left(\sum_{w=1}^{m} v_{w1} \cdot x_1 + \sum_{w=1}^{m} v_{w2} \cdot x_2 + ... + \sum_{w=1}^{m} v_{wn} \cdot x_n\right) + \sum_{i=1}^{n} v_{i1} \cdot s_1 + \sum_{i=1}^{n} v_{i2} \cdot s_2 + \quad \cdots \quad + \sum_{i=1}^{n} v_{im} \cdot s_m \quad (3.12)$$

Tehát ez alapján a rendszer stabilis, ha a peremeken a kiszállítás nagyobb, mint a peremeken történő beszállítás:

$$\sum F_{Input} < \sum F_{Output} \quad (3.13)$$

Az autonóm rendszer viszont mindig stabilis, mivel a külső szakaszok járműsűrűség értékei azonosan zérusok, és a sebesség értékek nem negatívak.

A szűkített hálózati modell esetében elvégzett vizsgálat a Lyapunov függvényt alkalmazó irányítási törvényt ad meg, amely elégséges feltételt ad a rendszer aszimptotikus stabilitására és dinamikusan alkalmazható a teljes belső tartományon, illetve azokon a szubtartományokon, ahol kritikus helyzet lép fel.

A módszer tartományon történő optimális járműsűrűség fenntartására alkalmas, és közvetlen kapcsolatba hozható a környezeti hatások optimálásával is. A tartományszintű irányítási szemlélet bevezetése fontos a csomópontok irányításánál is. Ekkor a csomópontot körülkerítő zárt görbével határolt tartományon keresztül időegységenként, a maximális járműszám átáramlását biztosítjuk. A módszer a tartomány „mögött" kialakuló torlódásokat is figyelembe veszi (u.i. hibát követhetünk el, ha ezt nem vesszük figyelembe).

Természetesen, a pozitív rendszereknél alkalmazott lineáris Lyapunov függvény önmagában matematikai szempontból nem új eredmény. Esetünkben az új eredmény a Lyapunov függvény fizikai tartalma, amely egy tetszőleges zárt görbe által körülhatárolt hálózaton elhelyezkedő összes jármű hosszát definiálja és egy új lehetőségeket biztosít az optimális irányítás tartomány szintű megvalósítására.

4. A MODELL ALKALMAZÁSA ÉS SZOFTVER FEJLESZTÉSE

A modell validálása, a mért keresztmetszeti forgalmi adatok és a forgalomban részt vevő GPS készülékkel felszerelt gépjárművek sebességmérésével nyert adatok figyelembe vételével történik. A nemlineáris közlekedési modellünkre alapozva, a modellezésére a PannonTraffic szuper szimulációs eszközt fejlesztettünk ki. A szoftver objektum-orientált, könnyen továbbfejleszthető, moduláris felépítésű, és tartalmazza a közlekedési úthálózat felrajzolásához, szimulációjához és az analízis elvégzéséhez szükséges funkciókat, Péter, (2007.1, 2007.2, 2008 és 2009). Az út infrastruktúra elemei (sávok, jelzőberendezések, gyalogos átkelőhelyek, kerékpár utak, stb.) egy interaktív felületen keresztül képződnek le, és számos paraméterrel beállíthatók. A szimuláció implementálása egy nagy teljesítményű algoritmus segítségével történt. A szoftver használatával a forgalmi rend változásának, az úthálózat geometriájának, és a várható forgalomnak a hatásait komplex módon vizsgálhatjuk.

S. Fazekas, T. Peter (2012), Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.1) Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.2) és Fazekas, S., Péter T. (2013). Analíziskor részletes diagramok is rendelkezésre állnak. A fejlesztett rendszer dinamikus multi-periodikus tesztnek volt alávetve, hibakereső és konformitási teszteket futtattunk rajta. A szoftver validálása egy PhD kutatás keretében valósult meg, Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2010) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.1) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.2) Zsuzsanna Bede, Tamás Péter and Ferenc Szauter (2013).

A mérések végzése Budapesten egy GPS készülékkel és hozzá kapcsolt videokamerához kötött notebookkal történtek. A mérés igen alacsony hibaarányt mutatott a vizsgált terület valós közlekedési folyamatai és a szimulációs szoftver eredményei között.

A szoftvert egy olyan modullal egészítettük ki, amely egy internetes adatbázisra támaszkodva képes automatikusan felépíteni az úthálózat törzsét. A fejlesztés célja a hálózat készítéskor megjelenő emberi feldolgozási idő szignifikáns csökkentése volt. Gyakorlatban ez azt jelenti, hogy egy kb. 460 km^2 területű város (Magyarország második legnagyobb városa Budapest után) adatainak letöltése és a hálózat rekonstruálása 2 perc alatt lehetséges a szoftverünkkel. Ebben a hálózatban kereszteződések és útszakaszok szerepelnek csupán (1-1 sávval mindkét irányban – kivéve persze az egyirányú utcákat). A hálózaton szimuláció futtatása ebben a fázisban még nem lehetséges, néhány további beállításra van szükség, illetve a hálózat kiegészítésére. Szükséges az útszakaszokon a sávok megfelelő számúra bővítése, a gyalogos átkelőhelyek valamint a parkolók hozzáadása. A sávok hossza helyesen szerepel az arányos leképzésnek köszönhetően, de ugyanakkor a parkolók kapacitását (hosszát) illetően nem rendelkezünk információval, ezért ezt manuálisan kell felvennünk. Hasonlóan a kapcsolatokat jellemző függvényeket (pl. $\alpha_{ij}(t)$, β_{ij} (t) és γ_{ij} (t) függvények), amelyek megállapítása csak terepi mérések elvégzését követően lehetséges.

Az úthálózat elemeinek identifikációja egy automatikusan hozzárendelt azonosító szám, és a tetszőlegesen hozzárendelhető szöveges változó segítségével történik. Ezt automatikusan hozzárendelhetjük a hálózat megalkotásakor, amennyiben az információ az internetes adatbázisban rendelkezésre áll. Természetesen az adatbázisban előfordulhatnak hibák, pontatlanságok, amelyekért nem tudunk felelősséget vállalni, de gondos verifikációval kiszűrhetőek.

Tekintettel a gyakran igencsak kiterjedt hálózatokra, minden lehetséges helyen automatizálni kívántuk a szerkesztés folyamatát. A legértékesebb automatizálás a szoftverben a parkolókhoz kapcsolódik a már említettek mellett. A parkolók kapacitásának kiszámítása lehetséges volna képfeldolgozás útján, azonban a rendelkezésre álló műholdas és légi felvételek alacsony minősége ezt nem teszi lehetővé. Ugyanakkor belátható, hogy a parkolók elhelyezése, méretei a nemzeti szabványokban pontosan definiált. Ez praktikusan azt jelenti, hogy a parkolók kapacitása legtöbbször a kapcsolódó út hosszától és a parkoló elrendezésétől függ. A parkolóknak ezen tulajdonságát felhasználva a szoftver a modell koordináták GPS (WGS84) koordinátákká konvertálásával a szakaszok végpontjainak ismeretében ki tudja számítani az adott útszakasz hosszát. A nemzeti szabványok általában egy minimális távolságot határoznak meg a kereszteződéstől, ahonnan a parkolóhelyek kijelölése kezdődhet. Ezen felül a járdaszegélytől való távolság és a hely szélessége is szabályozva van. A szoftvermodul számára csupán azt kell megadnunk, hogy milyen parkolóhely elrendezés (állási szög) van az adott útszakaszon, melyből számítani képes a kapacitást. Amennyiben a parkoló nem útmentén került elhelyezésre, hanem egy nagy téren, vagy mélygarázsban, esetleg többszintes parkolóházban, akkor az előbb részletezett eljárást nem tudjuk alkalmazni, hanem számszerűleg megadható.

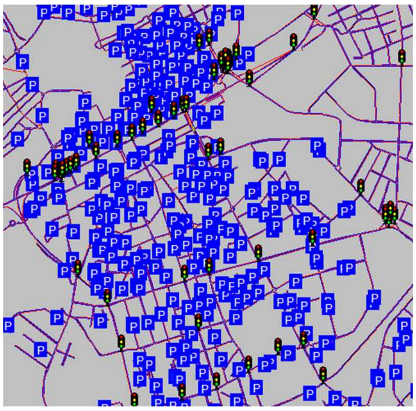
5. GYŐR FORGALMI MODELLEZÉSE

A munkánkhoz kitűnő lehetőségeket biztosít, hogy Győr deklaráltan törekszik az intelligens város megvalósítására és ez jól kapcsolódik a közlekedés területén, a most bemutatásra kerülő anyaghoz Stróbl, A., Péter, T. (2013). Győr nyerte el a 2017-es Európai ifjúsági Olimpiai Fesztivál megrendezésének jogát. Amellett, hogy ez az esemény kitűnő lehetőséget biztosít a projektünk sikeres terjesztésében, a rendezvényhez szorosan kapcsolódó ITS alkalmazások, a közlekedési folyamatok optimális lebonyolítását és a torlódásokkal kapcsolatos problémák megoldását jelentik. Az innovatív módszerek ugyanilyen fontos szerepet játszanak a környezetterhelés Lakatos István (2004.1) Lakatos István (2004.2) és a közlekedésbiztonság területén fellépő gondok megoldásában is.

Győrött jól megfigyelhető a város szerkezetének felépítése a jelzőlámpák elhelyezéséből is. A várost átszelő főutak (első és másodrendű) és a velük párhuzamosan futó néhány út vezetik le a közúti forgalomnak jelentős részét, míg az őket összekötő utcák csupán parkolóhelyül szolgálnak vagy lakófunkciót látnak el.

A fentiekben bemutatott matematikai modellt alkalmazó szoftverünk képes megbirkózni olyan nagyméretű hálózatokkal, mint Győr, és szimulációs eredményeket szolgáltatni rendkívül gyorsan további vizsgálatok elvégzéséhez és hálózat fejlesztéshez.

A 175 km^2 méretű hálózat létrehozásához kb. 1 percre van szükség a szoftverfejlesztéseinknek köszönhetően, míg a korábbi módszerrel a hálózat vázának létrehozása heteket vett igénybe hasonló méretű hálózatok esetében. Ez a hálózat 4600 útszakaszt tartalmaz (ez csupán a törzshálózat), közel 500 km hosszan. Az alaphálózatot számos sávval, kerékpárúttal (kb. 36 km) és parkolókkal kell kiegészíteni.



5.1. ábra: Parkolók és jelzőlámpák a példahálózaton

A közterületeken található parkolók felmérését már elvégeztük. Mindösszesen 20 000 jármű befogadására alkalmas 650 parkolót rögzítettünk a győri modellünkben. Ez a szám nem tartalmazza a privát parkolóhelyeket az ingatlanok területén, de tartalmazza a belvárosi épületek belső udvarain kialakított rejtett parkolóhelyeket. Utóbbi megállapításához a nyílt hozzáférésű műholdas felvételek nyújtottak segítséget.

A győri körforgalmú csomópontok elszaporodásának egyik oka az alacsony fenntartási költség és az általa biztosítható folyamatos forgalom-áramlás (helyettesítve a jelzőlámpával szabályozott kereszteződéseket). Emellett Győr volt az első magyar város, ahol jelzőlámpával szabályozott körforgalmú csomópont került kiépítésre. További érdekessége a csomópontnak, hogy ez volt az első magyar turbó körforgalom is egyben. Figyelembe véve ezt és számos további körforgalmú csomópontot, különös tekintettel az aluljáróra és a város hídjaira, elmondható, hogy Győr modellezése egy igen komplex feladat.

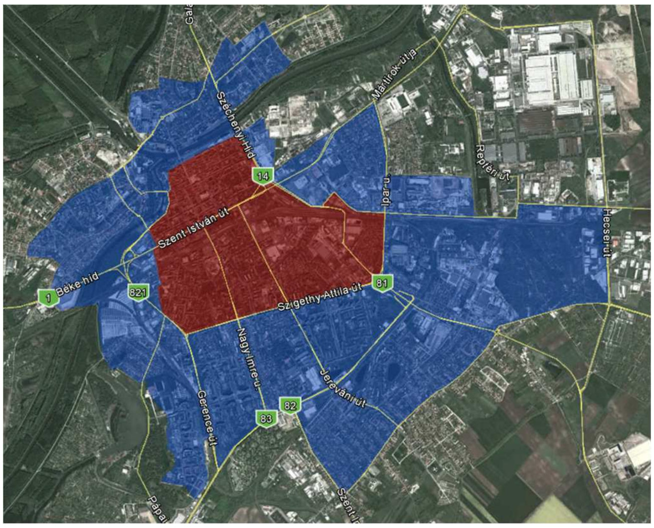
Ahogy korábban említettük, Győr egy nagy forgalmú vasúti vonal mentén terül el. Ez a kitűnő vasúti kapcsolat számos szintbeli kereszteződést is magával hoz, amelyeket pontosan kell tudni modellezni. Szoftverünkben egy külön modul segíti a vasút-közút szintbeli kereszteződések menedzselését.

További kiterjedt feladata a város modellezésének a jelzőlámpákhoz kapcsolódik. A jelzőlámpával szabályozott csomópontok számának csökkenése ellenére is több, mint 60 lámpás kereszteződésről beszélhetünk. A lámpák egy része távfelügyeleti rendszerben működik, és szükség esetén a technikai személyzet közbe tud avatkozni az irányító teremből. Normál körülmények között előre definiált programok szerint működnek a lámpák. Ezeket a lámpaprogramokat is rögzítenünk kell a modellben, és hozzárendelni a megfelelő fáziscsoportokhoz. Néhány modellbéli tényező, pl. elosztás, parkoló foglaltsági függvény, párhuzamos sávok közötti járműcsere, stb. méréseket igényelnek és validálni szükséges a valóságos eredmények elérése érdekében. Jelen fázisában a győri hálózatot reprezentáló modellünknek a 24 órás szimulációját egy jobb PC (3,4 GHz Intel i5, 4GB 1600 MHz RAM) 17 perc alatt képes elvégezni.

6. TARTOMÁNY SZINTŰ IRÁNYÍTÁS ADAPTÁLHATÓSÁGA GYŐR VÁROSÁBAN

Győr egyes területei a teher- és személyi forgalom által erősen túlterheltek, amelyet a városon keresztül haladó főutak generálnak elsősorban (1, 14 és 81), és a közelben haladó autópálya (M1). A probléma megoldása egy a várost elkerülő út megépítésével feloldható lehet, de egyelőre ilyen nincsen. A csúcsidei dugók elkerülését tartományi szintű irányítás bevezetésével szabályozhatóvá tehetnénk (a beáramló forgalom szabályozásával – figyelembe véve a kiáramló forgalmat is). A fent részletezett Lyapunov függvény alkalmazásának módszere kiválóan alkalmas lehet erre. A módszerünkkel igény szerint irányíthatóak meghatározott szub-tartományok, és párhuzamosan az irányítás határát az egész városra is kiterjeszthetnénk, így egy multi-kritériumos szabályozás valósítható meg a perifériákon történő beáramlást szabályozva, Tamas Peter, Jozsef Bokor and Andras Strobl (2013). Nagyon fontos kiemelni, hogy egy tartományba való beáramló forgalom korlátozása nem kell feltétlenül együtt járjon a szomszédos tartományok indokolatlan terhelésével, hiszen a forgalomnak a kevésbé terhelt utakra és területre történő átirányítása (tehát egyenletesebb eloszlása) folyamatosabb, gyorsabb áthaladást tehet lehetővé nem csak a védett tartományokon belül, de az egész város tekintetében is.

Egy lehetséges konfigurációja a tartományi szintű irányításnak a 4. ábrán látható Győr város példáján. A példa egy kétszintű tartományi irányítást mutat be a városra, ahol a szub-tartomány (piros terület középen) a történelmi belvárost, a forgalmas közforgalmú közlekedési csomópontokat, terminálokat (vasútállomás, autóbusz pályaudvar) és azokat a területeket foglalja magában, ahol a parkolási lehetőségek korlátozottak, vagy tiltottak. Mindeközben a fő tartomány (kék terület) a város egyéb területeit védi, ahol a MOF (mértékadó órai forgalom) ezt indokolttá teszi. Ez a kialakítás képes biztosítani a kívánt beáramlást – kiáramlás arányt a tartományban, és minden esetben garantál elkerülő utat a torlódási pontoktól. Az alábbi vázlat még nem kész a városban történő azonnali alkalmazásra két infrastrukturális okból. Nem található jelzőberendezés minden a tartomány pereme által érintett kereszteződésben, továbbá a már felszerelt jelzőberendezések nem mindegyike van felkészítve a feladat teljesítésére (dinamikus lámpaprogram alkalmazása központi irányítással).

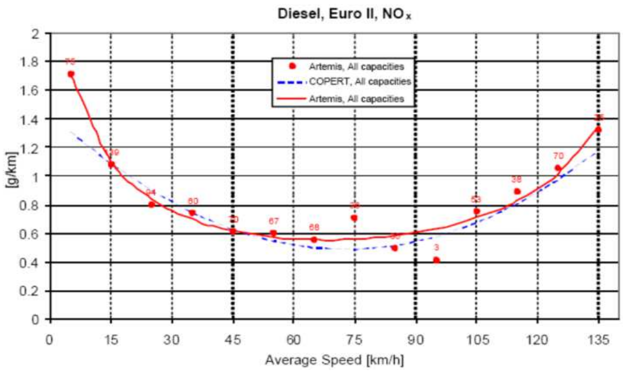


6.1. ábra: Kétszintű tartományi irányítás Győrött

7. MODELL KITERJESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

Az Európai Unió és Magyarország kiemelten kezeli a közlekedés által okozott környezeti problémákat Dr. Lakatos István (2001), Lakatos István (2007), Lakatos István (2012). Az externális költségek internalizálása már sok éve népszerű kutatási téma, hiszen a hatalmas környezeti károk évente 740 milliárd EUR többletkiadást jelentenek az EU 15, Svájc és Norvégia államainak összesen.

A környezetszennyezés csökkentése a gépjármű gyártóknak ugyanolyan érdeke, minta a társadalom egészének, hiszen az okozott károk jelentős része visszafordíthatatlan vagy javíthatatlan egészségi károsodáshoz vezet. Ismert, hogy léteznek forgalomirányítási módszerek a gépjárművek okozta légszennyezés befolyásolására.



7.1. ábra: NOx kibocsátás hagyományos (EURO-2) személygépjráművek esetében Forrás: COPERT 4, Methodology and Software Updates

A Lyapunov függvényt használó optimális irányítást végző módszerünk ilyen irányú kiterjesztése is lehetséges. Feltételezve, hogy ismerjük a forgalomban résztvevő gépjárművek típusainak kombinációját (környezetre való hatásuk szerint osztályozva) a légszennyezés lényegében a vezető által alkalmazott sebességtől függ (a motor percenkénti fordulatszámától).

Az irányításhoz alkalmazzunk most egy olyan Lyapunov függvényt, amely az *NOx* kibocsátás optimálására szolgál. Ekkor a Lyapunov függvény fizikai jelentése legyen a *t* időpillanatra jellemző összes *NOx* kibocsátás értéke, amelynél a belső úthálózat összes szakaszát figyelembe vesszük. Itt két módszert lehet alkalmazni. ***Mikroszkopikus esetben*** tekinthetünk minden szakaszon minden rajta közlekedő, k_i darabszámú beazonosított típusú járművet, ilyenkor a (7.1) összefüggés jobb oldalán szakaszonként k_i darabszámú összegek, (szummák) szerepelnek az egyes tagoknál, illetve: ***Makroszkopikus esetben*** minden szakaszon Passenger Car Equivalent (PCE), ekvivalens személygépkocsikat tekinthetünk. Ebben az anyagban erre az utóbbi esetre történt a Lyapunov függvény felírása:

$$V_E(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \ldots, \tilde{x}_n) = k_1 E(V_1(\tilde{x}_1)) + k_2 E(V_2(\tilde{x}_2)) + \ldots + k_n E(V_2(\tilde{x}_n)) \qquad (7.1)$$

Ahol: $k_i = \frac{l_i x_i}{h_i}$ az *i*-ik szakaszon a forgalomban résztvevő PCE száma, (*i=1,…,n*), h_i az *i*-ik szakaszon a forgalomban résztvevő PCE jellemző hossza, $E(V_i)$ az *i*-ik szakaszon, a forgalomban résztvevő PCE-re jellemző is *i*-ik szakaszhosszra vonatkozó *NOx* kibocsátás.

Ez utóbbi minden *i*-ik szakaszon a forgalomra jellemző sebességtől függ, amely pedig az *i*-ik szakaszra jellemző x_i járműsűrűségtől függ! Szakaszonként az *NOx* kibocsátás jól leírható az alábbi módon:

$$E(V_i(\tilde{x}_i)) = c_i \cdot [f_i(x_i) - v_{i,opt}]^2 + E_{i,opt} - E_{i,opt} \qquad (7.2)$$

Ahol: $\tilde{x}_i = f_i(x_i) - v_{i,opt}$, $c_i > 0$ szakaszhosszra és (7.2) függvényre vonatkozó korrekciós tényező és $v_i = f_i(x_i)$ az *i*-ik szakaszra jellemző sebesség-sűrűség függvény.

Jól látható, hogy az *i*-ik szakaszon az irányítás olyan járműsűrűség fenntartását írja elő, amelyre teljesül, hogy:

$$f_i(x_i) = v_{i,opt} \qquad (7.3)$$

Az ehhez tartozó környezeti terhelésre optimális járműsűrűséget jelöli:

$$x_{i,opt}$$

Ekkor lép fel a szakaszonkénti optimális *NOx* kibocsátás.

Foglaljuk össze az eredményeket. A korábbi tartományszintű forgalomra optimális járműsűrűség fenntartására vonatkozó irányítás tehát kiegészült a környezeti kritériummal.

Ez azt jeleni, hogy az irányításnak a tartományszinten olyan optimális járműsűrűséget kell fenntartani, amely a szakaszok szintjén optimális *NOx* kibocsátást eredményez!

A konkrét közlekedési folyamatoknál a gyakori gyorsítás-lassítás ciklusok extrém módon növelik a légszennyezést (és a fogyasztást is), ezért mindenképp különösen fontos a városi forgalomban az állandó optimális sebességfolyamathoz közeli állapot fenntartása. Itt megjegyezzük, hogy az elektromos vagy hibrid járművek több szempontból is másképpen viselkednek, de országos (és nemzetközi) elterjedésüket tekintve egyelőre nem számottevő a hatásuk.

A kívánt terület modellezésével a szimulációnk a károsanyag emisszió kiszámításához elegendő információt képes szolgáltatni már most is. Lehetőségünk van pl. egy kereszteződés átbocsátóképességének növelésére, vagy teljes tartományokon a kiegyensúlyozott, folyamatos haladási sebesség biztosítására a speciális Lyapunov függvényre alapozott optimális irányításunk alkalmazásával.

8. KONKLÚZIÓ

A nagyméretű bonyolult közúti hálózatok működésének jobb megismerése elvezetett bennünket egy új elvű flexibilis optimális irányítási módszer bevezetéséhez. A hálózat különböző tartományain fellépő különböző állapotok alapján, rugalmasan változhat az irányítás célja is. A hálózati ITS egy olyan variábilis hálózat, amely működése során egyszerre értékeli a forgalmat, a környezetterhelést, a biztonságot és az energiatakarékos működést. (Gyakorlati tapasztalat, hogy az optimális irányítás hatására egy-egy csomópontnál a kapacitásnövekedés forgalomtól függően 25%-45% közötti növekedést ér el.)

A kutatásokhoz kapcsolódóan elvégzendő további szoftverfejlesztés, eszközt kíván biztosítani a nagyméretű intelligens közúti hálózatok esetén valós idejű ipari irányítási feladatok ellátására. Győr intelligens város közúti forgalmi rendszertervének elkészítése egy iránytű az ITS hálózat megvalósításához. Rendkívül pozitív a fellépő szinergia és az eredmények további hasznosításának lehetősége. Új gyorsított vizsgálati módszerek születnek a trajektórák menti környezetterhelés és biztonság-analízisére.

Bemutattunk egy saját fejlesztésű makroszkopikus matematikai modellt. A modell nemlineáris pozitív rendszerosztályba tartozik. A speciális hipermátrix struktúra definiálja a hálózati elemek kooperációját, és a kapcsolatokat leíró differenciálegyenlet rendszert. Részletesen bemutattuk a Lyapunov függvény egy új alkalmazási lehetőségét tartományi szintű irányításra és példát mutattunk alkalmazására. Kitértünk az alkalmazásra egy magyar nagyváros példáján keresztül, annak tartományi irányításának lehetőségére. Kiemeltük a modell kiváló képességeit, rámutatva a forgalom-orientált környezet szennyezés csökkentésére és az irányításnak ilyen irányú kiterjeszthetőségére is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012: "Smarter Transport" - Kooperatív közlekedési rendszerek infokommunikációs támogatása - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg."

IRODALOMJEGYZÉK

Bacciotti, (1983) Bacciotti, A.: On the positive orthant controllability of two-dimensional bilinear sys-tems, Sys. Control Lett., 3: 53-55, 1983.

Boothby, (1982) Boothby, W. M.: Somé comments on positive orthant controllability of bilinear systems, SIAM J. Control Optim., 20: 634-644, 1982.

Caccetta and Rumchev, (2000) Caccetta, L., Rumchev, V.: A survey of reachability and controllability for positive linear systems,' Annals of Operations Research, vol. 98, pp 101-122, 2000.

Coxson and Shapiro, (1987) Coxson, P.G., Shapiro, H.: Positive input reachability and controllability of positive systems, Linear Algebra and its Applications 94 (1987) 35-53.

Farina, L. and Rinaldi, S, (2000) Farina, L. and Rinaldi, S,: *Positive Linear Systems Theory and Applications.* John Wiley &; Sons, Inc.

S. Fazekas, T. Peter: (2012) 3D Traffic visualization FIRST SCIENTIFIC WORKSHOP of Doctoral Schools Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, BME (Budapest, April 25, 2012) pp. 1-8. Doi: KJK2012-1-K4, ISBN 978-963-313-062-9

Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.1) 3D modellt alkalmazó szoftverrel a nagyméretű hálózatokon, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2012). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.08.29-2012.08.31. Budapest: Óbudai Egyetem, Paper 13. *pp. 87-90.*(ISBN:978-963-88875-3-5) http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/

Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.2) Database system to support Győr's traffic modelization, SECOND SCIENTIFIC WORKSHOP of Doctoral Schools Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, BME (Budapest, November 22, 2012) pp. 1-7. Doi: KJK2012-2-K4, ISBN 978-963-313-070-4, Kiadó: BME KSK

Fazekas, S., Péter T. (2013) Design of Győr's traffic database, Third Scientific Workshop of Faculty Doctoral Schools, Budapest, Budapest, May 28, 2013 pp. 1-7. Doi: KJK2013-1-K4, ISBN 978-963-313-080-3, Kiadó: BME KSK

Greenberg (1959): Greenberg, H.: "An Analysis of Traffic Flow", Operations Research, Vol.7, pp.79-85, 1959.

Greenshields (1935): Greenshields, B.D.: A study of traffic capacity. Proceedings of the highway Research Board, Proc. Vol. 14. pp. 448-477. 1934.

Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003): Kövesné Gilicze É. – Debreczeni G. Intelligens közúti közlekedési rendszerek és út-jármű rendszerek matematikai modellezése és analízise, Kutatási jelentés BME Közlekedésüzemi Tanszék. Budapest, 2003. pp 1-49.

Dr. Lakatos István (2001) Modern emission test of diesel engines in Europe In: Péter T (szerk.) Symposium on Euroconform Complex Retraining of Specialists in Road Transport. 460 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2001.06.09-2001.06.15. Budapest: BME, *pp. 147-153.*

Lakatos István (2004.1) Examination of effect of timing of charge replace with mathematical modell and experimentally**,** ***ACTA MECHANICA SLOVACA* 8:** *pp. 403-406.* (2004) *Effective Production, Transmission and Consumption of Energy, 6th International Scientific Conference*

Lakatos István (2004.2) Effect of timing on the effiency and exhaust of four-stroke, uncharged SOHC Otto-engines In: Lehoczky László, Kalmár László (szerk.) MicroCAD 2004 International Scientific Conference. Konferencia helye, ideje: Miskolc, Magyarország, 2004.03.18-2004.03.19. Miskolc: ME, 2004. *pp. 77-83.* szekció., Áramlás- és hőtechnika (ISBN:963-661-612-4)

Lakatos István (2007) Effect of valve timing on exhaust emission In: Anon (szerk.) 8th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection. 2007. *pp. 207-214.* Konferencia helye, ideje: Balatonfüred, Magyarország, 2007.05.28-2007.05.30. (ISBN:978 963 420 907 2)

Lakatos István (2012) Modeling of a Naturally Aspirated Gasoline Engine in the GT-suite Software Environment**.** In: Matija Fajdiga, Jernej Klemenc (szerk.). IAT 2012 – Innovative Automotive Technology. Konferencia helye, ideje: Dolenjske Toplice, Szlovénia, 2012.04.12-2012.04.13. Ljubljana: LAVEK, 2012. *pp. 77-94.* (ISBN:978-961-6536-61-5)

Luenberger (1979) Introduction to Dynamics Systems, Wiley, New York, 1979

Oussama Derbel, Tamás Péter, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion and Michel Basset (2012) Modified Intelligent Driver Model, Peridoica Polytechnica-Transportation Engineering 40/2 (2012) 53–60. doi: 10.3311/pp.tr.2012-2.02 web: http://www.pp.bme.hu/ tr ISSN 1587-3811 (online version); ISSN 0303-7800 (paper version)

Oussama Derbel, Peter Tamas, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion and Michel Basset (2013) Modified Intelligent Driver Model for driver safety and traffic stability improvement, 7.IFAC Symposium Tokyo 2013 szept. 4-7. http://www.sice.or.jp/IFAC-AAC2013/details.html
Organized by: International Federation of Automatic Control,Technical Committee on Automotive Control (IFAC-TC7.1) pp, 734-739 132-ik anyag. Doi: SaB2.3

Péter, (2007.1) Dr. Péter Tamás: Nagyméretû nemlineáris közlekedési hálózatok modellezése, *Közlekedéstudományi szemle*, 9. 2007. Szept. LVII. Évf. pp. 322- 331.

Péter, (2007.2) Dr. Péter Tamás: Nagyméretű közúti közlekedési hálózatok analízise. MMA „Innováció és fenntartható felszíni közlekedés" - Konferencia, 2007. szeptember 4-5-6 Budapest, BMF http://www.kitt.bmf.hu/mmaws/index.html

Péter T., (2008) Péter T.: Tetszőleges méretű nemlineáris közúti közlekedési hálózatok modellezése speciális hálózati gráffal, amelyben a gráf csúcsai általánosított szakaszok, a gráf élei a csúcsok közötti kooperálót leíró dinamikus relációk. A jövő járműve, III:(3-4) 26-29 (2008).

Péter T., (2009) Péter T.: Járműforgalmi rendszerek modellezése és irányítása, célok, kutatási területek és eredmények. A jövő járműve, IV:(1-2) 59-78 (2009).

T. Peter, and M. Basset (2009) Application of new traffic models for determine optimal trajectories, pp. 89-94. Sessions 1 Automation and Mechatronics. (1-C-1 Sistem Modelling and Control). Oct.21-Oct.23, INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGIES (IFOST 2009) HoChiMinh City University of Technology, Viertnam.

Péter T, and Bokor J (2010.1) Research for the modelling and control of traffic, In: Scientific Society for Mechanical Engineering ,33rd Fisita-World Automotive Congress: Proceedings, Budapest, Magyarország, 2010.05.30-2010.06.04. Budapest: GTE, 2010. pp. 66-73. (ISBN:978-963-9058-28-6)

Péter T, and Bokor J (2010.2) Modeling road traffic networks for control. Annual international conference on network technologies & communications: NTC 2010. Thaiföld, 2010.11.30-2010.11.30. pp. 18-22. Paper 21. (ISBN:978-981-08-7654-8)

Peter, Fülep and Bede (2011) The application of a new principled optimal control for the dynamic change of the road network graph structure and the analysis of risk factors, 13th EAEC European Automotive Congress 13th-16th June 2011. Valencia – SPAIN Society of Automotive Engineers (STA), 2011. pp. 26-36. (ISBN:978-84-615-1794-7)

Péter and Bokor J (2011) New road traffic networks models for control, GSTF International Journal on Computing, vol. 1, Number 2. pp. 227 -232. DOI: 10.5176_2010-2283_1.2.65 February 2011

Péter, T. (2012.1) Modeling nonlinear road traffic networks for junction control, International Journal of Applied

Mathematics and Computer Science (AMCS), 2012, Vol. 22, No. 3. pp. 723-732. DOI: 10.2478/v1006-012-0054-1

Péter Tamás (2012.2) Paradigmaváltás, amely elvezetett a globális közúti hálózat működésének leírásához és a dinamikus modell létrehozásához, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2012). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.08.29-2012.08.31. Budapest: Óbudai Egyetem, Paper 3. *pp. 3-19.*(ISBN:978-963-88875-3-5)
http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/

Péter, T., Stróbl, A., Bede, Zs., Kalincsák, I., Fazekas, S. (2013) Infokommunikációs technológiák fejlesztése a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok közlekedési folyamatainak komplex modellezéséhez, a valós közlekedési folyamatok vizsgálatára és az optimális irányítására. Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, 2013. március 21-22. (pp.55-81) Kiadó: Széchenyi István Egyetem, Közlekedési Tanszék. ISBN szám: 978-615-5298-09-7.

Tamas Peter, Jozsef Bokor and Andras Strobl (2013) Model for the analysis of traffic networks and traffic modelling of Győr, pp **167-172**. Doi: 0023, IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications (ACATTA 2013) which is to be held in Istanbul, Turkey, 16-17 September 2013. http://www.acatta13.itu.edu.tr/

Sachkov, (1997) Sachkov, Y. L.: On positive orthant controllability of bilinear systems in small codi-mensions, SIAM J. Control Opt., 35: 29-35, 1997.

Stróbl, A., Péter, T. (2013). Traffic modeling of Győr in project Smarter Transport, Third Scientific Workshop of faculty doctoral schools, *Budapest*, *May 28, 2013* pp. 1-7. Doi: KJK2013-1-K7, ISBN 978-963-313-080-3, Kiadó: BME KSK

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2010) The Extraction of Unique Velocity Processes from a Macro Model PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 38:(1-2) pp. 114-121. (2010)

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.1) The development of large traffic network model, PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 39:(1-2) pp. 3-5. (2011)

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter (2011.2) The mathematical modeling of Reversible Lane System PERIODICA POLYTECHNICA-TRANSPORTATION ENGINEERING 39:(1-2) pp. 7-10. (2011)

Zsuzsanna Bede, Tamás Péter and Ferenc Szauter (2013) Variable network model pp **173-177**. Doi: 0026, IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications (ACATTA 2013) which is to be held in Istanbul, Turkey, 16-17 September 2013. http://www.acatta13.itu.edu.tr/

Valcher, (1996) Valcher, M.E.: ControUability and reachability criteria for discrete-time positive sys-tems, International Journal of Control 65(3) (1996) 511-536.

Varga, (2007) Varga I.: "Közúti folyamatok paramétereinek modell alapú becslése és forgalomfüggő irányítása", PhD Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2007.