



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR
BAROSS GÁBOR KÖZLEKEDÉSTUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Változtatható irányú forgalmi sávok analízise
nagy méretű közúti közlekedési hálózatokon
c. PhD disszertáció tézisei

Bede Zsuzsanna
okl. közlekedésmérnök

Témavezető:
Dr. Péter Tamás
a műszaki tudomány kandidátusa
BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

Budapest, 2013

1. Motiváció

A nemzetgazdaságok fejlődésének egyik fő jellemzője a közúti forgalom állandó növekedése. Közismert, hogy az infrastrukturális körülmények és a korlátozott erőforrások sajnos nem teszik lehetővé az utak kapacitásának ehhez szükséges mértékű növelését, ezért egyre gyakrabban alakulnak ki különböző típusú közlekedési anomáliák [Tánczos, Bokor; 2003].

Napjainkban általában növekednek a forgalmi torlódások is és az Európai Unióban a balesetek száma sem csökken a kívánatos mértékben. A közlekedési hálózatok fejlesztésénél az egyik első számú szempont a torlódások csökkentése. Ennek érdekében számos lehetőség közül a leginkább támogatott megoldás a meglévő úthálózat jobb kihasználása, a közúti járműforgalom homogenizálása, illetve az egy járműben utazók számának növelése, azaz a közös jármű vagy a tömegközlekedés használata [Kövesné; 2003]. A fenti célok megvalósítását szolgáló egyik ilyen egyszerű technikai háttérrel igénylő elv, melyet az Amerikai Egyesült Államok számos államában már az 1920-as évektől használtak, az úgynevezett változtatható irányú sáv elve [Fisher; 2010]. Európában szintén láthatunk már kezdeményezéseket a változtatható irányú forgalmi sáv alkalmazásra [Wolshon, Lambert; 2006], [Fehérkönyv; 2012].

Ugyancsak jól ismert, hogy a közúti közlekedés modellezése összetett műszaki és gazdasági feladatnak tekinthető [Kövesné, Debreczeni; 2003], ugyanis a dinamikus rendszer működésében nagyszámú résztvevő kap szerepet. A járműsokaság viselkedésére a közlekedési szabályok mellett, a humántényezők is számottevő hatást gyakorolnak. A rendszer működése számos geometriai jellemzőtől, illetve azok kialakítástól függ, amelyek szintén hatással vannak a közlekedési folyamatokra. Sokféle külső tényező is közrejátszik: pl. szezonális hatások, időjárás stb. Ezért a jól alkalmazható és hatékony makro-, illetve mikromodellnek egyaránt figyelembe kell vennie minden olyan feltételt, amely a rendszer működésére tényleges hatást gyakorol és elhanyagolása eltorzítaná az eredményeket. Mivel a gyakorlatban számos részletről nem lehet elegendő információt szerezni egy ilyen részletes modell kiépítéséhez gyakran be kell érniük „hiányos” és pontatlan modellek alkalmazásával, amelyek fogyatékoságai adaptív technikákkal némileg kompenzálhatók. [Papageorgiou; 1998], [Papageorgiou, et al.; 2003]

Vizsgálataimhoz speciális nemlineáris makroszkopikus modellt alkalmaztam, amely alkalmas a változtatható irányú forgalmi sávok rendszerének felírására. [Péter 2008/1], [Péter 2008/2] Munkám - a közúti közlekedési rendszerek nemzetközi kutatási eredményeit figyelembe véve - elsősorban a hazai irányításmélet szellemi bázisának eredményeit kívánja a gyakorlatba ültetni és hasznosítani [Bokor, Gáspár; 2008], [Bokor, Palkovics; 1994], [Várlaki et. al.; 2008]. A forgalom optimalizálása a nagyméretű közúti hálózaton igen szép és összetett feladat. Ebben a témakörben egy érdekes

speciális módszer a változtatható irányú forgalmi sávok alkalmazása, amely a közlekedési folyamatok dinamikájában (napszakonként, szezonálisan stb.) meglévő fő áramlat-irányok változását maximálisan támogatja a rendelkezésre álló útfelületen. Ilyen esetben a nagyméretű hálózat bizonyos részrendszerei megszűnnek és helyükbe új kapcsolatokkal működő részrendszerek lépnek be. Ez az irányítás tehát a rendszer struktúráját változtatja meg - „optimális irányban”, miközben természetesen sok gyakorlati és biztonsági kérdés is felmerül. Számos felmérés igazolja, hogy azokon a tartományokon, ahol ezt bevezették, az utazási idő közel a felével, a várakozási idő szintén felével, a megállások száma harmadával csökkent az eredeti adatokhoz képest. Olyan esetben, amikor egy ország közúti infrastruktúrája amúgy is jelentős fejlesztést igényel, ennek a lehetőségnek az alkalmazását nem hagyhatjuk számításán kívül.

2. Célkitűzések és kutatási módszerek

A különböző környezeti és társadalmi adottságokból adódó igényeknek megfelelően eltérő módon kell kiépíteni az egyes helyeken alkalmazható változtatható irányú forgalmi sávokat. Kutatási feladatom a forgalmi folyamatok modellezése, egy speciális közúti hálózati rendszermodell alkalmazása a változtatható irányú forgalmi sávok vizsgálatára. Szélesebb területen a változtatható irányú forgalmi sávok megoldás biztonsági kérdéseket is felvet, és kockázati elemzéseket is igényel. Ilyen elemzés megkezdése előtt fontos a kockázati tényezők áttekintése [Tarnai, Ságbi; 2006], az ismert kockázatminősítési elvek tanulmányozása, illetve a meglévő forgalomirányítással kapcsolatban támasztott követelmények és eszközök vizsgálata. Ezeknek a vizsgálatoknak egyik célja annak alátámasztása, hogy az új rendszer legalább akkora biztonságot nyújt, mint a jelenleg használt rendszer.

A rendszer biztonsági vizsgálata során baleseti statisztikákból indulhatunk ki. Mivel azonban új rendszerről van szó, a rendszer biztonságával szemben nagyobb lehet a társadalmi elvárás, mint amit a fenti elemzésekből következően biztosítani szükséges. Figyelembe kell venni a jelenlegi európai közlekedéspolitikát, amelynek célkitűzése a balesetek számának csökkentése, így nem a jelenlegi adatokkal kel számolni, hanem egy jövőbeni elvárt értékkel.

Ki kell emelni, hogy a változtatható irányú forgalmi sávok rendszerünk egyedi összetétele, egyedi biztonsági kérdést hordoz magában, mivel hibás működés esetén a legsúlyosabb baleset-kimenetel kettő vagy akár több járművet érintő szembemenegeteli ütközés lehet. Ezért ezt - egy bevezetésre kerülő rendszerrel - minden eszközzel meg kell gátolni.

Kutatásom célkitűzése a gazdasági szempontból is fontos közúti forgalmi folyamatok modellezése területén új tudományos eredmények elérése volt, amelyek az alábbi területek kidolgozásával történtek:

- A jelenleg alkalmazott változtatható irányú forgalmi sávok felmérése és a rendszer megismerése.
- A fenti közúti közlekedési rendszerek kialakításának elemzése.
- A matematikai, modellezési és programozási elméleti ismeretek alkalmazása.
- Változtatható irányú forgalmi sávok – mint részrendszerek – beillesztése a hálózati rendszereket leíró modellekbe. A rendszerek matematikai modellezése és analízise.
- A változtatható irányú forgalmi sávok – mint részrendszerek – beillesztésének sztochasztikus szimulációja. Az állapotfüggő irányítás lehetőségének feltárása és vizsgálata a fenti közúti közlekedési rendszerek struktúrájának módosításával.
- A hálózati rendszereket leíró modelltől kinyert adatok a járműdinamikai paraméterekkel való összehasonlító analízise. Ezek alapján a modell finomítása.
- Környezetterhelés vizsgálata, a modelltől kinyert és mért jellemzők együttes analízise.

Vizsgálataim megmutatták, hogy a változtatható irányú forgalmi sáv környezetterhelő hatásának vizsgálata is fontos feladatnak tekinthető. Ennek érdekében megalkottam egy új emissziós közlekedési modellt, melynek felhasználásával vizsgálni lehet az egyes járműveket és azoknak környezetkárosító hatásait az adott forgalmi rendszerben. Így célom egy olyan módszer kidolgozása volt, amely becsülhető immissziós értéket ad egy nagyméretű közlekedési hálózatot leíró modell kimenetelként.

3. A kutatási eredmények összefoglalása

Számos példát láttunk arra - elsősorban az Amerikai Egyesült Államokban -, hogy a tárgyalt megoldás egy jól működő és biztonságos rendszer, összhangban az Európai Unió célkitűzésével [Febérekönyv; 2012]. A jelenlegi közlekedési politika fontos eleme az informatikai és irányítási eszközök kidolgozása; technológiák fejlesztése a közlekedés védelmének és biztonságának javítására; továbbá az integrált közlekedésirányítási és információs rendszerek, valamint a forgalomirányítási rendszerek vizsgálata.

1. Tézis

Változtatható irányú forgalmi sávok – mint részrendszerek – beillesztése a hálózati rendszereket leíró modellekbe. A rendszerek matematikai modellezése és analízise.

Az általános kapcsolati hipermátrixot alkalmazó közlekedési keretmodellt [Péter; 2012] továbbfejlesztve, új modellt állítottam fel a megfordítható irányú közlekedési rend egy lehetséges irányítási stratégiájának meghatározására differenciálegyenlet-rendszerek alkalmazásával, amely a makroszkopikus modellen alapuló pozitív nemlineáris dinamikus rendszer irányításának felel meg. Továbbá tetszőleges részhálózaton történő forgalmi irányváltás esetére megadtam az új funkciójú kapcsolati mátrix elemeinek beállítási algoritmusát. Az így nyert új irányítási rendszer alkalmazhatóságát nagyszámú szimulációval vizsgáltam, s megállapítottam, hogy alkalmas a változtatható irányú szakaszok bevezetéséből származó előnyök számszerűsítésére, illetve kimutatására.

[Bede, Péter; 2011/1], [Bede, Péter; 2011/3], [Bede, Péter; 2011/4], [Bede, Péter; 2012/1], [Bede, Péter; 2012/2], [Péter, Bede; 2010], [Péter, Fülep, Bede; 2011]

Egy tetszőleges méretű közúti hálózat bármely részhálózatán kialakított megfordítható irányú közlekedési rend modellezését vizsgáltam [Peter, Basset; 2009], [Péter, Bokor; 2006], [Péter, Bokor; 2007], [Péter, Bokor; 2010], [Péter, Bokor; 2011]. Bármely részhálózaton történő irányváltás esetén a hálózat egyes elemeinek funkciói és az elemei közötti kapcsolatok megszűnnek, helyettük új kapcsolatok és új funkciójú elemek lépnek működésbe (**1. ábra**).

$$K = \begin{bmatrix} k_{1,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{2,1} & k_{2,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{3,2} & k_{3,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{4,2} & 0 & k_{4,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{5,4} & k_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{5,12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{6,6} & k_{6,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{7,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{8,6} & 0 & k_{8,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{9,8} & k_{9,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{10,8} & 0 & k_{10,10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{11,10} & k_{11,11} & k_{11,12} \\ k_{12,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{12,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{12,12} \end{bmatrix}$$

1. ábra $\underline{K}(x,s)$ konstruált mátrix

A matematikai modell pozitív nemlineáris dinamikus rendszer vizsgálatához vezet. A modell lényegét tekintve, makroszkopikus modell [Péter; 2009].

$$\underline{\mathbf{x}}' = \langle \underline{\mathbf{L}} \rangle^{-1} [\underline{\mathbf{K}}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}}) \underline{\mathbf{x}} + \underline{\mathbf{K}}_{input}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}}) \underline{\mathbf{s}}] \quad (1)$$

Ahol: $\langle \underline{\mathbf{L}} \rangle^{-1}$ a belső szakaszhosszak reciprokait tartalmazó diagonális mátrix

$\underline{\mathbf{K}}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ konstruált mátrix, amely $\underline{\mathbf{K}}_{belső}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ és a $\underline{\mathbf{K}}_{output}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ mátrixból lett képezve.

$\underline{\mathbf{K}}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ és $\underline{\mathbf{K}}_{input}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ kapcsolási mátrixok elemei a kapcsolási függvények, amelyek a sűrűségi állapotoktól függenek. A mátrix elemek fizikai jelentése átadási sebesség.

A minta-modell 12 szabadságfokú, 7 külső kapcsolattal rendelkező nemlineáris pozitív rendszer. A $\underline{\mathbf{K}}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ konstruált mátrix minden főátlón kívüli ($i \neq j$) elemei azonosak $\underline{\mathbf{K}}_{belső}(\underline{\mathbf{x}})$ belső mátrix megfelelő elemeivel. Továbbá $\underline{\mathbf{K}}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ egy i, j ($i \neq j$) főátlóbeli eleme azonos $\underline{\mathbf{K}}_{belső}(\underline{\mathbf{x}})$ j -ik oszlopbeli ($j=1, 2, \dots, n$) és $\underline{\mathbf{K}}_{output}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ j -ik oszlopbeli ($j=1, 2, \dots, m$) elemei összegének ellentettjével.

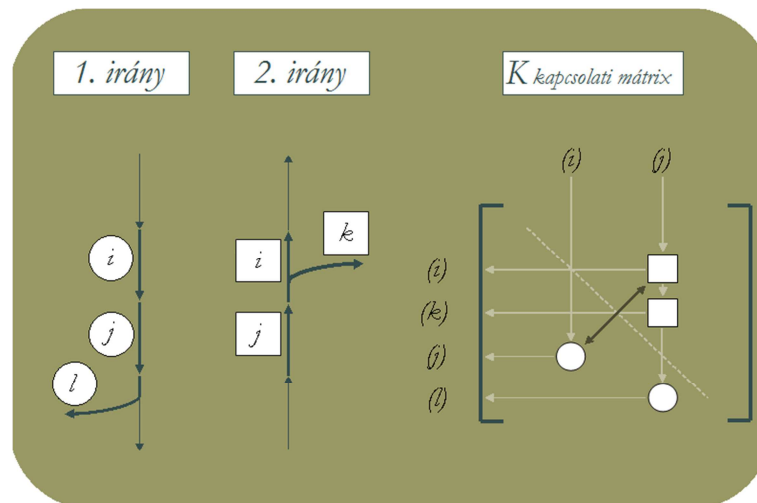
A $\underline{\mathbf{K}}(\underline{\mathbf{x}}, \underline{\mathbf{s}})$ konstruált mátrix zérustól különböző elemei az alábbiak:

$$\begin{aligned} k_{1,1} &= -\beta_{2,1}(1 - \alpha_{12,1})S(x_2)V(x_2, x_1)E(x_1) - AU_2(t)\alpha_{12,1}S(x_{12})V(x_{12}, x_1)E(x_1) \\ k_{2,1} &= \beta_{2,1}(1 - \alpha_{12,1})S(x_2)V(x_2, x_1)E(x_1) \\ k_{2,2} &= -\frac{\beta_{3,2}\alpha_{3,2}S(x_3)V(x_3, x_2)E(x_2)}{1 - \alpha_{12,1}} - \beta_{4,2}(1 - \frac{\alpha_{3,2}}{1 - \alpha_{12,1}})S(x_4)V(x_4, x_2)E(x_2) \\ k_{3,2} &= \frac{\beta_{3,2}\alpha_{3,2}S(x_3)V(x_3, x_2)E(x_2)}{1 - \alpha_{12,1}} \\ k_{3,3} &= -k_{2,3}(t)\beta_{02,1}S(s_2)V(s_2, x_3)E(x_3) \\ k_{4,2} &= \beta_{4,2}(1 - \frac{\alpha_{3,2}}{1 - \alpha_{12,1}})S(x_4)V(x_4, x_2)E(x_2) \\ k_{4,4} &= -S(x_5)V(x_5, x_4)E(x_4) \\ k_{5,4} &= S(x_5)V(x_5, x_4)E(x_4) \\ k_{5,5} &= -S(s_3)V(s_3, x_5)E(x_5) \\ k_{5,12} &= BU_2(t)\beta_{5,12}\alpha_{5,12}S(x_5)V(x_5, x_{12})E(x_{12}) \\ k_{6,6} &= -\beta_{8,6}(1 - \alpha_{12,6})S(x_8)V(x_8, x_6)E(x_6) - AU_1(t)\alpha_{12,6}S(x_{12})V(x_{12}, x_6)E(x_6) \\ k_{6,7} &= \beta_{6,7}S(x_6)V(x_6, x_7)E(x_7) \\ k_{7,7} &= -\beta_{6,7}S(x_6)V(x_6, x_7)E(x_7) \\ k_{8,6} &= \beta_{8,6}(1 - \alpha_{12,6})S(x_8)V(x_8, x_6)E(x_6) \\ k_{8,8} &= -\frac{\beta_{9,8}\alpha_{9,8}S(x_9)V(x_9, x_8)E(x_8)}{1 - \alpha_{12,6}} - \beta_{10,8}(1 - \frac{\alpha_{9,8}}{1 - \alpha_{12,6}})S(x_{10})V(x_{10}, x_8)E(x_8) \\ k_{9,8} &= \frac{\beta_{9,8}\alpha_{9,8}S(x_9)V(x_9, x_8)E(x_8)}{1 - \alpha_{12,6}} \\ k_{9,9} &= -\beta_{06,9}S(s_6)V(s_6, x_9)E(x_9) \\ k_{10,8} &= \beta_{10,8}(1 - \frac{\alpha_{9,8}}{1 - \alpha_{12,6}})S(x_{10})V(x_{10}, x_8)E(x_8) \\ k_{10,10} &= -S(x_{11})V(x_{11}, x_{10})E(x_{10}) \\ k_{11,10} &= S(x_{11})V(x_{11}, x_{10})E(x_{10}) \\ k_{11,11} &= -S(s_7)V(s_7, x_{11})E(x_{11}) \\ k_{11,12} &= BU_1(t)\beta_{11,12}\alpha_{11,12}S(x_{11})V(x_{11}, x_{12})E(x_{12}) \\ k_{12,1} &= AU_2(t)\alpha_{12,1}S(x_{12})V(x_{12}, x_1)E(x_1) \\ k_{12,6} &= AU_1(t)\alpha_{12,6}S(x_{12})V(x_{12}, x_6)E(x_6) \\ k_{12,12} &= -BU_2(t)\beta_{5,12}\alpha_{5,12}S(x_5)V(x_5, x_{12})E(x_{12}) \\ &\quad - BU_1(t)\beta_{11,12}\alpha_{11,12}S(x_{11})V(x_{11}, x_{12})E(x_{12}) \end{aligned} \quad (2)$$

Az optimalás érdekében ennek során, a hálózat több részhálózatán egymástól függetlenül is megváltozhat az irány. Ez a hálózati folyamatok (pl. forgalomsűrűség) optimális irányításánál egy új elvű irányításra ad lehetőséget, amely a hálózati gráf struktúrájának dinamikus változtatásával történik. A modellben, ahogy a valóságban is, a szóban forgó geometriai elemek természetesen nem szűnnek meg, de új funkciójuk és kapcsolatrendszerük következtében egy variábilis hálózatot alkotnak.

Megállapítható, hogy kétféle kapcsolati forma létezik (**2. ábra**):

- Állandó geometriai kapcsolat: ez esetben a geometriai kapcsolat minden forgalmi irányváltozásnál megmarad, az átadás iránya az, ami megváltozhat.
- Irányhoz fűződő kapcsolat: ez esetben a geometriai kapcsolat a forgalmi iránytól függ.



2. ábra Két forgalmi irány és a kapcsolati mátrix

A kapcsolati mátrix sok információt tartalmaz. Jelen esetben két dolgot kell kiemelni: megmutatja, hogy van-e kapcsolat i és j elemek között és azt, hogy milyen irányú ez az átadás.

- A kapcsolati mátrixban minden olyan kapcsolat változatlan marad, amelyet nem érint az irányváltoztatás.
- Az irányváltoztatás által érintett kapcsolatoknál az 1. és 2. irányokhoz fűződő kapcsolatok egymást kizárják.
- Állandó geometriai kapcsolat esetén a főátlóra tükröződik a kapcsolat az irányváltozás következtében.
- A csak egy irányhoz fűződő kapcsolat esetén nincs tükrözés. Csak az egyik irányban jelenik meg ez a kapcsolat.
- Végül a biztonságos működés miatt nagyon fontos, hogy nem egy időben történik a kapcsolatváltás a kapcsolati mátrixban. Egy irány esetén is két lépésben történik a kapcsolatok bontása. Pl., 1. irány ese-

tén, először az összes bemeneten szűnik meg a kapcsolat, azonban minden belső kapcsolat és minden kimeneteli kapcsolat még mindaddig működik, amíg teljesen ki nem ürül ez a részhálózat.

A hálózatot leíró matematikai modellem pozitív nemlineáris dinamikus rendszer, a modell lényegét tekintve makroszkopikus modell. Egy mintahálózaton a forgalom-sűrűségtől függően, vizsgáltam az új elvű optimális irányítás lehetőségét, amely a hálózati gráf struktúrájának dinamikus változtatásával történik.

2. Tézis

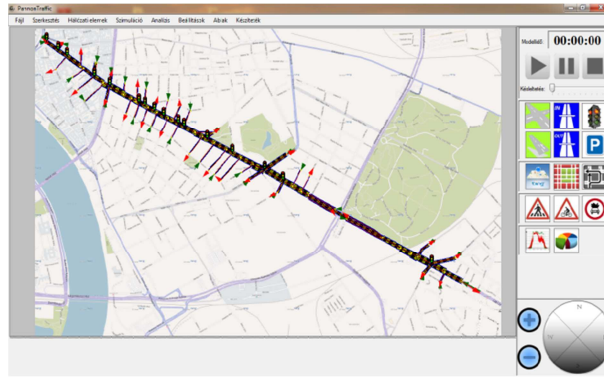
Változtatható irányú forgalmi sávok – mint részrendszerek – analízise és javaslat egy megvalósításra.

Új közúti modellt konstruáltam nagyszámú közlekedési lámpával ellátott, összetett csomópontokból álló forgalmi rend leírására és irányítására a változtatható menetirányú sávok bevezetésének lehetőségével. Új specifikált irányítási módszert dolgoztam ki a balra kanyarodó sávok problémájának megoldására, illetve a forgalmi folyamatok irányítási hatékonyságának növelésére. Az így kidolgozott modellt sikeresen alkalmaztam az Üllői út Ecseri út – Kálvin tér közötti 16 közlekedési lámpával ellátott, 40 csomópontból álló szakaszra és javaslatot tettem a forgalmi rendjének változtatható irányú sáv bevezetésével történő módosítására. A teljes rendszer szimulációjával igazoltam a konkrét lámpa beállítási adatok mellett a javasolt modell hatékonyságát. Ugyancsak megállapíthattam, hogy a kapott eredmények összhangban vannak azokkal a forgalmi értékekkel, amelyeket a gyakorlatban megvalósított változtatható irányú forgalmi sávokkal működő közúti közlekedési rendszereken végzett mérések alapján más kutatók kaptak és publikáltak [PB; 2003], [Golub; 2012].

[Bede, et. al.; 2010/2], [Bede, Péter; 2011/1], [Bede, Péter; 2011/2],

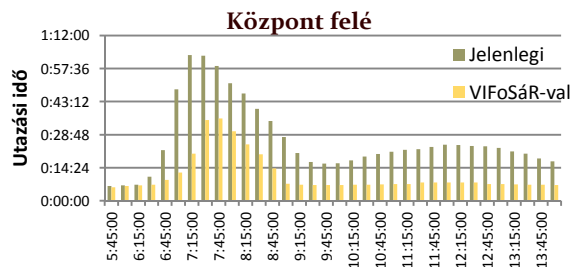
[Bede, Péter; 2011/3], [Bede, Péter; 2011/4], [Bede, Péter; 2012/1],

[Bede, Péter; 2012/2], [Bede, Péter; 2013], [Péter, Bede; 2010]

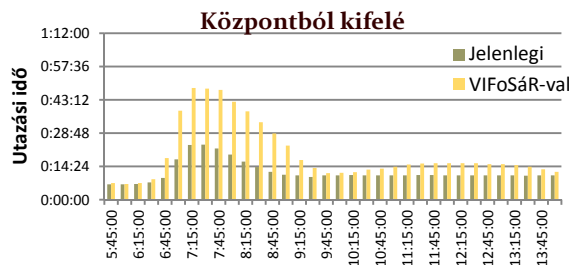


3. ábra A modell felvétele

Modell felvétele térképre történt, ahogy a 3. ábrán is látható, így a szakaszok hosszát a valóságnak megfelelően méretarányosan adtam meg. Először az eredeti állapotoknak megfelelően futtattam a szimulációt, majd az egyik irányba (központból kifelé) egy sáv irányítását a délelőtti órákban megfordítottam. A kétféle szimulációval vizsgált eredmények láthatók a 4. és 5. ábrákon.



4. ábra Átlagos utazási idő a központ felé haladó sávokon különböző indulási időkben



5. ábra Átlagos utazási idő a központból kifelé haladó sávokon különböző indulási időkben

Az alábbi megállapítást tehetjük: ha a reggeli csúcsidőben a befelé haladókat plusz egy sávval segítjük, akkor az eljutási idő a legtöbb esetben több mint 60%-kal, átlagban a felére csökken, míg az ellenkező irányban, ha elveszünk egy sávot, akkor is ott legfeljebb 30%-kal nő az eljutási idő. Mivel a forgalom-szimulációs program alkalmas egyedi folyamatok kinyerésére is, ezért a továbbiakban alkalmazható az optimális útvonalak keresésére is, az egyéni igények figyelembe vételével.

3. Tézis

A hálózati rendszereket leíró modellből kinyert adatok összevetése járműdinamikai paraméterekkel, és az összevetés alapján a modell validálása.

A kidolgozott forgalmi rendszermodell alapján, statisztikai rendszeridentifikációval kimutattam, hogy a jármű-mérések alapján validált modell lehetővé teszi a valóságnak megfelelő egyedi sebesség és motorteljesítmény adatok azonosíthatóságát. Az egy időben szimulált és GPS készülékkel hálózati útvonalon mért nagy tömegű sztochasztikus idősor realizációk alapján, nemparaméteres statisztikai analízis segítségével homogenitás vizsgálat elvégzését követően megállapítottam, hogy mindkét esetben a két-két minta igen magas (legalább 95%-os) szinten homogénnek tekinthető.

[Bede, Péter; 2009/3], [Bede, Péter; 2010/1], [Bede, Péter; 2010/2]

Vizsgáltam a nagyméretű hálózaton áthaladó egyedi járművek mozgását leíró sebesség, illetve gyorsulási folyamatokat. A valós forgalmat figyelembe vevő sebességprofil a forgalmat reprezentáló makroszkopikus hálózati modellből nyertem ki. A modellel, a teljes hálózatra vonatkozó forgalomváltozást adtam meg. A modellből eredő egyedi mozgási folyamatot összevettem a valóságos, mért sebesség- és gyorsulás-folyamatokkal és motor-teljesítmény adatokkal. Elvégeztem az általam használt modell validálását, a belőle kinyert egyedi sebesség és gyorsulási folyamatok alapján.

A mért és szimulált sebességeloszlásokat nemparaméteres statisztikai analízissel vettem össze. A számítások megnyugtatóan igazolták a modellezési vizsgálataim szimulációs eredményeit. A sebesség adatokból az adott jármű teljesítmény igényét is kiszámítottam, amely értékekből szintén nemparaméteres statisztikai analízissel megállapítható volt, hogy műszaki szempontokból elhanyagolható az eltérés a valóságos körülmények között mért, GPS készülékből származtatott értékek felhasználásával számított, valamint a modellünk által számított értékek között: tehát a teljesítményigény az adott sebességprofilból számítható.

A nemparaméteres statisztikai próba homogenitás vizsgálatra irányult. A próba lényegében χ^2 -próba, valószínűségi változók homogenitás vizsgálatára. Az a kérdés, hogy két valószínűségi változó (a GPS készülékkel mért és a forgalmi modell által szimulált értékek) azonos eloszlásúnak tekinthető-e? Vagyis, hogy két minta azonos sokaságból származik-e? A közösnek feltételezett eloszlásfüggvény maga nem szerepel a próbában, az nem is ismert. A vizsgálatnál felosztjuk a két valószínűségi változót tartalmazó intervallumot r -részre. Az i -ik intervallumban ($i=1,2, \dots, r$), egyikből v_p másikkból μ_i db. van, ahol $\Sigma v_p = N$, és $\Sigma \mu_i = M$.

Homogén minta és $N \rightarrow \infty$ és $M \rightarrow \infty$ esetén χ^2 , $r-1$ paraméterű χ^2 -eloszlást követ.

$$Eqv := \chi^2 = NM \left(\sum_{k=1}^r \frac{\left(\frac{v_k}{N} - \frac{u_k}{M} \right)^2}{v_k + u_k} \right) \quad (3)$$

4. Tézis

A modellből kinyert adatok és a járműdinamikai paraméterek összevetése alapján a modell finomítása.

Statisztikus rendszeridentifikáció alkalmazással kimutattam, hogy a makroszkopikus szimulációból származtatott sebességprofilok esetén számított gyorsulás-profiloknál lokálisan, azaz egy-egy időpont kis környezetében felléphet kiugróan „irreális” gyorsulás illetve lassulás érték. Heurisztikus statisztikus szempontok alapján szűrést végeztem, és ez alapján újra számítottam a sebességprofilokat és a gyorsulásprofilokat. Kimutattam, hogy a sebességprofiloknál jelentéktelen a szűrés után a korrigált és az eredeti értékek közötti eltérés. Ez alapján megállapítottam, hogy a statisztikus szűrés fontos a forgalomban haladó egyedi járművek dinamikai vizsgálatánál, viszont a szűrés hatása elhanyagolható a makroszkopikus forgalmi modell által vizsgált statisztikus folyamatoknál. Ezen eredményeim elősegíthetik a bonyolult forgalmi folyamatok hatékonyabb és megbízhatóbb modellezését.

[Bede, Péter; 2010/1], [Bede, Péter; 2010/3], [Bede, Péter; 2011/2]

Ezért szűrést végeztem, és ennek megfelelően újra számítottam a sebességprofilokat és a gyorsulásprofilokat. Azt tapasztaltam, hogy a sebességprofiloknál jelentéktelen a szűrés után a korrigált és az eredeti értékek közötti eltérés, (0,46 % teljes időtartamra; 5,68 % a kritikus helyeken számított eltérés). A problémát városi forgalomban a forgalomirányító jelzőlámpa működtetése és az Euler-módszert alkalmazó diszkrét szimulációs módszer idézte elő. Levonható a következtetés, hogy a szűrés hatása jelentéktelen a makroszkopikus forgalmi modell által vizsgált statisztikus folyamatokra (pl. sebesség).

A modellből egyedi járművek számára kinyert optimális útvonalaknál (optimális trajektóriáknál) azonban a számított sebesség-, illetve gyorsulásprofiloknál figyelembe kell venni azt, hogy még eseti jelleggel sem léphetnek fel irreális gyorsulás, illetve lassulás értékek! Tehát a szűrés a mikroszkopikus modellekre történő áttérésnél fontos!

A most felismert jelenség egy érdekes új problémára mutatott rá a makroszkopikus forgalmi modellekkel kapcsolatban. Ennek a jelenségnek a kiküszöbölése a modell fejlesztését eredményezte, amelyet jelen esetben úgy valósítottunk meg, hogy a fejlesztett modell minden időpillanatban vizsgálja a gyorsulás értékeket is, és ha ezek közül bármelyik a megengedett tartományon kívülre esik, akkor automatikusan a megengedett tartományra korlátozza a kiugró gyorsulás, illetve lassulás értéket és a modell az ennek megfelelő sebesség függvényt végzi el a számításokat.

5. Tézis

Környezetterhelés vizsgálata

Új módszert dolgoztam ki a sebességprofillal történő környezetszennyezési hatások vizsgálatára. Kimutattam, hogy a szabályos menetciklusokkal ellentétben, a modelltől kinyert sebességprofillal pontosabb, a valóságnak jobban megfelelő emissziós értékeket kaphatunk. Ezzel az úgynevezett környezetterheléses módszerrel korrelációs vizsgálatot végeztem a szimulációból nyert értékek és a valódi forgalomban mért értékek sztochasztikus kapcsolatának elemzésére. Ez alapján megmutattam, hogy a városi forgalom esetén a fogyasztás és a fajlagos megállás között szoros korreláció állapítható meg mind a mért, mind a szimulált értékeknél. Ugyancsak szoros korreláció állapítható meg helyközi menetnél a fogyasztás és fajlagos állásidő között. Ezen eredményeim módszertani alapot biztosítanak a hatékonyabb és megbízhatóbb forgalomtervezési eljárások megalkotására.

[Bede, et. al.; 2011], [Bede, Trencsényi; 2012]

A fenntartható felszíni közlekedés elérésének kiemelt célja a környezetre káros anyagok kibocsátásának csökkentése, melyet két módon érhetünk el. Egyrészt az egyedi járművek gyártása során használt környezettudatos módszerekkel, másfelől a járművek megfelelő forgalomtechnikai eszközökkel történő irányításával. E kétféle megközelítést egy összetett modellben lehet vizsgálni, amelynek részei az egyedi járművek viselkedését leíró modellek, magát a közlekedési hálózat működését meghatározó modellek, és az ezek közötti kapcsolatok. A kutatás egyik célja, hogy számba vegyük a jármű fogyasztását befolyásoló tényezőket, és megbecsüljük azok jelentőségét is. A fogyasztás mértéke fajlagosan mindig valamilyen időintervallumban, ill. az abban megtett útra viszonyítva értelmezhető. Az, hogy adott idő alatt mekkora utat sikerül megtenni, illetve fordítva: az adott útszakasz megtételéhez mennyi időre van szükség – a KRESZ szabályozás mellett –, a forgalom és az időjárás is korlátozza. Így a vizsgálatunkban elsődleges szerepe van a forgalmi jellemzőknek.

A forgalmat a klasszikus definíciók szerint alapvetően 3 változóval írják le, melyek közül a forgalom sűrűség [$jármű/km$] és a forgalom nagyság [$jármű/h$] csak a forgalomban részt vevő járművek számának ismeretében adható meg. A forgalom egy adott résztvevőjének szempontjából ez nem hozzáférhető adat. A harmadik jellemző az átlagsebesség [km/h], amit a forgalom jellemzésekor az egyedi járműsebességek és az adott járműszám alapján értelmeznek. Megadható ugyanakkor bármely időszakban a hálózat két tetszőleges pontja között a vizsgálat tárgyát képező adott jármű sebességprofilja is.

Ennek megfelelően, meghatározott időszakban a valós forgalomban mért sebességprofilokat vizsgáltam, amelyekhez hozzárendeltem a mérés során kinyert fogyasztásértékeket is. Továbbá a nagyméretű közlekedési hálózaton a forgalmi szimulációból kinyert sebességprofilokkal futtattam az Advisor jármű modellt. A programból fogyasztásértékeket nyertem ki, melyeket a szimulációval nyert sebességprofilokhoz rendeltem. Kimutattam, hogy a mért és szimulációval nyert sebességprofilok esetében a fogyasztást a fajlagos megállásszám illetve a fajlagos állásidő egyaránt befolyásolja, de városi forgalom esetén mindkét esetben a fogyasztás a fajlagos megállásszámmal erősebben korrelál. A szimulációból elkülönítettem a kora hajnali és a késő esti indulási időponttal rendelkező sebességprofilokat, melyek gyér forgalomban történt menetek. Ez a forgalom jellemző a lakott területen kívül mért forgalomra is, ezért ezeknek a sebességprofiloknak a vizsgált tulajdonságai a lakott területen kívül mértekkel egyeznek. Megvizsgáltam és kimutattam, hogy a lakott területen kívül a mért és szimulációval nyert sebességprofilok esetében szoros korreláció állapítható meg a fogyasztás és fajlagos állásidő között.

4. Az eredmények alkalmazása és a jövőbeni kutatási irányok

A változtatható irányú forgalmi rendszerek gyakorlati bevezetése során felmerülnek olyan speciális problémák, amelyek az irányváltatásból adódnak. A rendszer biztonsági vizsgálatánál a legnagyobb hangsúlyt a váltás teljes körű előkészítésére, illetve lebonyolítására kell fektetni. Ehhez kitűnően és nagy biztonsággal működő mérő, kiértékelő és beavatkozó eszközök, és egyértelmű jelzéseket adó információs berendezések szükségesek a járművezetők részére. A modellezésből származó rendszerterv elkészítésekor külön vizsgálni kell ezeket, továbbá a rendszer automatikus blokkolásának feltételeit is. A gyakorlati megvalósítás során minden esetben biztosítani kell, hogy a sáv ürítése valóban megtörténjen, mielőtt szabaddá tesszük azt az ellenkező irány számára.

A felhasznált irodalomban talákoztunk működő változtatható irányú forgalmi rendszerekkel, illetve azokkal kapcsolatban végzett esettanulmányokkal, így a szí-

mulált modell eredményeit össze lehet vetni valós adatokkal és igazolható a szimulációs módszer létjogosultsága. Ebből következik, hogy a most bemutatott modellezési, szimulációs és mérési technika alkalmas és felhasználható további tervezési feladatok elvégzésére a változtatható irányú forgalmi rendszerek kialakításánál.

A közlekedési hálózatot leíró modelltől a további vizsgálatokhoz szükséges, az egyedi járművekre vonatkozó jellemzőket lehetett kinyerni. Ezeket fel lehetett használni forgalom szimulációhoz, illetve járműmodelleknél is, bemenő paraméterként. A kétféle modell összekapcsolása újabb lehetőségeket kínált a további kutatóknál, ily módon fogyasztás, zaj, illetve különböző komplex környezetterhelési vizsgálatok is elvégezhetők.

A környezettudatos járműfejlesztés során a gyártók igyekeznek a járművek emisszióját tovább csökkenteni. Ma már nem csak azon károsanyagok kibocsátásának redukálása a cél, amelyek közvetlenül károsítják az élővilágot, hanem a klímaváltozást okozó üvegházgáz, azaz a CO_2 csökkentése is alapvető fontosságú. Ezen mikroszkopikus emisszió csökkentési stratégiák mellett egyre fontosabb napjainkban a makroszkopikus emisszió redukálása is. Ilyen például a közlekedési hálózatok emisszió alapú optimalítása, amely egy új hatékony és komplex megoldás a forgalom emisszió-alapú irányítására. A városok forgalomirányítása korábban többnyire nyílt láncú szabályozás volt, azaz a forgalmi jelzőlámpák működése egy előre beállított algoritmus szerint működött. Ma már egyre több helyen alkalmaznak zárt láncú forgalomszabályozást, amikor a különböző csomópontokban elhelyezett detektorok információit feldolgozva úgy szabályozzák a jelzőlámpák működését, hogy ezzel optimálisan szabályozzák a járműfolyamot. Videó alapú rendszer használata esetén, ha az elhaladó járművek kategóriáit is azonosítani lehet, akkor a szabályozást a forgalom emissziója alapján is el lehet végezni.

Az ilyen jellegű szabályozási rendszerek tervezéséhez szükség van az ismertett nagy hatékonyságú forgalmi szimulációs modellre, amely szintén izgalmas további kutatási területet jelent a jövőben.

A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk

- Bede, Péter; 2009/3 Péter T. – Bede Zs.: Egyedi sebességfolyamatok kinyerése, nagyméretű városi úthálózatok modellezése során, *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2009)*. Budapest, Magyarország, 2009.09.03-2009.09.05, 2009
- Bede, Péter; 2010/1 Bede Zs. – Péter T.: Nagyméretű közlekedési hálózati modell továbbfejlesztése, *Városi közlekedés, L. évfolyam 4. szám 236-238 p.* 2010. augusztus
- Bede, Péter; 2010/2 Bede Zs., Péter T.: The extraction of unique velocity processes from a macro model, *Periodica Polytechnica -Transportation engineering 38:(1) pp. 105 - 111*, 2010
- Bede, Péter; 2010/3 Bede Zs., Péter T.: Egyedi gyorsulásértékek figyelembe vétele a közúti közlekedési hálózatok makro modellezésénél, *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2010)*. Budapest, Magyarország, 2010.09.02-2010.09.04 (ISBN: 978-963-88875-1-1), 2010
- Bede, et. al.; 2010/2 Bede Zs., Péter T. – Stróbl A. – Fazekas S.: A változtatható irányú forgalmi sávok alkalmazása a városi közlekedésirányításban. (Egy hálózati analízis.), *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2010)*. Budapest, Magyarország, 2010.09.02-2010.09.04 (ISBN: 978-963-88875-1-1), 2010
- Péter, Bede; 2010 Péter T., Bede Zs.: A változtatható irányú forgalmi sávokkal működő közúti közlekedési rendszer matematikai modellezése, *Közlekedéstudományi Szemle, LX. évfolyam 3. szám 46-56 p.* 2010. június
- Bede, et. al.; 2011 Bede Zs., Szabó B., Trencsényi B.: Környezetterhelés vizsgálata a forgalmi viszonyok változásának függvényében, *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2011)*. Budapest, Magyarország, 2011.08.29-2011.08.31 pp.132-140 Paper 22. (ISBN: 978-963-88875-3-5) 2011
- Bede, Péter; 2011/1 Bede Zs., Péter T.: The mathematical modeling of Reversible Lane System, *Periodica Polytechnica-Transportation engineering 39:(1) pp. 1-6*, 2011
- Bede, Péter; 2011/2 Bede Zs., Péter T.: The development of large traffic network model, *Periodica Polytechnica-Transportation engineering 39:(1) pp. 7-14*, 2011
- Bede, Péter; 2011/3 Bede Zs., Péter T.: Optimal Control in Reversible Lane System Modelling *9th European Workshop Advanced Control and Diagnosis, Budapest, Hungary, 17-18 November, Paper 61 pp. 1 - 4* 2011

- Bede, Péter; 2011/4* Bede Zs., Péter T.: Változtatható irányú forgalmi sáv modellezése, nagyméretű hálózatokon *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2011)*. Budapest, Magyarország, 2011.08.29-2011.08.31 pp. 88 – 93, Paper 15. (ISBN: 978-963-88875-3-5) 2011
- Péter, Fülep, Bede; 2011* Péter T., Fülep T., Bede Zs.: 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, Valencia, Spain, 13-16 June, Paper E44 pp. 1 - 11* 2011
- Bede, Péter; 2012/1* Bede Zs., Péter T.: Egy budapesti modell, a változtatható irányú forgalmi sávok kialakítására, nagyméretű közlekedési hálózatokon *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2012)*. Budapest, Magyarország, 2012.08.29-2012.08.31 pp. 91-95, Paper 14. (ISBN: 978-963-88875-3-5) 2012
- Bede, Péter; 2012/2* Bede Zs., Péter T.: The analysis of Reversible Lanes Systems on large road traffic network *Proceedings of the TVL-1 - First Workshop on Transport, Vehicle and Logistics (organized by the PhD Schools of the Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, BME, Budapest, 2012, paper No. KJK2012-1-K3, pp. 1 – 8 (ISBN 978-963-313-062-9), 2012*
- Bede, Trencsényi; 2012* Bede Zs., Trencsényi B.: A közúti járművek károsanyag-kibocsátásának modellezése, *Közlekedéstudományi Szemle LXII. évfolyam 3. szám pp. 17-24* 2012
- Bede, Péter; 2013* Bede Zs., Péter T.: Optimal control with the dynamic change of the structure of the road network, *Transport 2013, megjelenés alatt*

A tézisfüzetben hivatkozott irodalom

- Bokor, Gáspár; 2008* Bokor J., Gáspár P.: Irányítástechnika járműdinamikai alkalmazásokkal, *könyv*, 288 p. 2008
- Bokor, Palkovics; 1994* Bokor J., Palkovics L.: Modern control theory applied to vehicle dynamics, *VSDLA '94, Proceedings of the 4th mini conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies, Budapest, 1994 pp. 74-87*, 1994
- Fehérkönyv; 2012* Fehér könyv, Útítv az egységes európai közlekedési térség megvalósításához – Úton egy versenyképes és erőforrás-hatékony közlekedési rendszer felé, *Brüsszel, 2011.3.28. COM(2011) 144*, 2011
- Fisher; 2010* J. E. Fisher: Transportation Topics and Tales: Milestones in Transportation History in Southern California, *Manuscript*. 2010 (http://www.ladot.lacity.org/about_history.htm)
- Golub; 2012* Golub, A.: Perceived Costs and Benefits of Reversible Lanes in Phoenix, Arizona, *ITE JOURNAL / february 2012, pp. 38-42*, 2012
- Kövesné; 2003* Kövesné G. É.: A globalizáció hatása a városi közlekedési rendszer fejlesztésére, *Városi Közlekedés XLII. évf. 2.sz. 2003. április p. 61-66*, 2003
- Kövesné, Debreczeni; 2003* Kövesné G. 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.*, 2003
- Papageorgiou, et al.; 2003* Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos A., and Wang Y.: Review of Road Traffic Control Strategies *Proceedings of The IEEE Vol. 91, No. 12, December 2003*
- Papageorgiou; 1998* Papageorgiou, M.: Some Remarks on Macroscopic Traffic Flow Modelling, *Transportation Research A 32(5), pp.323-329*, 1998
- Peter, Basset; 2009* T. Peter, M. Basset: Application of new traffic models for determine optimal trajectories, *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), pp.89-94*, 2009
- Péter, Bokor; 2006* Péter T., Bokor J.: Járműforgalmi rendszerek modellezése és irányításának kutatása, *A jövő járműve*, 2006/1–2

- Péter, Bokor; 2007 Péter T., Bokor J.: Nagyméretű közúti közlekedési hálózatok nemlineáris modelljének kapcsolati hipermátrixa, *A jövő járműve*, 2007/1–2
- Péter, Bokor; 2010 T. Peter, J. Bokor: Modeling road traffic networks for control, *Annual International Conference on Network Technologies & Communications NTC 2010 29 - 30 November 2010, Phuket Beach Resort, (Thailand)*, pp. 18-22. Paper Code: 21. 2010
- Péter, Bokor; 2011 T. Peter, J. Bokor: New road traffic networks models for control, *GSTF International Journal on Computig, Volume 1, Number 2*, pp. 227-232. DOI: 10.5176_2010-2283_1.2.65, February 2011
- Péter; 2008/1 Péter T.: Szoftverfejlesztés a BME –en: Nagyméretű közúti közlekedési hálózatok analizisére és tervezésére. *Budapest, 2008. Magyar Mérnökakadémia: Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés Konferencia IFFK 2008*
- Péter; 2008/2 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*, 2008/3–4, 2008
- Péter; 2009 Péter T.: Járműforgalmi rendszerek modellezése és irányítása, célok, kutatási területek és eredmények. *A jövő járműve, IV:(1-2)* 59-78 2009
- Péter; 2012 Peter, T.: 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, 2012
- Tánczos, Bokor; 2003 Tánczos Lné, Bokor Z.: A közlekedés társadalmi költségei és azok általános és közlekedési módtól függő hazai sajátosságai, *Közlekedéstudományi Szemle*, 2003/8, p. 281-291, 2003
- Tarnai, Ságbi; 2006 Tarnai G., Ságbi B.: A biztonsági követelmények kockázati alapú meghatározása *Vezetékek Világa XI. évf. 1 szám 2006 március* pp. 3-7 2006
- Várlaki, et al.; 2008 Várlaki P., Nádai L., Bokor J.: Number archetypes and 'background' control theory concerning the fine structure constant, *Acta Polytechnica Hungarica vol. no.: 5, Issue no.: 2*, pp. 71-104, 2008
- Wolshon, Lambert; 2006 B. Wolshon, L. Lambert: Reversible lane systems: Synthesis of practice, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 132, pp. 933–944, December 2006.