Tartományi szintű stabilitásvizsgálat alkalmazásának lehetőségei Győr városában

Stróbl András*, Péter Tamás**

Budapest University of Technology and Economics, Hungary
(e-mail:strobl.ad@gmail.com, e-mail**: tamas.peter@mail.bme.hu)*

Absztrakt: A közlekedési folyamatokat leíró rendszerek nagyméretű sztochasztikus dinamikus rendszerek. A rendszert leíró dinamikus modell új leírása az alapja a rendszer folyamatok számításának és irányításának. Jelen cikkünkben bemutatjuk a közlekedési hálózatok tartományi szintű optimális irányítását Ljapunov függvény alkalmazásával, és részletezzük a szabályozásnak a kapcsolatát a makroszkopikus nemlineáris pozitív rendszer-osztályú modellünkkel. Példát mutatunk be a módszerrel történő modellezésre, és egy kétszintű tartományi szabályozás megvalósíthatóságára Győr úthálózatán. A leírt irányítás kiterjeszthető a közlekedési folyamatokból származtatható környezet- és légszennyezés csökkentésére is.

1. BEVEZETÉS

A közlekedési hálózatok modellezése évtizedekre nyúlik vissza, szükségességét már igen korán felfedezték. A közlekedési folyamatok komplexitása magas szintű automatizáltságot és intelligens közlekedési rendszerek (ITS) alkalmazását követeli meg, melyek közös alapjai a közlekedési modellek. Számos közismert modell létezik, pl. Stouffer hipotézis, Detroit módszer, Fratar módszer, Furness módszer, Voorhees modell, Versengő lehetőségek modellje, Utazási költség modell és más szintetikus modellek (szakirodalomból jól ismertek). Az említett modellek főként makroszkopikus modellek, de különböző növekedési tényezőkkel, indexekkel, empirikus együtthatókkal stb. operálnak, amelyek nem mérhetőek egzakt módon. Természetesen minden modellnek vannak előnyei és hátrányai a performancia, adatigény és pontosság tekintetében. Az új modellünk ugyancsak makroszkopikus, és egy térkép-gráf invariáns, speciális hipermátrix struktúrával írható le (Péter, 2012.a), (Péter és Bokor, 2010), (Péter és Bokor, 2011). A modell fő erőssége a számítási gyorsaság. Ennek a gyorsaságának köszönhetően a hálózatok valós idejű szabályozására alkalmazható, és különösen a nagyméretű hálózatok modellezésére alkalmas.

2. KÖZLEKEDÉSI MODELL AZ ANALÍZISHEZ

2.1. *Matematikai modell*

Modellünk 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 az útsávok. A szakaszok kooperációi alkotják az irányított gráf éleit. Makroszkopikus modellünk a pozitív nemlineáris rendszerek osztályába tartozik.

Modellünkben a (geometriai) járműsűrűség egy olyan *s* dimenzió nélküli ($0 \le s \le 1$) szám, amely az adott útszakaszon haladó járművek összhosszának és magának a szakasz hosszának a hányadosát méri. A belső úthálózat útszakaszain fellépő sűrűségek a rendszer állapotát írják le.

Hagyományosan a járműsűrűség vagy forgalomsűrűség az ide vonatkozó szakirodalmakban az adott útszakaszon található járművek számával kerül megadásra, egy *t* időtartományra vonatkoztatva (ez a mennyiség szükség esetén a közlekedési áramlatok modellezésének tanulmányozásakor differenciált formában is használható). Jele: pl. S, mértékegysége: (jármű db/km).

Az előbb idézett esete a dimenzió nélküli (geometriai) sűrűségnek közvetlenül átírható a hagyományos S sűrűségbe egy statisztikailag meghatározott *h* egységjármű hossz felhasználásával. Itt megjegyezzük, hogy a modell alkalmazása egészen eltérő környezetben is lehetséges, pl. légi forgalom szimulációjára, ahol az egységjármű hossz egészen különbözik. (Péter és Szabó, 2012)

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 az *s* (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

Online: ISBN 978-963-88875-3-5
CD: ISBN 978-963-88875-2-8
Editor: Dr. Péter Tamás

tetszőleges, a hálózat egynél több elemét tartalmazó trajektóriájára. A következő *n* változós sebesség-sűrűség összefüggés (Péter, 2012b) bármely n≥1 számú szakaszból álló trajektória esetén érvényes:

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

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:

$$V(x_1, x_2, ..., x_n) = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{V_i}} \quad (2)$$

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.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle L \rangle^{-1} & \\ & \langle P \rangle^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{11}(x,s) & K_{12}(x,s) \\ K_{21}(x,s) & K_{22}(x,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ s \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

A K konstruált mátrix, amely K_{inp} és K_{outp} mátrixokból épül fel, a matematikai modell differenciálegyenlet-rendszerében jelenik meg.

2.2. Ljapunov 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 $\boldsymbol{K}_{11}$ és $\boldsymbol{K}_{12}$ mátrixok játszanak szerepet, mert általuk képviselve van minden átadás, amely a belső szektorokra vonatkozik. A modell differenciálegyenlet-rendszere az alábbi:

$$\dot{x} = <L>^{-1} [K_{11}(x,s)x + K_{12}(x,s)s] \quad (4)$$

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 = diag{l_1, ... ,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 Ljapunov függvény módszerével az (5) Ljapunov függvényt felhasználva:

$$V(x) = \underline{L} \cdot \underline{x} \quad (5)$$

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

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

$$V(x_1, x_2, ..., x_n) = l_1 \cdot x_1 + l_2 \cdot x_2 + ... + l_n \cdot x_n \quad (6)$$

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 (4) állapotegyenlet figyelembe vételével:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = L \cdot <\mathrm{L}>^{-1} [\mathrm{K}_{11}(\mathrm{x,s})\, \mathrm{x} + \mathrm{K}_{12}(\mathrm{x,s})\, \mathrm{s}] \quad (7)$$

Az $L \cdot \langle L \rangle^{-1}$ *n* dimenziós összegző vektorral írjuk fel az előbbi egyenletet:

$$L \cdot \langle L \rangle^{-1} = [1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \quad (8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = [1, \quad 1, \quad \cdots \quad ,1] \cdot [\mathrm{K}_{11}(\mathrm{x,s})\, \mathrm{x} + \mathrm{K}_{12}(\mathrm{x,s})\, \mathrm{s}] \quad (9)$$

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):

$$v_{ii} = -\left[\left(\sum_{r=1;(r\neq i)}^{n} v_{ri} + \sum_{w=1}^{m} v_{wi}\right)\right] \qquad (10)$$

Ez alapján:

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

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

$$\begin{gathered}\left[-\sum_{w=1}^{m} v_{w1}, \quad -\sum_{w=1}^{m} v_{w2}, \quad \cdots \quad ,-\sum_{w=1}^{m} v_{wn}\right]\cdot\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ . \\ x_n \end{bmatrix} = \\ -\left(\sum_{w=1}^{m} v_{w1}\cdot x_1 + \sum_{w=1}^{m} v_{w2}\cdot x_2 + \ldots + \sum_{w=1}^{m} v_{wn}\cdot x_n\right)\end{gathered} \qquad (12)$$

A (9)-beli második szorzat a K_{12} kapcsolati mátrix *i*-ik oszlopában elhelyezkedő elemek összegét adja:

$$[1, \ 1, \ \cdots \ ,1]\cdot K_{12} = \left[\sum_{i=1}^{n} v_{i1}, \quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2}, \quad \cdots \quad ,\sum_{i=1}^{n} v_{im}\right] \qquad (13)$$

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

$$\begin{gathered}\left[\sum_{i=1}^{n} v_{i1}, \quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2}, \quad \cdots \quad ,\sum_{i=1}^{n} v_{im}\right]\cdot\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ . \\ . \\ . \\ s_m \end{bmatrix} = \\ \sum_{i=1}^{n} v_{i1}\cdot s_1 + \sum_{i=1}^{n} v_{i2}\cdot s_2 + \quad \cdots \quad + \sum_{i=1}^{n} v_{im}\cdot s_m\end{gathered} \qquad (14)$$

Figyelembe véve (12) és (14) egyenleteket a következőt állapíthatjuk meg:

$$\begin{gathered}\frac{\partial V}{\partial t} = -\left(\sum_{w=1}^{m} v_{w1}\cdot x_1 + \sum_{w=1}^{m} v_{w2}\cdot x_2 + \ldots + \sum_{w=1}^{m} v_{wn}\cdot x_n\right) + \\ \sum_{i=1}^{n} v_{i1}\cdot s_1 + \quad \sum_{i=1}^{n} v_{i2}\cdot s_2 + \quad \cdots \quad + \sum_{i=1}^{n} v_{im}\cdot s_m\end{gathered} \qquad (15)$$

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

$$\sum F_{Input} < \sum F_{Output} \qquad (16)$$

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 Ljapunov 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.

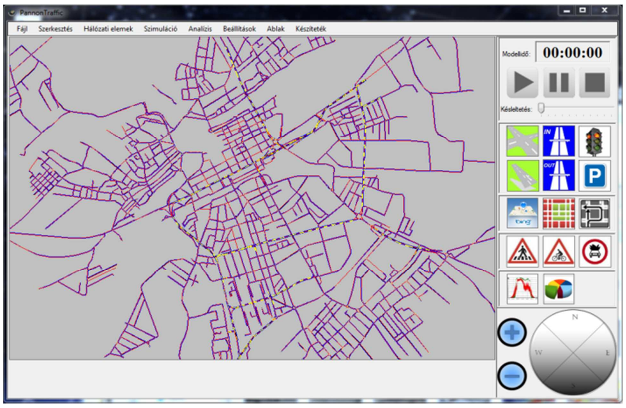
A módszer tartományon történő optimális járműsűrűség fenntartására alkalmas, és közvetlen kapcsolatba hozható a környezeti hatások optimálásával is. A tartományszintű irányítási szemlélet bevezetése fontos a csomópontok irányításánál is. Ekkor a csomópontot körülkerítő zárt görbével határolt tartományon 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 Ljapunov függvény önmagában matematikai szempontból nem új eredmény. Esetünkben az új eredmény a Ljapunov 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.

3. A MODELL ALKALMAZÁSA

3.1. Szoftver fejlesztés

Szoftvert fejlesztettünk a nemlineáris közlekedési modellünkre alapozva. A szoftver objektum-orientált, könnyen továbbfejleszthető, moduláris felépítésű, és tartalmazza a közlekedési úthálózat felrajzolásához, szimulációjához és az analízis elvégzéséhez szükséges funkciókat. (Péter et al., 2007, 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. 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 (Bede és Péter, 2011). 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.

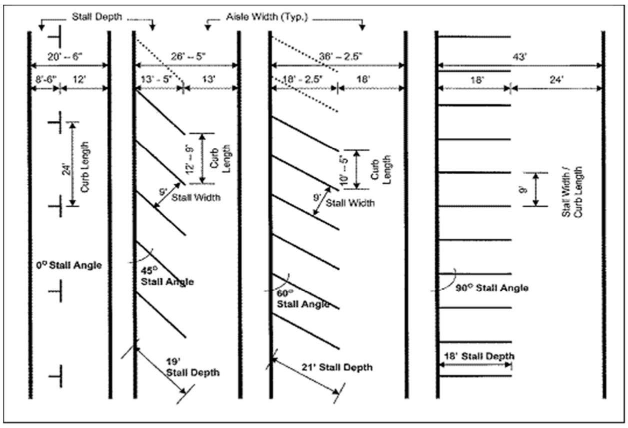


1. ábra: Győr modellezett hálózata a szoftverünkben

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. $\alpha_{ij}(t)$, $\beta_{ij}(t)$ és $\gamma_{ij}(t)$ 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.



2. ábra: Tipikus parkolóhely kialakítások

3.2. *Győr forgalmi modellezése*

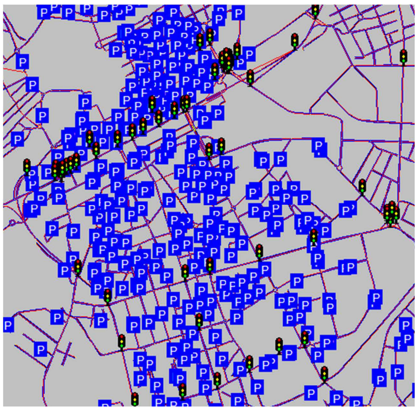
Győr észak-nyugat Magyarország legfontosabb városa, az egyik legjelentősebb Transz-európai vasúti, közúti és vízi prioritási tengely mellett fekszik. Népessége országos viszonylatban magas, 131 000 főre tehető (2011) és erőteljesen növekszik. Győr Magyarország úttörő városa az intelligens közlekedési technológiák bevezetésében; ahogy új technológiák kifejlesztése tekintetében (elektromos jármű, járművek intelligens kommunikációja, stb.) úgy azok alkalmazásában is (integrált intelligens közforgalmú közlekedési rendszer).

A város változatos települési struktúrával rendelkezik. A történelmi belváros, a régi és új lakóövezetek összeolvadnak az ipari zónákkal. Az utóbbi években számos szomszédos kistelepülést csatoltak a városhoz, tovább növelve a város diverzitását. A közlekedési hálózat tekintetében napi kihívásokat eredményezett a város utcáin megjelenő forgalom lebonyolítása.

Egy az Európai Unió által finanszírozott kutatási projektben vizsgáljuk Győr közlekedési hálózatát. A projekt egyik célja az egész városra kiterjedő forgalmi modell elkészítése, a szükséges paraméterek kiszámítása, és egy a közlekedési folyamatok optimális lebonyolítására irányuló kontrol elmélet kidolgozása.

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.



3. 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.

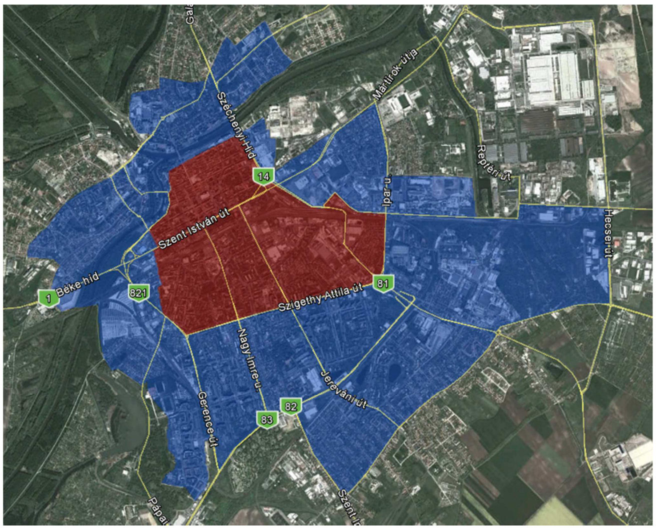
Ahogy korábban említettük, Győr egy nagy forgalmú vasúti vonal mentén terül el. Ez a kitűnő vasúti kapcsolat számos szintbeli kereszteződést is magával hoz, amelyeket pontosan kell tudni modellezni. Szoftverünkben egy külön modul segíti a vasút-közút szintbeli kereszteződések menedzselését.

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.

3.3. *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 Ljapunov 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. 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).

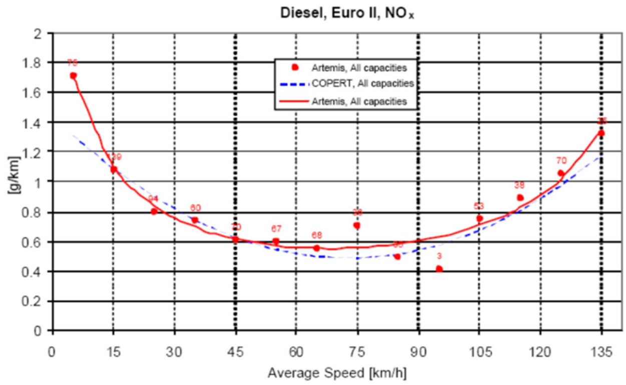


4. ábra: Kétszintű tartományi irányítás Győrött

4. MODELL KITERJESZTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

Az Európai Unió és Magyarország kiemelten kezeli a közlekedés által okozott környezeti problémákat. Az externális költségek internalizálása már sok éve népszerű kutatási téma, hiszen a megfizetetlen 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.



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

A Ljapunov 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). Példának okáért a gyakori gyorsítás-lassítás ciklusok extrém módon növelik a légszennyezést (és a fogyasztást is). 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. Lehetőségünk van pl. egy kereszteződés átbocsátóképességének növelésére, vagy teljes tartományokon a kiegyensúlyozott, folyamatos haladási sebesség biztosítására a speciális Ljapunov függvényre alapozott optimális irányításunk alkalmazásával.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Bemutattunk egy saját fejlesztésű makroszkopikus matematikai modellt és a rá épített szoftvert. A modell nemlineáris pozitív rendszerosztályba tartozik. A speciális hipermátrix struktúra definiálja a hálózati elemek kooperációját, és a kapcsolatokat leíró differenciálegyenlet rendszert. Részletesen bemutattuk a Ljapunov függvény egy új alkalmazási lehetőségét tartományi szintű irányításra, és példát mutattunk alkalmazására. Bemutattuk a módszerét és számszerű dimenzióit egy nagyméretű hálózat létrehozásának egy magyar nagyváros példáján keresztül, és annak tartományi irányítási lehetőségeit. Kiemeltük a modell kiváló képességeit, rámutatva a forgalom orientált környezet szennyezés csökkentésére és az irányításnak ilyen irányú kiterjeszthetőségére.

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.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja.

„TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0012: Hibrid és elektromos járművek fejlesztését megalapozó kutatások - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg."

IRODALOM

Bede, Zs., Péter, T. (2011). The development of large traffic network model. In: *Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 39*:(1-2) pp. 3-5.

Péter, T., Bokor, J. (2010). Modeling road traffic networks for control. In: *Annual international conference on network technologies & communications*: NTC 2010. Thailand, 2010.11.30-2010.11.30. pp. 18-22. Paper 21.

Péter, T., Bokor, J. (2011). New road traffic networks models for control. In: *GSTF International Journal on Computing*, vol. 1, Number 2. pp. 227 -232.

Péter, T. (2012a): Modeling nonlinear road traffic networks for junction control, In: *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, T. (2012b): Paradigmaváltás, amely elvezetett a globális közúti hálózat működésének leírásához és a dinamikus modell létrehozásához. In: *Innovation and Sustainable Surface Transport (IFFK)* Budapest, 2012. augusztus 29-31. Paper 03. pp 3-19.

Péter, T., Bede, Zs., Fazekas, S., Stróbl, A. (2011). New modeling nonlinear road traffic networks for control. In: *Hungarian-Korean Technical Cooperation Conference*, 2012.12.16., Budapest

Péter, T., Stróbl, A., Fazekas, S. (2007). Hazai szoftverfejlesztés a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok folyamatanalízisére, In: *Innovation and Sustainable Surface Transport (IFFK)*, 2007.09.05., Budapest

Péter, T., Stróbl, A., Fazekas, S. (2008). Szoftverfejlesztés eredményei, a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok analízisére és tervezésére. In: *Jövő Járműve III.* (3-4) pp. 30-33.

Péter, T., Stróbl, A., Fazekas, S. (2009). Speciális matematikai modellt alkalmazó szoftver, optimális útvonalak meghatározására. In: *Innovation and Sustainable Surface Transport (IFFK)*, 2009.09.02., Budapest

Péter, T. and Szabó, K. (2012): A new network model for the analysis of air traffic networks. In: *Periodica Polytechnica- Transportation Engineeering* 40/1 (2012) 39–45 DOI: 10.3311/pp.tr.2012-1.07