

GreenNet hibrid irányítás analízise a városi közlekedés légszennyezésének minimalálására

Péter Tamás

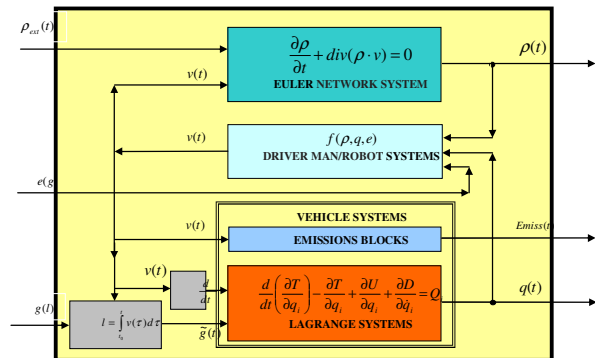
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék
(e-mail: peter.tamas@mail.bme.hu.)

Abstract Az anyag a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok forgalmi folyamatainak analízisére kifejlesztett új elvű nemlineáris dinamikus modellt vizsgál komplex környezetben.

Kulcsszavak: új nemlineáris közúti közlekedési hálózati modell, valós közúti és jármű-folyamatok, analízis, validálás

1. Bevezető

A kutatás komplex modellt vizsgál a valós közúti és jármű-folyamatok leírására. Ennek során, a tetszőleges méretű és topológiájú közúti hálózat speciális matematikai modellezési technikáját használjuk fel. Itt vizsgáljuk a járműsűrűség állapotterében a komplex rendszer működését leíró nemlineáris differenciálegyenlet-rendszert, amely a pozitív rendszerek osztályába tartozó makroszkopikus közúti közlekedési modell



1. ábra: A közlekedés folyamatainak integrált analízise

EULER NETWORK SYSTEM blokk esetében az állapotjellemzők, a ρ járműsűrűségek.

A rendszer a teljes közúti hálózaton írja le térben és időben a $\rho(t)$ járműsűrűségeket és a $v(t)$ járműsebességeket. A rendszer nagy méretben, nagy volumenű járműáramlatok vizsgálatára szolgál, - a modell makroszkopikus. A rendszer figyelembe veszi a peremeken a $\rho_{ext}(t)$ járműsűrűséget, a hálózati gráf felépítését, a közlekedés rendjét, jelzőlámpák működését, parkolók elhelyezkedését és kapacitását. A modellezést és az alkalmazott hálózati megközelítést a következő fejezet foglalja össze röviden.

Az 1. ábrán külön szerepel a **DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS** blokk.

Ha nem vizsgálnánk az egyedi járműveket a (**VEHICLE SYSTEMS** blokkot), akkor a **DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS** blokk szerves részét képeznék az **EULER NETWORK SYSTEM** blokknak, a:

$$v = f(\rho, e)$$

függvény beépülésével. Ez a modell már az e környezeti paraméter vektort is figyelembe vesz, amely hely és idő függő: $e=e(g,t)$. (A klasszikus makroszkopikus modellek ezt nem tartalmazzák, azok csak járműsűrűségtől függenek, $v = f(\rho)$).

A **DRIVER MAN/ROBOT SYSTEMS** blokk a vezető, - vagy autonóm jármű esetén a robotpilóta - sebességválasztását veszi figyelembe.

A megfelelő sebességválasztásnál figyelembe veszi a hálózatról érkező, a pozíciójára jellemző $\rho(t)$ járműsűrűséget, a trajektória adott pontjában érzékelt e környezeti paramétereket (pl. látási viszonyok, meteorológiai paraméterek, útviszonyok,) és a saját járművének $q(t)$ állapot jellemzői által determinált dinamikus hatásokat.

Az így megválasztott $v(t)$ sebességet veszi figyelembe az **EULER NETWORK SYSTEM** az adott szakaszon adott időpillanatban a számításainál.

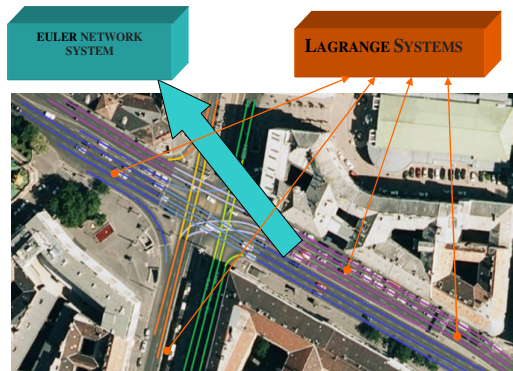
A megválasztott $v(t)$ sebességet – és saját kibocsájtási jellemzőit - veszi figyelembe a saját járműnél az **EMISSION BLOCK** Ezt a forgalmi modell validálásra és a további alkalmazási területeken fontos a modellezésnél és ugyancsak, a saját jármű, a dinamikai számításoknál a **LAGRANGE SYSTEM**.

A térbeli trajektóriákon haladó 3D-s nemlineáris járműdinamikai modellek, a **LAGRANGE SYSTEM**, computer-algebrai előállítás és analízise szintén saját fejlesztésként a rendelkezésre áll.

A $v(t)$ hossz-irányú, (trajektória irányú) sebesség. Változásai által, a súlypontban hossz-irányú erőhatások

lépnek fel. A jármű trajektórián mozog, a $v(t)$ ismeretében számítható, hogy a t időpontban mely $\tilde{g}(t)$ trajektória pontban van és ismert, hogy mekkora $v(t)$ sebességgel halad ott a jármű. Ha a trajektória nem egyenes vonal, hanem kereszt és függőleges irányú kitérésekkel is rendelkezik, akkor az ilyen irányú sebességváltozások miatt, kereszt és függőleges irányú erők is fellépnek a súlypontokban. Ily módon, a háromirányú erők következtében, az ún. Q_i generált erők fellépése gerjeszti a járműrendszert. A rendszert függőleges irányban az útprofil egyenetlenségei is gerjesztik az abroncs talppontoknál. Az erőhatás az abroncsok függőleges irányú rúgóerő-karakterisztikái adják át. Ennél, a trajektóriára függőleges irányban szuperponálódó útprofil gerjesztésénél is fellép egy kisebb mérvű torzítás, a változó sebességek következtében. A modell ezt is tartalmazza.

A járműdinamikai hatások különböző szintű kényelemérzetet, stabilitás-érzetet, biztonságérzetet, vagy veszélyhelyzet-érzetet generálnak a vezetőben. Ezek alapján, valamint a forgalmi és külső környezeti hatások alapján tartja meg, vagy dönt új sebesség választása mellett.



2. ábra: A közlekedés folyamataiban résztvevők kettős szerepe

Igen aktuális további feladat, a nagy volumenű közlekedési áramlatok és környezeti terhelések együttes analízise. Ez hatékonyan elvégezhető a nagyméretű hálózati modellezéssel, amely előállítja a sebességfolyamatokat. Ha rendelkezésre áll a hálózati elemekre vonatkozó jármű típus eloszlás/statisztika is, (intelligens kamera rendszer és infokommunikációs technika alkalmazásával) a környezetszennyezések szintén számíthatók.

2. A hálózati forgalmi modell

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

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

Ahol:

$x \in \mathfrak{R}^n$ a belső szektorok állapotjellemező vektora,

$s \in \mathfrak{R}^m$ a külső szektorok állapotjellemező vektora,

$\dot{x} \in \mathfrak{R}^n$ a belső szektorok állapotjellemező vektorának idő szerinti deriváltja,

$\dot{s} \in \mathfrak{R}^m$ a külső szektorok állapotjellemező vektorának idő szerinti deriváltja,

$\langle L \rangle$ a belső szektorok és $\langle P \rangle$ a külső szektorok hosszát tartalmazó diagonális mátrixok:

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

$K_{11} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $K_{12} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$, $K_{21} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$, $K_{22} \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ és $x \in \mathfrak{R}^n$, $s \in \mathfrak{R}^m$.

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 mátrixok, következésképpen az általuk meghatározott teljes kapcsolati rendszert leíró K kapcsolati hipermátrix is Metzler mátrix, Bacciotti, (1983), Boothby, (1982), Caccetta and Rumchev, (2000), Coxson and Shapiro, (1987), Farina, L. and Rinaldi, S, (2000), Luenberger (1979), Sachkov, (1997), Valcher, (1996), Varga, (2007).

A vizsgált modell alkalmas nagyméretű közúti közlekedési hálózatok szimulációs tesztjére és tervezésére, és a forgalmi rendszerek szabályozására (Péter 2012), Péter, T. (2012.1).

2.1 Lyapunov függvény alkalmazása

A gyakorlati alkalmazásnál nem a teljes Földfelszín, hanem konkrét hálózatrészek, szűkített hálózati modelleket vizsgálunk, ez kerül tárgyalásra és ez ebben az esetben, egy tetszőleges „G” zárt görbével körülhatárolt, n szektorból álló belső hálózatból és m db. s_1, s_2, \dots, 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:

$$\dot{x} = \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x, s)x + K_{12}(x, s)s] \quad (2)$$

Ahol: $x \in \mathfrak{R}^n$, $\forall x_i \in [0, 1]$, ($i=1, 2, \dots, n$), $\dot{x} \in \mathfrak{R}^n$, $s \in \mathfrak{R}^m$, $\forall s_i \in [0, 1]$, ($i=1, 2, \dots, m$), $L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_n\}$, l_i a főátlóban a

belső szakaszok hossza ($\forall l_i > 0, i=1,2,\dots,n$), $K_{11} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $K_{12} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$.

A hálózat működését a K_{11} és 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 a (3) Ljapunov függvényt felhasználva:

$$V(x) = \underline{L} \cdot \underline{x} \quad (3)$$

amely az $\underline{L} = [l_1, l_2, \dots, l_n]$ és \underline{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:

$$V(x_1, x_2, \dots, x_n) = l_1 \cdot x_1 + l_2 \cdot x_2 + \dots + l_n \cdot x_n \quad (4)$$

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 (2) állapotegyenlet figyelembe vételével:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = L \cdot \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x,s) x + K_{12}(x,s) s] \quad (5)$$

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

$$L \cdot \langle L \rangle^{-1} = [1, 1, \dots, 1] \quad (6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = [1, 1, \dots, 1] \cdot [K_{11}(x,s) x + K_{12}(x,s) s] \quad (7)$$

A (7)-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 ($i=1,2, \dots, n$):

$$v_{ii} = - \left[\left(\sum_{r=1; r \neq i}^n v_{ri} + \sum_{w=1}^m v_{wi} \right) \right] \quad (8)$$

Ez alapján:

$$[1, 1, \dots, 1] \cdot K_{11} = \left[- \sum_{w=1}^m v_{w1}, - \sum_{w=1}^m v_{w2}, \dots, - \sum_{w=1}^m v_{wn} \right] \quad (9)$$

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

$$\left[- \sum_{w=1}^m v_{w1}, - \sum_{w=1}^m v_{w2}, \dots, - \sum_{w=1}^m v_{wn} \right] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = - \left(\sum_{w=1}^m v_{w1} \cdot x_1 + \sum_{w=1}^m v_{w2} \cdot x_2 + \dots + \sum_{w=1}^m v_{wn} \cdot x_n \right) \quad (10)$$

A (7)-beli második szorzat a K_{12} kapcsolati mátrix i -ik oszlopában elhelyezkedő elemek összegét adja:

$$[1, 1, \dots, 1] \cdot K_{12} = \left[\sum_{i=1}^n v_{i1}, \sum_{i=1}^n v_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^n v_{im} \right] \quad (11)$$

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

$$\left[\sum_{i=1}^n v_{i1}, \sum_{i=1}^n v_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^n v_{im} \right] \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n v_{i1} \cdot s_1 + \sum_{i=1}^n v_{i2} \cdot s_2 + \dots + \sum_{i=1}^n v_{im} \cdot s_m \quad (12)$$

Figyelembe véve (10) és (12) egyenleteket a következőt állapíthatjuk meg:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \left(\sum_{w=1}^m v_{w1} \cdot x_1 + \sum_{w=1}^m v_{w2} \cdot x_2 + \dots + \sum_{w=1}^m v_{wn} \cdot x_n \right) + \sum_{i=1}^n v_{i1} \cdot s_1 + \sum_{i=1}^n v_{i2} \cdot s_2 + \dots + \sum_{i=1}^n v_{im} \cdot s_m \quad (13)$$

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

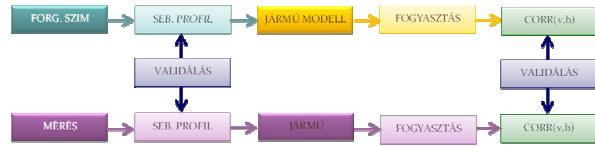
$$\sum F_{Input} < \sum F_{Output} \quad (14)$$

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

2.2 A modell validálása,

A modell validálása, esetünkben egyaránt történik, a mért keresztmetszeti forgalmi adatok alapján és a forgalomban részt vevő GPS készülékkel felszerelt gépjárművek sebességmérésével nyert adatok figyelembe vételével is. A nemlineáris közlekedési modellünkre alapozva, a modellezésére a PannonTraffic szuper szimulációs eszközt fejlesztettünk ki. Ez a környezet – annak ellenére, hogy makroszkopikus a modell – alkalmas arra is, hogy a valós közlekedési folyamatokat (lámpák, torlódások stb.) figyelembe véve, tetszőleges közúti hálózat esetén két kiválasztott pont között szabadon választott trajektóriákon, tetszőleges időszakban valós eljutási folyamatot határozzunk meg. Ez, a klasszikus igényeket jelentő útvonal-ajánlásokon kívül, az intelligens járművizsgálatok területén fontos eredmény, (pl. autonóm járművek célba juttatása mellett, a gépjárművek dinamikai analízise, méretezése, környezeti terhelése, emisszió vizsgálata, stb., területeken), mivel különböző időpontokban és helyeket figyelembe véve, nagyszámú járműre vonatkozó, gyorsan elvégezhető analízist biztosít.

Az első modell-validálás Budapesten történt, Peter, Fülep and Bede (2011). A lámpás kereszteződéseknél aktuális lámpa-beállítási adatok mellett és a helyszínen elvégzett forgalomszámlálási adatok alapján. A vizsgált útvonal, a különböző szimulációs időpontokban bejárásra került GPS készülékkel felszerelt gépjárművekkel valódi sebességprofil mérésekkel és a szimuláció során nyert sebesség-idő diagramok összehasonlításával nagyszámú, nemparaméteres statisztikai analízissel, u.n. homogenitás vizsgálattal megállapítást nyert, hogy a sebességprofiloknál a mért és szimulációval kapott két-két mintahalmaz 95% -os szinten homogénnek tekinthető. A modell validálása során az is megállapítást nyert, hogy a modell lehetővé teszi olyan egyedi sebességfolyamatok kinyerését, amelyek a valóságnak megfelelnek. Ezt végezzük el a 3. ábrán látható, a hálózatok közlekedési folyamatainak komplex vizsgálata, mérés és szimuláció együttes értékelése alapján.



3. ábra: A hálózatok közlekedési folyamatainak komplex vizsgálata

A szoftver objektum-orientált, könnyen továbbfejleszhető, 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.

Egy keresztmetszeti validálás adatait és eredményeit láthatjuk Győr városmag esetében a, Szent István út és környékének közlekedési szimulációs modellje és forgalommérési adatok esetén. A modellünk, az egyik legnagyobb forgalmat lebonyolító út, a Szent István út (1. sz. főút) és környéke területét foglalta magában. Ez a forgalmi modell fontos szerepet játszik a környezetterhelések vizsgálatainak szempontjából is, Péter, T. and Fazekas, S. (2014).

A hálózatot jellemző fő adatok:

- 228 db útszakasz
- 9 jelzőlámpával irányított csomópont
- 38 egyéb csomópont
- 18 input szakasz
- 15 output szakasz

A modell adatoknál támaszkodtunk a város által 2012. évben elvégzett keresztmetszeti forgalommérésekre. A modellünk esetében, 63 keresztmetszeti mérési adatot vettünk figyelembe a vizsgálatoknál és a validálásnál. Ezt egészítik ki a fedélzeti GPS készülékkel végzett forgalomsebesség mérések.

A szimuláció a vizsgált időszakra (7: 15 - 8: 15) vonatkozóan 6 másodperc alatt futott le. A szimuláció 24h-s időtartamra vonatkozó futtatási ideje 2 perc 14 másodperc.

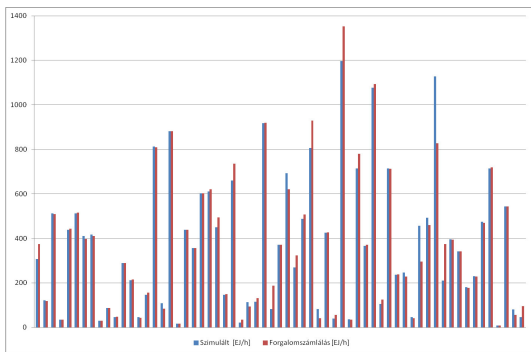
A validálás előkészítéséhez egy szoftverfejlesztési feladat társult, amelyet sikeresen elvégeztünk. Igen jól követik egymást a mért és szimulált keresztmetszeti forgalmi adatok a különböző hálózati pontokat megfigyelve. A kiértékelés során a korrelációs együttható:

$$r_{x,y}=0.9925070033,$$

amely a gyakorlatban már 100%-os korrelációnak tekinthető. A szoftvert képessé tettük arra, hogy a beállított egységjármű

hossznak megfelelően negyedórás, ill. órás átlag forgalomnagyságot tudjon exportálni a szimuláció során számított járműsűrűség adatsorokból. A kidolgozott eljárás az egyik alapfeltétele annak, hogy a validálást elvégezhessük a modell paraméterein.

A szimuláció futásakor megfigyelhető volt, hogy a legelső esetben, mintegy 13-17 perc tranziens elteltével állnak be állandó értékre az állapotjellemzők, ha minden belső szakaszokon 0 kezdeti értéket állítunk be és a korábban tárgyaltak szerint időben állandó értékű input és output járműsűrűségeket veszünk figyelembe. A végleges értékre beállítás sebessége nagyban függ a külső szakaszoktól való távolságtól és attól, hogy a vizsgált szakaszra milyen komplexitású hálózatrész kapcsolódik és az adott szakasz milyen hálózatrészhez csatlakozik. A fentiek miatt az első negyedórás szimulációt praktikusán célszerű megismételni, a már beállított belső hálózati állapotjellemzőkkel, - mint kezdeti értékekkel.

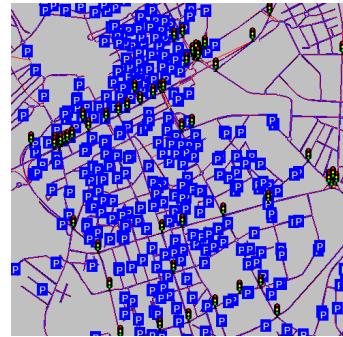


4. ábra igen jól követik egymást a mért és szimulált [Ej/h] keresztmetszeti forgalmi adatok

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

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 vezetnek le a közúti forgalomnak jelentős részét, míg az őket összekötő utcák csupán parkolóhelyül szolgálnak vagy lakófunkciót látnak el.

A 175 km² 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.

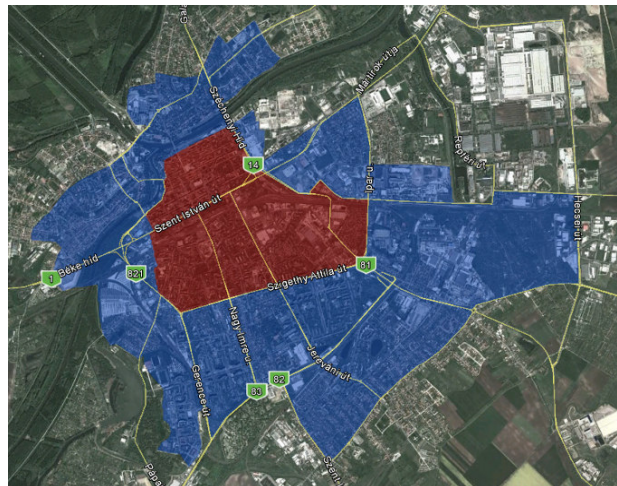


5. ábra: Parkolók és jelzőlámpák a példahálózaton

A közterületeken található parkolók felmérését is 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 hozzáférést műholdas felvételek nyújtottak segítséget.

3. Tartomány szintű irányítás adaptálása

Egy lehetséges konfigurációja a tartományi szintű irányításnak a 6. 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 indokoltá teszi. Ez a kialakítás képes biztosítani a kívánt beáramlást – kiáramlás arányt a tartományban, és minden esetben garantál elkerülő utat a torlódási pontoktól.



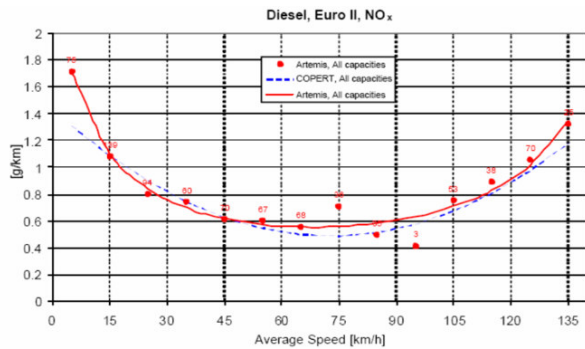
6. ábra: Kétszintű tartományi irányítás Győrött

4. A modell kiterjesztésének lehetőségei

Az Európai Unió és Magyarország kiemelten kezeli a közlekedés által okozott környezeti problémákat Dr. Lakatos István (2001), Lakatos István (2004.1), Lakatos István (2004.2), 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, mint 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. ábra: NOx kibocsátás hagyományos (EURO-2) személygépjárművek 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 percnkénti fordulatszámától).

Az irányításhoz alkalmazzunk most egy olyan Lyapunov függvényt, amely az NOx kibocsátás optimalizálására 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 (15) 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:

$$V_E(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) = k_1 E(V_1(\tilde{x}_1)) + k_2 E(V_2(\tilde{x}_2)) + \dots + k_n E(V_n(\tilde{x}_n)) \quad (5)$$

Ahol: $k_i = \frac{l_i \cdot x_i}{h_i}$ az i -ik szakaszon a forgalomban résztvevő

PCE száma, ($i=1, \dots, n$),

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 és i -ik szakaszhozra 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:

$$E(V_i(\tilde{x}_i)) = c_i \cdot [f_i(x_i) - v_{i,opt}]^2 + E_{i,opt} - E_{i,opt} \quad (16)$$

Ahol: $\tilde{x}_i = f_i(x_i) - v_{i,opt}$, $c_i > 0$ szakaszhozra és

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:

$$f_i(x_i) = v_{i,opt} \quad (17)$$

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 jelenti, 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 keresztződés átbocsátóképességének növelésére, vagy teljes tartományokon a kiegyensúlyozott, folyamatos haladási sebesség biztosítására a speciális Lyapunov függvényre alapozott optimális irányításunk alkalmazásával

5. Összegzés és a GreenNet kifejlesztésének lehetőségei

A fentiek alapján a **GreenNet** koncepció célja egy olyan integrált innovatív alkalmazás, ill. rendszer

megvalósítása, amelynek feladata a városok közlekedési légszennyezésének minimalálása, ill. megszüntetése.

Az irányítás nemlineáris közötti közlekedési hálózatok modell bázisú. A Hibrid irányítás a komplex probléma kezelését a kibocsátások forrásnál csökkenti.

Kiemelendő, hogy társadalmi egyeztetés is kell a megvalósításhoz. Az elsődleges vizsgálatok egy izgalmas és szép kísérleti modell tervezését igénylik, amelynél több fokozatú az irányítás. Döntő jellegzetessége a hálózatokon a tömegjelenség, - ezért praktikus a speciális hálózati makroszkopikus modell alkalmazása. Ugyanakkor, figyelembe kell venni, a mikroszkopikus sajátosságokat. Ez az egyedi járműösszetételeknél és ennek változásánál, ill. változtatásánál lép fel. Tartomány jellegű is a probléma, sőt gyakran több tartomány-probléma is fellép a speciális modell ezt is szolgálja!

Világos koncepcionális megközelítést kell adni. Ennek fontosságát, a környezeti adatok és a klímaváltozás adatai kétségeket kizáró módon alátámasztják. Esetünkben, egy lehetséges megközelítést analizálunk.

Módszer: a teljes hálózaton történő intelligens irányítás. Az optimális irányítás valós idejű és a városi közlekedési hálózat komplex dinamikus rendszerén történik. Figyelembe veszi a hálózati járműsebesség, - járműsűrűség, - járműösszetétel és emissziós folyamatokat.

A légszennyezés csökkentésével kapcsolatos társadalmi indokoltság

Az ENSZ Egészségügyi Világszervezete (WHO) a legutolsó adatok szerint, évente 1,47 ezermilliárd euróra (443 ezermilliárd forint) becsülte a légszennyezés okozta betegségek és halálozások teljes európai költségeit. (A WHO európai régiójához tartozik még Izrael, Üzbegisztán, Oroszország és néhány további állam is.)

Az általunk kezdeményezett GreenNet innovatív fejlesztés a városi közlekedés által okozott légszennyezés csökkentésére koncentrál. Ez a terület azért kiemelten fontos, mivel a legnagyobb kibocsátó a felszíni közlekedés! A különböző szennyezőanyagok esetén 42 % - 86% kibocsátás a közlekedésből származik.

Az európai régió népessége kb. 889 millió és lakosainak 80%-a város lakó, tehát 711 millió ember egészségét érint a városi közlekedés környezeti szennyeződése.

A veszteségek és hatások csak nagyságrendben becsülhetők! Figyelembe véve a fentieket, egy évben a környezeti károk becslések szerinti értéke a városokra vetítve 500-1000 milliárd EUR kár.

A GrenNet három fokozatú hibrid irányítás a kibocsátásokat a forrásoknál csökkenti

I. Fokozat: A GrenNet I. fokozat a kritikus tartományokon, perem - fluxus irányítással optimális forgalmat állít elő. A kialakuló kedvező állapot megszünteti a torlódásokat és a kibocsátásért felelős eredeti járműszám a kritikus tartományokon lecsökken 55-75%- ra.

II. Fokozat: A GrenNet II. fokozat a tartományon elvégzi a kibocsátásra optimális sebesség beállítását is! Ezzel elérhető, hogy az eredeti kibocsátás 13 - 36% -ra csökkenjen le.

A kettő együttes hatása, hogy 7 - 27 % -ra csökkenti a kibocsátást. Ha az egészségkárosodást arányosnak tekinthetők a kibocsátással, akkor város lakókra vetített a **500-1000** milliárd EUR/év lecsökken **35-270** milliárd EUR/év-re!

III. Fokozat: A GrenNet III. fokozat az előre várhatóan kritikus helyzetek fellépésénél pl. szmog, járműösszetétel szelekciót alkalmaz. Ezzel az elérhető, hogy az eredeti kibocsátás a 0 - 10% -ra csökkenjen le. A három eljárás együtt 0 - 2,7 % -ra csökkenti le a kibocsátást!

Az alsó határértéket, az alábbi módon értjük: A 0%, ill. közl. környezetszennyezés megszüntetést az adott tartományban a GrenNet III. fokozat elvben elérheti, ha a gépjármű szelekció úgy hajtjuk végre, hogy pl. szmog veszély esetén, csak az elektromos járműveket engedjük be a kritikus tartományba. (Természetesen, más tartományból történő szennyezés-átzivárgás mindig felléphet, de az nem a felügyelt területről származik.)

Az intelligens rendszer megvalósítása előtt, egy rendszertvet kell elkészíteni, amely tekintetbe veszi az adott város sajátosságait és megfelelő tájékoztatást és bevonást biztosít a lakosság és a közlekedés szereplői számára a közös cél minél eredményesebb végrehajtása érdekében és a későbbi visszacsatolások biztosítása érdekében.

Az intelligens rendszer alapműködése a légszennyezettésg minimálását szolgáló optimális sebességfolyamatok irányítását/beállítását végzi el. Ugyanakkor, a várható súlyosabb helyzetekre, ill. szmogra is fel lesz készítve a zöld közlekedésirányítás. A mérésekkel párhuzamosan folyamatosan modellszámításokat és előre becsléseket is végez. Ez alapján, ha szükséges, az optimális járműösszetétel szabályozását is elvégzi (III. Fokozat), modell prediktív irányítást alkalmazva. Infokommunikációs és intelligens kamera-rendszert alkalmazva, időben tájékoztatja ez egyes járműkategóriák vezetőit, hogy mely zónákon, mely időszakokban nem haladhat át, vagy ha át kíván haladni, akkor mekkora extra környezetterhelési útvonaldíjat kell ezért fizetnie. **A rendszer a tömegközlekedést, a hibrid és az elektromos járműveket nem korlátozza.**

A telepített monitorozó rendszer méréseit a rendszer tesztje és kezdeti működtetése során referenciamódszerekkel történő szabványos mérésekkel hasonlítjuk össze. Ezzel alátámasztva az üzemszerű és megfelelő működést, továbbá a telepített monitorrendszer adatainak minőségbiztosítását is. Az összeméréssel történő „megfelelő működés” igazolására a tesztüzemeltetés során nagy hangsúlyt fektetünk. A részecskéken kívül a közlekedés eredetű gázkomponenseket

is monitorozzuk, hogy teljes képet kapjunk a forgalomból adódó levegőterhelésről.

6. 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. Az intelligens városok közúti forgalmi rendszertervének elkészítése egy irányítást 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 hipermatrix 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, a tartományi irányításának lehetőségére. Kiemeltük a modell kiváló képességeit, rámutatva a forgalom-orientált környezet szennyezés csökkentésére és az irányításnak ilyen irányú kiterjeszhetőségére is.

Irodalomjegyzék

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

Boothby, (1982) Boothby, W. M.: Some 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 modell 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/mmmaws/>

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 model 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 efficiency 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, Periodica Polytechnica-Transportation Engineering 40/2 (2012) 53–60. doi: 10.3311/pp.tr.2012-2.02 web: [http://www.pp.bme.hu/ tr](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: Nagyméretű 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, Vietnam.

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., Kalincsak, 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/>

Péter, T. and Fazekas, S. (2014) Determination of vehicle density of inputs and outputs and model validation for the analysis of network traffic processes. Periodica Polytechnica, Transportation Engineering Vol. 42.. No 1. 2014. pp. 53-61.

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

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.