

Tartományszintű optimális közúti forgalomirányítás, a környezetterhelés csökkentésére

Dr. Péter Tamás¹, Dr. Hány András², Dr. Szauter Ferenc³, Dr. Vadvári Tibor⁴, Dr. Lakatos István⁵

¹ Department of Control for Transportation and Vehicle Systems, Budapest University of Technology and Economics; Stoczek u. 2, H-1111 Budapest, Hungary; peter.tamas@kjk.bme.hu

² ZalaZONE; Industrial Park Ltd., Dr. Michelberger Pál u. 3., H-8900 Zalaegerszeg, Hungary; andras.hary@apnb.hu

³ Széchenyi István University SZE KVJT and JKK; Egyetem tér 1. H-9026 Győr, Hungary; szauter@sze.hu

⁴ University of Pannonia; Gasparich Márk u. 18/A, H-8900 Zalaegerszeg, Hungary; vadvvari.tibor@zek.uni-pannon.hu

⁵ Széchenyi István University SZE KVJT and JKK; Egyetem tér 1. H-9026, Győr, Hungary; lakatos@sze.hu

Az általunk alkalmazott hálózati modell felhasználásával, elvégezhető az általános nagyméretű közúti hálózatok modellezése. A hálózati modell térkép-gráf invariáns és speciális hipermatrix struktúrával írható le. Ez alkalmazható a közlekedési hálózatok tartományi szintű optimális irányítására Lyapunov függvény alkalmazásával. Ezt az irányítást kiterjesztjük a közlekedési folyamatokból származtatható környezet- és légszennyezés csökkentésére is.

1. BEVEZETÉS

A közlekedési hálózatok forgalmi folyamatainak feltárása, terepen végzett mérések esetén általában igen korlátozott lehetőségeket biztosítanak. Ezért, sok esetben szimulációs szoftverek segítségével szokás ezeket megállapítani. A forgalmi szimulációk futtatásához azonban szükség van bizonyos mennyiségű és minőségű mérésre, amelyek a számítások kezdeti értékeit meghatározzák. A bemenő paraméterek azonban szimulációs szoftvereként jelentősen eltérhetnek. A hagyományos módszeren alapuló forgalmi szimulációk utazás-felvételi vagy klasszikus forgalomszámálási módszerekből indulnak ki. Előbbi esetben forgalomkeltés és forgalomvonzás esetéről beszélhetünk legtöbbször, amelyet honnan-hová mátrixok formájában szoktak felírni. 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, Alkalmom-modell /Intervening Opportunities Model/, Versengő lehetőségek modellje /Competing Opportunities Model/, Többszörös regressziós modell, Utazási költségmodell, 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 forgalomszámálásokon alapulnak, amelyek jól definiált, ütügyi szabványban is rögzített módszereket alkalmaznak, és a közlekedés tervezése során is általánosan elfogadottnak tekinthetők. A forgalom számálása járműfajta szerint történik, amelyeket egységjárműben kifejezve szorzótényezőkkel súlyoznak. A forgalom számálása különböző napszakokban, szezonálisan végzendő, és eredményeként napi gépjárműforgalom, mértékadó óraforgalom (MOF), nappali és éjszakai forgalom számítható. Az ilyen jellegű forgalom számálásokkal operáló szimulációs szoftverek előnye az, hogy az elfogadható biztonsággal megállapított bemeneti értékekhez a szakma számára jól értelmezhető, megfelelő minőségű eredmények párosulhatnak. A forgalom számálásokat alkalmazó rendszerek hátránya ugyanakkor az, hogy a forgalom nagyság, az átlagsebesség és a járműsűrűség közötti összefüggések nem adnak egyértelmű hozzárendelést; így pl. egy adott forgalom nagysághoz több átlagsebesség érték is tartozik. A rendszer tehát határozatlanságokat hordoz magában, ami abból adódik, hogy a hagyományos keresztmetszeti vagy csomóponti forgalom számálás 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 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. Ez a motiváció igen fontos, mert új irányt szab a közlekedés, kiemelt iparágakhoz kapcsolódó célzott kutatások 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 igen összetett: a közlekedési hálózat rendkívül bonyolult, belső automatizmusok, humán tényezők, sokféle szabály, geometriai, adat, szezonális. 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 fel nem vetett kérdés, hogy lehet-e ezekből - a példákból - következtetni az egészre, a teljesre? Ha megoldjuk egy résznek az optimalizálását, 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 irányt szab a kutatásoknak. Hagyományos modelleknél probléma a parkolók szerepe is a modellekben, mivel ezek más típusú szereplők, mint az útszakaszok, ezért u.n. idegen elemek.

A közlekedési folyamatok komplexitása magas szintű automatizálást, integrálást 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 tekintetében. A javasolt 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 uniformizálása és a számítási gyorsaság. Ennek köszönhetően a hálózatoknál valós idejű irányítás alkalmazható. A kutatásaink az egyes esetekben külön-külön is vizsgálják a közlekedési folyamatokat a trajektóriák mentén 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 optimalizálása Lyapunov-függvény alkalmazásával viszont, tartomány szinten történik. Ez utóbbinál a 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 BONYOLULT HÁLÓZATI PROBLÉMÁK VIZSGÁLATÁNÁL

I. Fontos cél a hatékonyság. Ezért a nagyméretű bonyolult hálózati problémák modellezésére új paradigmákon alapuló dinamikus modell-kutatáson 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 továbbfejlesztése. Ez felhasználóbarát módon alkalmas nagyméretű ipari modellezésre és az intelligens közúti hálózatok esetén, valós idejű irányítási feladatok ellátására.

III. Cél, az új kutatások hatékony alkalmazási lehetőségeinek biztosítása a közúti forgalmi folyamatok vizsgálatánál. Ezzel kapcsolatos átfogó - adatbankot és valós forgalmi szimulációt magába foglaló - rendszerterv elkészítésére az intelligens városi hálózati közlekedéséhez.

IV. Cél, a városi trajektóriák menti komplex környezetterhelés, biztonság és veszély analízisére gyorsított módszerek kifejlesztése.

A modellezésére praktikus makroszkopikus hálózati modellt építettünk fel Makroszkopikus modellünk, a nagyméretű közúti hálózatokon a közlekedési folyamatok modellezése a pozitív nemlineáris rendszerek osztályába tartozik. Jelen kutatásban a teljes hálózatot vizsgáljuk, ezért fontos 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) sűrűségekre is alkalmazhatók (Greenshields, Kladek, Pipes és Munjal, Drake és Zachor, Drew, Underwood, stb.), azonban ezek az elméletek csak a hálózat egy-egy adott szakaszára érvényesek, és nem

általánosíthatók tetszőleges, a hálózat egynél több elemét tartalmazó trajektóriájára. Ezért bevezettük a következő n változós sebesség-sűrűség függvényt (Péter, 2012.2), amely bármely $n \geq 1$ számú szakaszból álló trajektória esetén érvényes:

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

ahol $V_i > 0$ a maximális sebesség; l_i az i szakasz hossza; $x_i = x_i(t)$ a i szakaszon t időpillanatban fellépő járműsűrűség 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:

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

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

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

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, ahol a belső szektorok és 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 matrixok, következésképpen az általuk meghatározott teljes kapcsolati rendszert leíró K kapcsolati hipermátrix is Metzler matrix. A vizsgált modell alkalmas nagyméretű közúti közlekedési hálózatok szimulációs testjére és tervezésére, és a forgalmi rendszerek szabályozására (Péter és Szabó, 2012).

3. LYAPUNOV FÜGGVÉNY ALKALMAZÁSA

A tartományszintű irányítás szűkített hálózati modell alkalmazását igényli, amely 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. Ennek alapján, a modell differenciálegyenlet-rendszere az alábbi:

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

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.

A stabilitását az (5) lineáris Lyapunov függvény felhasználásával vizsgálhatjuk:

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

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

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

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 vizsgáljuk a fenti (4) állapotegyenletet figyelembe véve:

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

Az

$$L \cdot \langle L \rangle^{-1}$$

n dimenziós összegző vektorral írjuk fel az előbbi egyenletet:

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} = [1, 1, \dots, 1] \cdot [K_{11}(x, s) x + K_{12}(x, s) s] \quad (9)$$

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

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

Ez alapján:

$$[1, 1, \dots, 1] \cdot K_{11} = \begin{bmatrix} -\sum_{w=1}^m v_{w1} & -\sum_{w=1}^m v_{w2} & \dots & -\sum_{w=1}^m v_{wn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

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

$$\begin{bmatrix} -\sum_{w=1}^m v_{w1} & -\sum_{w=1}^m v_{w2} & \dots & -\sum_{w=1}^m v_{wn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = - \left(\sum_{w=1}^m v_{w1} \cdot x_1 + \sum_{w=1}^m v_{w2} \cdot x_2 + \dots + \sum_{w=1}^m v_{wn} \cdot x_n \right) \quad (12)$$

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

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

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

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n v_{i1} & \sum_{i=1}^n v_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n v_{im} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n v_{i1} \cdot s_1 + \sum_{i=1}^n v_{i2} \cdot s_2 + \dots + \sum_{i=1}^n v_{im} \cdot s_m \quad (14)$$

Figyelembe véve (13) és (14) egyenleteket a következőt állapíthatjuk meg:

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

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

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

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 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 optimalálásával is. A tartományszintű irányítási szemlélet bevezetése fontos a csomópontok irányításánál is. Ekkor a csomópontot körülkerítő zárt görbével határolt tartományon keresztül időegységként, 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 FEJLESZTÉSE

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. Tekintettel a gyakran igencsak kiterjedt hálózatokra, minden lehetséges helyen szükséges automatizálni a szerkesztés folyamatát. A legértékesebb automatizálás a parkolókhöz kapcsolódik. A parkolók

kapacitásának kiszámítása lehetséges képfeldolgozás útján. E mellett, a parkolók elhelyezése, méretei a nemzeti szabványokban pontosan definiált. Ez praktikus azt jelenti, hogy a parkolók kapacitása legtöbbször a kapcsolódó út hosszától és a parkoló elrendezésétől függ. A parkolónak ezen tulajdonsága felhasználható 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 ekkor számszerűleg kell megadni.

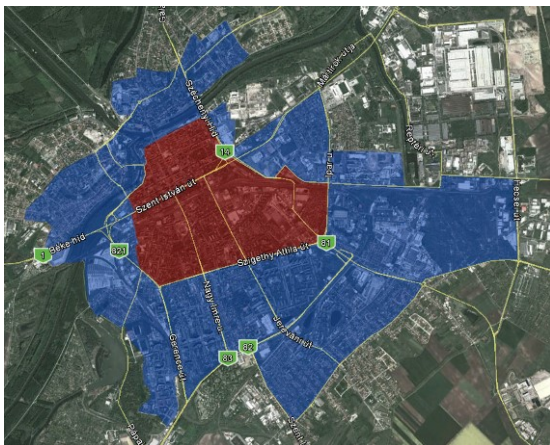
5. A VÁROS FORGALMI MODELLEZÉSE

A munkánkhoz kitűnő lehetőségeket biztosít, ha a város deklarálta törekszik az intelligens város megvalósítására. Az 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. A fentiekben tárgyalt matematikai modellt alkalmazó szoftverünk képes megbirkózni a nagyméretű városi hálózatokkal és szimulációs eredményeket szolgáltatni rendkívül gyorsan további vizsgálatok elvégzéséhez és hálózat fejlesztéshez.

6. TARTOMÁNY SZINTŰ IRÁNYÍTÁS ADAPTÁLHATÓSÁGA, ZALAEGERSZEG VÁROSNA

A nagyvárosok egyes területei a teher- és személyi forgalom által erősen túlterheltek, amelyet a városon keresztül haladó főutak generálnak elsősorban és a közelben haladó autópálya. A csúcsidő dugók elkerülése tartományi szintű irányítás bevezetésével szabályozhatóvá tehető. 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 kiterjeszhetnénk, 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

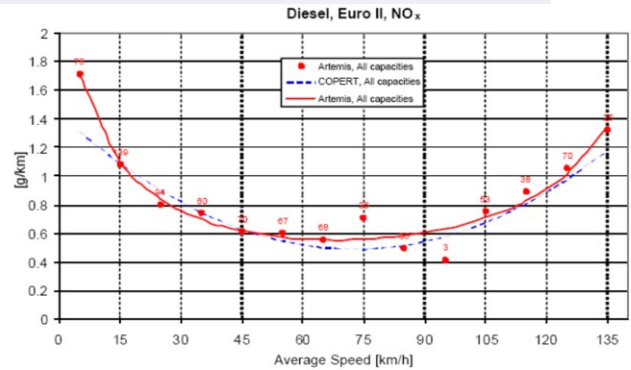
is. Egy lehetséges konfigurációja a tartományi szintű irányításnak látható az 1. ábrán. A példa egy kétszintű tartományi irányítást mutat be a városra, ahol a szub-tartomány (piros terület közepén) a történelmi belvárost, a forgalmas közforgalmú közlekedési csomópontokat, terminálokat (vasútállomás, 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 beáramlási – kiáramlási arányt a tartománynál és minden esetben garantál elkerülő utakat is a torlódási pontoknál.** Ekkor, szükségessé jelzőberendezés működtetése minden, a tartomány pereme által érintett kereszteződésben, továbbá a már felszerelt jelzőberendezések mindegyike felkészítendő a feladat teljesítésére (dinamikus lámpaprogram alkalmazása központi irányítással).



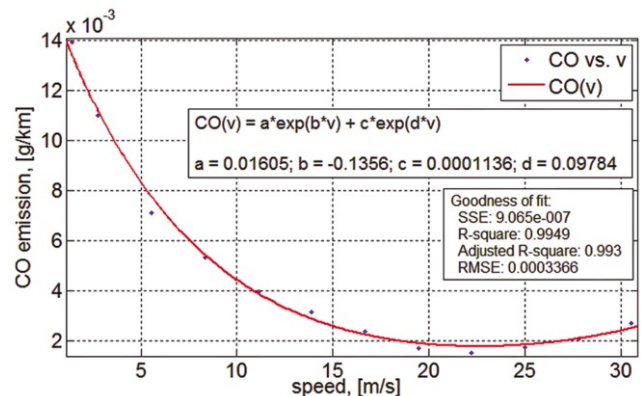
1. ábra: Kétszintű tartományi irányítás

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, 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.



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



3. ábra: egy benzin üzemű gépjármű CO kibocsátása a jármű sebességének függvényében. Forrás: Raimundas Junevičius, Marijonas Bogdevičius, Ádám Török (2011).

A 3. ábrán jól látható, hogy vizsgált járműnek megközelítőleg 22 m/s, az-az 79,2 km/h sebesség körül a legkisebb a CO kibocsátása. Jól látható, hogy ez igen közeli értéket mutat a 2. ábrán látható NOx kibocsátásra vonatkozó optimális sebesség értékéhez. Egyéb sebességtartományban pedig mindkét emisszió drasztikusan megnövekszik. Hasonló jellegű görbéket kapunk a többi egyéb szennyező komponens esetében is. A diagramból kiolvasható, hogy a forgalmi dugókban, ahol a haladási sebességek igen alacsonyak, a károsanyag kibocsátás a belsőégésű motorokkal hajtott járművek esetében fokozott. 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 (a motor percenkénti fordulatszámától) függ.

Az irányításhoz alkalmazzunk most egy olyan Lyapunov függvényt, amely az NOx kibocsátás optimalizálására szolgál. Ekkor a Lyapunov fizikai jelentése legyen a t időpillanatra jellemző összes NOx kibocsátás értéke, amelynél a belső úthálózat összes szakaszát figyelembe vesszük:

$$V_E(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{l_1 \cdot x_1}{h_1} E(V_1(x_1)) + \frac{l_2 \cdot x_2}{h_2} E(V_2(x_2)) + \dots + \frac{l_n \cdot x_n}{h_n} E(V_n(x_n)) \quad (17)$$

Ahol:

$$\frac{l_i \cdot x_i}{h_i}$$

az i -ik szakaszon a forgalomban résztvevő gépjárművek száma ($i=1, \dots, n$),

h_i az i -ik szakaszon a forgalomban résztvevő gépjármű típusra jellemző hossz,

$E(V_i(x_i))$ az i -ik szakaszon, a forgalomban résztvevő gépjármű típusra jellemző időegységre 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! Szakasonként az NOx kibocsátás jól leírható az alábbi módon:

$$E(V_i(x_i)) = c_i \cdot [f_i(x_i) - v_{i,opt}]^2 + E_{i,opt} \quad (18)$$

Ahol: $c_i > 0$ regressziós konstans 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:

$$f_i(x_i) = v_{i,opt} \quad (19)$$

Az ehhez tartozó környezeti terhelésre optimális járműsűrűséget jelöli:

$$x_{i,opt}$$

Ekkor lép fel a szakasonként optimális NOx kibocsátás:

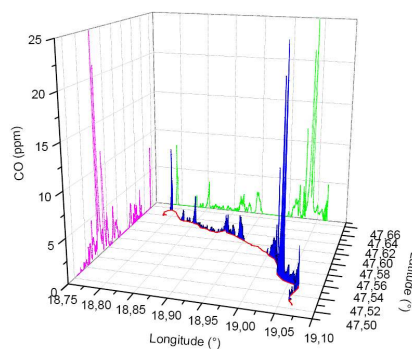
$$E(V_i(x_{i,opt})) = E_{i,opt} \quad (20)$$

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 fenti irányítás a gyakorlatban valamivel egyszerűbb eljárással is megvalósítható, az alábbiak szerint:

- I. Tartományszintű Lyapunov függvény irányítással folyamatosan biztosítható az optimális járműsűrűség a tartomány szektorain.
- II. A fentieket kiegészítik, a szakaszokon működő változtatható jelzéseképp sebességjelző táblák, amelyek a minimális környezetterhelést biztosító optimális sebességet írják elő.

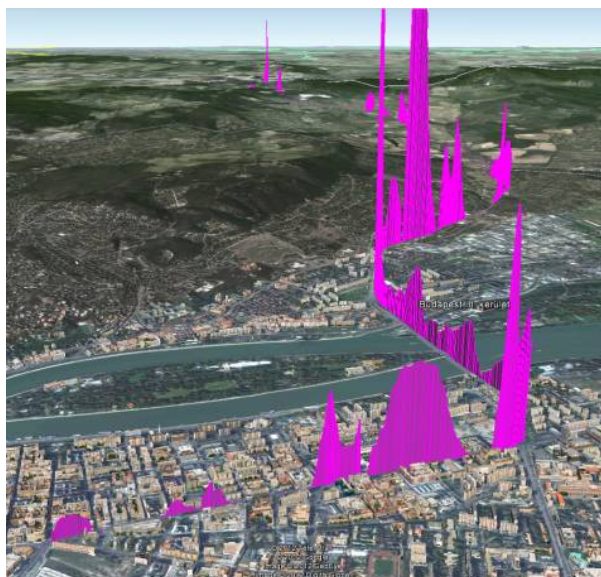
Ez a megoldás figyelembe veszi, hogy a konkrét közlekedési folyamatoknál a gyakori gyorsítás-lassítás ciklusok extrém módon növelik a légszennyezést (és a fogyasztást is), ezért mindenképp különösen fontos a városi forgalomban az állandó optimális sebességfolyamathoz közeli állapot fenntartása! A valós emissziós volumen feltérképezése érdekében szükséges a részletes, területfüggő szennyezőanyag koncentráció meghatározása. Erre alkalmas a Molnár András (2018) és munkatársai által kifejlesztett intelligens mérő modul. A mérő modul a térbeli pozíciót, a légnyomásból számított magasságot és sebességet közvetlenül GPS és nyomásmérő szenzoroktól kapja és a szenzorok által mért adatokkal egyesítve a egy speciális struktúrájú adatsort állít elő. Jelenleg a modul az alábbi légköri alkotóelemek, illetve szennyezők mérését végzi: Oxigén (O₂), Ózon (O₃), Szén-dioxid (CO₂), Szén-monoxid (CO), Nitrogén-dioxid (NO₂), Nitrogén-monoxid (NO), hőmérséklet, vízpára, szálló por, gamma sugárzás, UVA sugárzás és UVB sugárzás. Mivel a terepi kísérletek megfelelő eredménnyel zárultak, a mérőegységet egy személygépjárműre felszerelve közúti forgalomban is elvégezték a méréseket.



4. ábra: CO emisszió alakulása egy közúti szakaszon mérve. Forrás: Molnár András (2018) XII.IFFK 2018 Budapest, Online: ISBN 978-963-88875-3-5 Paper 10. pp. 1-6.

Ennek célja az volt, hogy megvizsgálják, hogy kimutatható-e szignifikáns szennyezettség különbség torlódási szakaszok és folyamatos haladást biztosító szakaszok között? Ennek a mérési sorozatnak egy útvonalán mért CO koncentráció alakulását szemlélteti a 4. ábra.

A 3D megjelenítéssel jól láthatóvá vált a torlódással terhelt szakaszok jelentős szennyezettsége, illetve szignifikáns szennyezettségcsökkenés látható az elővárosi szakaszon. Még jobban értelmezhető a mért CO koncentráció 3D térképre vetítéssel (5. ábra). A forgalomban végzett mérések azt mutatják, hogy egy területre vonatkoztatott gépjárművek által kibocsátott szennyezés mértéke erősen függ a járművek haladási sebességétől. Álló vagy lassan haladó járművek esetében a terület terhelése jelentősen megnövekszik a gyorsan haladó járművekkel terhelt területtel szemben. Az emisszió-vezérelt forgalom szabályozás végső soron azt eredményezi, hogy a forgalomban résztvevő járművet folyamatosan mozgásban kell tartani.



5. ábra: CO emisszió alakulása egy hosszabb közúti szakaszon 3D térképen ábrázolva. Forrás: Molnár András (2018) XII. IFFK 2018 Budapest, Online: ISBN 978-963-88875-3-5 Paper 10. pp. 1-6

Ez kedvez a jármű műszaki állapotának is, mivel a jobb hatásfokon üzemelő motor kevésbé amortizálódik.

A forgalomban a járműsűrűség nagyon fontos! A sűrűség csökkenésével növekszik a sebesség, amely vizsgálataink alapján, beállítható optimálisra a tartományszintű irányítással Lineáris Lyapunov függvény alkalmazásával!

Itt jegyezzük meg, hogy az elektromos vagy hibrid járművek több szempontból is másképpen viselkednek, de országos (és nemzetközi) elterjedésüket tekintve egyelőre nem számottevő a hatásuk. Az elektromos hajtású járművek elterjedése csak

fokozatos lehet, így a gépjárművek légszennyezése is csak fokozatosan csökkenhet.

Figyelembe véve a felszíni közlekedés résztvevőinek növekvő számát, különösen a nagyvárosokban és környezetükben elengedhetetlen a levegő szennyezésének csökkentése. Mivel a szennyező anyagok egy jelentős részét épp a gépjárművek termelik, hatékony megoldásokat kell keresni az általuk kibocsátott káros anyagok csökkentésére.

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. Az általunk tárgyalt hálózati ITS egy olyan variabilis 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, további eszközt kívánunk biztosítani a nagyméretű intelligens közúti hálózatok esetén, valós idejű ipari irányítási feladatok megvalósítására Zalaegerszeg intelligens város közúti forgalmi rendszertervének elkészítéséhez, az ITS hálózat megvalósításához. Rendkívül pozitív a fellépő szinergia és az eredmények további hasznosításának lehetősége. Ezek új gyorsított módszereket jelentenek a trajektórák menti környezetterhelés csökkentésére. Bemutattunk a célt szolgáló makroszkopikus matematikai modellt. A modell nemlineáris pozitív rendszerosztályba tartozik. A speciális hipermátrix struktúra definiálja a hálózati elemek kooperációját és a kapcsolatokat leíró differenciálegyenlet rendszert. Tárgyaltuk a Lyapunov függvény egy új alkalmazási lehetőségét tartományi szintű irányításra. Kiemeltük a modell kiváló képességeit, rámutatva a forgalom-orientált környezet szennyezés csökkentésére és az irányításnak ilyen irányú kiterjeszhetőségére is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A konferencia cikk kutatásaihoz a „Tématerületi Kiválósági Program 2020 (2020-4.1.1-TKP2020) – Nemzeti Kihívások alprogram – Autonóm Közlekedési Rendszerek Kiválósági Központ létrehozása a Széchenyi István Egyetemen (TKP2020-NKA-14)” biztosított forrást.

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/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.
- Lakatos István (1994) *Gépjárműmotorok szelepvezérlése* Győr, Magyarország: Jaurinum Bt., 132 p.
- 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 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 (2010) Instacioner üzemállapotú motorteljesítmény-mérés görgős járműfékpadon In: Bikfalvi, P. *MicroCAD 2010: XXIV. microCad International Scientific Conference: E szekció: Anyagtudomány és -technológia*. Miskolci Egyetem (2010) pp. 33-38., 6 p.
- 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, *7th 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., 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/>
- Tamás, Péter; István, Lakatos; Ferenc, Szauter (2015) Analysis of the Complex Environmental Impact on Urban Trajectories ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: Mechatronics for Electrical Vehicular Systems. New York (NY), American Society of Mechanical Engineers (ASME) (2016) Paper: DETC2015-47077; V009T07A071, 7 p.
- Sachkov, (1997) Sachkov, Y. L.: On positive orthant controllability of bilinear systems in small codimensions, 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.: Controllability and reachability criteria for discrete-time positive systems, International Journal of Control 65(3) (1996) 511-536.
- Molnár András (2018) Léggöri Emisszió Vezérelt Forgalmiszervezés, XII. IFFK 2018 Budapest, Online: ISBN 978-963-88875-3-5 Paper 10. pp. 1-6.
- Raimundas Junevičius, Marijonas Bogdevičius, Ádám Török (2011) Modelling of internal combustion engines' emission through the use of traffic flow mathematical

- models in: Transport 2011 Volume 26(3): 271–278;
doi:10.3846/16484142.2011.621978
- COPERT 4 (2006) Computer programme to calculate emissions from road transport, Dimitrios Gkatzoflias - European Commission, Chariton Kouridis, Leonidas Ntziachristos, Zissis Samaras - Aristotle University of Thessaloniki
- Roland Romano Vienna (2010) Website Renewable Energy Electric Vehicles;
<http://loudspeaker.klack.org/seite4.html>
- AhmedAl-Samari (2016) Study of emissions and fuel economy for parallel hybrid versus conventional vehicles on real world and standard driving cycles in: Alexandria Engineering Journal Volume 56, Issue 4, December, 2017, Pages 721-726
- Horváth Ágnes (2017) Mikor szabadulhatunk meg a kipufogógázoktól? in: Chief Economist, 2017.08.14.;
https://gurulohordo.blog.hu/2017/08/14/mikor_szabadulhatunk_meg_a_kipufogogazoktol