

Modell- és validálás, nagyméretű nemlineáris közúti közlekedési hálózatok analíziséhez. Győr – Szent István út és környezetének szimulációs modellje.

Fazekas Sándor, Péter Tamás, Bede Zsuzsanna

Széchenyi István Egyetem Járműipari Kutató Központ
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

Abstract: Az anyag a nagyméretű közúti közlekedési hálózatok forgalmi folyamatainak analízisére kifejlesztett új elvű dinamikus modellt vizsgálja, valós körülmények figyelembevételével. A modell validálása, a mért keresztmetszeti forgalmi adatok és a forgalomban részt vevő GPS készülékkel felszerelt gépjárművek sebességmérésével nyert adatok figyelembe vételével történik.

Kulcsszavak: új közlekedési hálózati modell, validálás, nemlineáris közúti közlekedési hálózatok analízise, szimulációs modell.

1. BEVEZETÉS

A modell Győr város forgalmi modellezése során lett felvéve. A szimuláció a PannonTraffic alkalmazásával történt, amely szoftvercsalád, nagyméretű közúti közlekedési hálózatok komplex modellezésére, analízisére kifejlesztett eszköz. Ezt a pozitív rendszerek Luenberger (1979), osztályába tartozó makroszkopikus közúti közlekedési modell alapján végzi. A tervezés, szimuláció, analízis a PannonTraffic Engineer szoftverrel történik, míg a PannonTraffic Visualization igen látványos 3D-s környezetben képes megjeleníteni a PannonTraffic Engineer által szimulált eredményeket, Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.1), S. Fazekas, T. Peter: (2012), Fazekas Sándor, Péter Tamás (2012.2), Fazekas, S., Péter T. (2013)

2. AZ ALKALMAZOTT DINAMIKUS HÁLÓZATI MODELL

A tárgyalt hálózati modell az u.n. szűkített modellek körébe tartozik, Péter, T. (2012.1), Péter, T., Szabó, K. (2012) és Péter Tamás (2012.2). Ekkor egy tetszőleges G zárt görbe által körülkerített belső hálózatot vizsgálunk. A belső hálózat n szektorból áll, ezek állapotjellemzői az x_1, x_2, \dots, x_n , járműsűrűségek, amelyeket számít a modell. A G perem mentén azok az s_1, s_2, \dots, s_m , sűrűségű külső (input és output) szektorok vannak, amelyek közvetlen kapcsolatokkal rendelkeznek valamely belső szektorral és ez utóbbiak állapotát mérés alapján ismertnek tekintjük. A modellünkben $0 \leq x_i(t) \leq 1$ és $0 \leq s_j(t) \leq 1$ normált járműsűrűség állapotjellemzőket használunk ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$). Ez alkalmazható a parkolók esetében is, mivel a parkolók is általánosított szakaszok a modellben.

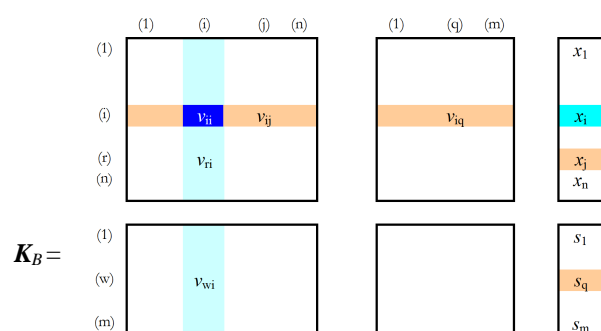
Ennél a modellnél a kapcsolati hipermatrixot alkotó mátrixok közül, csak a K_{11} és K_{12} mátrixok játszanak szerepet, mert általuk képviselve van minden átadás, amely a belső szektorokra vonatkozik. A modellünk differenciálegyenlet-rendszere az alábbi:

$$\dot{x} = \langle L \rangle^{-1} [K_{11}(x,s) x + K_{12}(x,s) s] \quad (2.1)$$

Ahol: $x \in \mathfrak{R}^n$, $\dot{x} \in \mathfrak{R}^n$, $s \in \mathfrak{R}^m$, $L = \text{diag}\{l_1, \dots, l_n\}$, 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 kapcsolati hipermatrix foglalja egy rendszerbe. A kapcsolati hipermatrix egyrészt megadja bármely szektor esetében, hogy milyen más szektorokkal áll átadási kapcsolatban, másrészt a kapcsolati mátrixot tartalmazó (2.1) differenciálegyenlet-rendszer írja le a hálózat minden szektorának a működését, az-az a teljes hálózat működését.

A belső tartomány kapcsolatainál minden típusú kapcsolat fellép, kivéve a külső-külső kapcsolatokat. A belső szektor működését tehát, három kapcsolati mátrix: $K_{11} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $K_{12} \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ és $K_{21} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ írja le, amelyekből épül fel, a $K_B \in \mathfrak{R}^{(n+m) \times (n+m)}$ kapcsolati hipermatrix:



2.1. ábra: i -ik belső szektor kapcsolatai mátrixai

A járműsűrűség meghatározása az i -ik belső szektorban, a fenti (2.1) folytonos modell alapján történik a következő módon:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{l_i} \left[\sum_{j=1; (j \neq i)}^n v_{ij} \cdot x_j(t) + \sum_{q=1}^m v_{iq} \cdot s_q(t) - \left(\sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} + \sum_{w=1}^m v_{wi} \right) x_i(t) \right] \quad (2.2)$$

Ahol:

$$\begin{aligned} v_{ij} &= S(x_i(t)) \cdot V(x_i(t), x_j(t), \underline{e}_i, \underline{e}_j) \cdot E(x_j(t)) \cdot \alpha_{ij}(x(t), t) \cdot \beta_{ij}(x(t), t) \cdot \gamma_{ij}(x(t), t) \cdot u_{ij}(t) \\ v_{iq} &= S(x_i(t)) \cdot V(x_i(t), s_q(t), \underline{e}_i, \underline{e}_q) \cdot E(s_q(t)) \cdot \alpha_{iq}(x(t), t) \cdot \beta_{iq}(x(t), t) \cdot \gamma_{iq}(x(t), t) \cdot u_{iq}(t) \\ v_{ri} &= S(x_r(t)) \cdot V(x_r(t), x_i(t), \underline{e}_r, \underline{e}_i) \cdot E(x_i(t)) \cdot \alpha_{ri}(x(t), t) \cdot \beta_{ri}(x(t), t) \cdot \gamma_{ri}(x(t), t) \cdot u_{ri}(t) \\ v_{wi} &= S(s_w(t)) \cdot V(s_w(t), x_i(t), \underline{e}_w, \underline{e}_i) \cdot E(x_i(t)) \cdot \alpha_{wi}(x(t), t) \cdot \beta_{wi}(x(t), t) \cdot \gamma_{wi}(x(t), t) \cdot u_{wi}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

az alábbi összefüggések teljesülése mellett:

$$\begin{aligned} \sum_{r=1; (r \neq i)}^n \alpha_{ri} + \sum_{w=1}^m \alpha_{wi} &= 1 \\ v_{ii} &= - \left[\sum_{r=1; (r \neq i)}^n v_{ri} + \sum_{w=1}^m v_{wi} \right] \end{aligned}$$

A kapcsolati mátrix v_{ij} kapcsolati függvényénél figyelembe kell venni minden, a forgalmi rend kialakításánál meghatározott, különböző módon szabályozott kapcsolati jellemzőt pl. jelzőlámpát $u_{ij}(t)$ függvénnyel, lámpa nélküli útszakaszok kapcsolatát, parkoló és útszakaszok kapcsolatát, párhuzamos útszakaszok kapcsolatát stb. Ezen kívül, figyelembe kell venni azt is, hogy a forgalomnál fellépnek belső szabályozási automatizmusokat is! A modell, a járműsűrűségtől függő belső szabályozásokat veszi figyelembe az $S(x_i(t))$ és $E(x_j(t))$ függvényekkel. Tehát, a szakaszok állapotjellemzőitől, pillanatnyi kapcsolatuktól és környezeti jellemzőktől függ a v_{ij} átadási sebesség függvény. Látható, hogy v_{ij} -t valóban sok tényező határozza meg, az alábbi módon:

Az $S(x)$ automatikus belső önszabályozási függvény elméletben 1 vagy 0 értékeket vesz fel. Kapcsolat engedélyezése történik, ha egy felvevő szakasz x sűrűsége kisebb, mint 1, egyébként tiltása.

$$S(x) = \begin{cases} 0 & 1 \leq x \\ 1 & x < 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

Az $E(x)$ automatikus belső önszabályozási függvény elméletben 1 vagy 0 értékeket vesz fel. Kapcsolat tiltása történik, ha egy átadó szakasz x sűrűsége kisebb, vagy egyenlő, mint 0, egyébként engedélyezése.

$$E(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 & 0 < x \end{cases} \quad (2.5)$$

Ezek biztosítják a modellben azt, hogy nem veszünk el járművet onnan ahol nincs (sűrűség nem lép negatív

tartományba) és nem adunk át oda, ahol a sűrűség már elérte az 1-et.

A modellben, a valós reakciókéssélem időt is figyelembe véve, x -szerint folytonosan differenciálható $S(x)$ valamint $E(x)$ függvényeket alkalmazunk.

A $V_{ij}(x_i(t), x_j(t), \underline{e}_i, \underline{e}_j)$, röviden V_{ij} a j -ik szakaszcól i -ik szakaszra történő áthaladás sebessége, amely a modellben a csatlakozó szakaszok sűrűségeit és $\underline{e}_i, \underline{e}_j$ környezeti paramétervektorokat figyelembe vevő függvény.

A kapcsolatknál felléphet külön-külön is $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij}, u_{ij}(t)$, függvény, vagy ha pl. egyszerre van jelen elosztás és zavarás, (vagy rásegítés) és forgalmi lámpa is, akkor az előbbieket szorzata is, pl.: $\alpha_{ij} \beta_{ij}$ ill., $\beta_{ij} \gamma_{ij} u_{ij}(t)$.

A kapcsolatot jellemző függvények az alábbi jelentéssel bírnak:

- Ha a j -ik szakasz több i szakaszra dolgozik, akkor az egyes i szakaszoknál $0 < \alpha_{ij} < 1$ elosztási arányt (rátát) alkalmazunk, a hipermátrix j - oszlopában $\sum_{ij} \alpha_{ij} = 1$ teljesül. (Mivel j dolgozhat külső szakaszokra is.)
- Ha a kapcsolatot zavarják, pl. keresztező járművek, gyalogosok vagy baleset, akkor β_{ij} zavarási tényező $0 < \beta_{ij} < 1$ értéket vesz fel.
- Ha a kapcsolatot segítik, pl. másik irányt keresztező járművek vagy rendőr, akkor β_{ij} rásegítési tényező $1 < \beta_{ij}$ értéket vesz fel.
- Ha egyszerre van jelen elosztás és zavarás, (vagy rásegítés) akkor $\alpha_{ij} \beta_{ij}$ szorzat lép fel.
- Az α_{ij} és β_{ij} rövid időtartamra általában konstans értékek. α_{ij} általános esetben időtől függő $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(t)$, vagy időtől és állapottól függő $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}(\underline{x}(t), t)$ függvény. β_{ij} általános esetben szintén időtől függő $\beta_{ij} = \beta_{ij}(t)$, vagy időtől és állapottól függ $\beta_{ij} = \beta_{ij}(\underline{x}(t), t)$.
- A parkoló és útszakasz, valamint párhuzamos sávok kapcsolatát $\gamma_{ij} = \gamma_{ij}(t)$, intenzitás függvénnyel adjuk meg, $0 \leq \gamma_{ij}(t)$.

- $0 \leq u_{ij}(t) \leq 1$ kapcsolási függvény, az egyes szakaszok átadásánál működő forgalmi lámpák hatását veszi figyelembe. Elméletben az értéke az 1 vagy 0 értékeket veszi fel a lámpa állapota szerint. A modellben, a valós reakciókészségelem időt is figyelembe véve, t -szerint folytonosan differenciálható lámpa függvényeket alkalmazunk.

A tárgyalt modellt alkalmazzuk nagyméretű közúti közlekedési hálózatok modellezésére – pl. **Győr Város Forgalmi Modell** - amelynél folyamatban van a közlekedési rendszerek szabályozásának vizsgálata is, Tamas Peter, Jozsef Bokor and Andras Strobl (2013) és Zsuzsanna Bede, Tamás Péter and Ferenc Szauter (2013).

További folyamatban lévő közös kutatásunk univerzális közúti hálózati modellt épít fel és IDM modellt alkalmazó járműcsoportok optimális áthaladását határozza meg, Oussama Derbel, Tamás Péter, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion and Michel Basset (2012) és Oussama Derbel, Peter Tamas, Hossni Zebiri, Benjamin Mourllion and Michel Basset (2013).

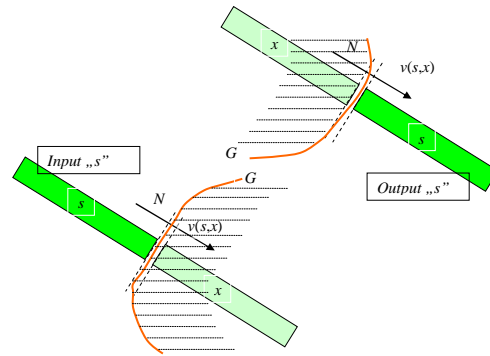
Ez utóbbi esetben a feladat kettős irányítást igényel, egyrészt a nagyméretű hálózat adott tartományának irányítását, másrészt az IDM modell-csoportba tartozó járművek irányítását. Gyakorlati szempontból az irányítás többkritériumú, kiterjed a városi forgalom, a környezeti terhelések és a konvojban mozgó járművek optimális trajektórián történő célba juttatására is.

3. A DINAMIKUS HÁLÓZATI MODELL PEREMSÚRÚSÁGEINEK SZÁMÍTÁSA

Tegyük fel, hogy egy peremen, amely lehet input vagy output egy adott időtartamra megmértük a keresztmetszeti forgalmat.

Jelölje N az 1 óra időtartamra mért átbocsájtott egységjármű számot. Jelölje a peremen átáramló járművek fenti időtartamra vonatkozó várható sűrűségét s és a várható sebességét v . Természetesen, ha rövidebb időtartamokra is rendelkezésre áll átbocsájtott egységjármű szám, akkor erre vonatkoztatott várható sűrűségeket és várható sebességeket is tudunk számolni és időben még jobban kidomborítható a folyamat dinamikája.

A v (amelynek dimenziója [m/sec]) a pontos dinamikus modellnél kétváltozós függvény, mivel értéke a vizsgált keresztmetszet előtti és utáni szakasz sűrűségétől is függ: $v=v(s,x)$, 3.1.ábra.



3.1. ábra a G görbe által körülkerített tartomány, valamint az inputok és outputok kapcsolata

A kezdetben, kiinduláskor nincs információ az x belső sűrűségről, ezt a dinamikus modell fogja pontosan kiszámítani, ezért azt a közelítést alkalmazzuk, hogy $x \approx s$, tehát v csupán az s -től függ. Lényegében úgy járunk el, hogy egy összevont szakaszként kezeljük a két szakaszt, közös s sűrűséggel.

A 3.1. ábrán látható, hogy az inputok esetében (bal alsó ábra rész) a G görbe által körülkerített sraffozott tartomány bemenetein mérünk keresztmetszeti forgalmat és külső-belső egyesítés történik. Az outputok esetében pedig (jobb felső ábra rész) a G görbe által körülkerített sraffozott tartomány kimenetein mérünk keresztmetszeti forgalmat és belső-külső egyesítés történik.

Használjuk fel a továbbiakban, hogy a keresztmetszeti forgalomszámlálási adatok 15 perces lépésközönként adják meg, a következő egy órára vonatkozó N [Ej/óra] keresztmetszeti forgalmi adatokat. Tehát a N értékből kiszámítható az 1 sec alatt átadott egységjármű száma, amelyet jelöljön n :

$$n = \frac{N}{3600} [Ej / sec] \quad (3.1)$$

Jelölje h [m] az egységjármű hosszát.

A dinamikai egyenleteknél alkalmazott (2.1, 2.2 és 2.3) alapösszefüggések figyelembe vételével kiszámítható a Δt idő alatt, szabadáramlás mellett átadott Δl [m] járműhossz:

$$S \cdot E \cdot \alpha \cdot \beta \cdot s \cdot v \cdot u \cdot \Delta t = \Delta l \quad (3.2)$$

Szabadáramlásnál: $S=1$, $E=1$, $u=1$ és mivel jelen esetben nem történik disztribúció ezért $\alpha =1$, továbbá jelenleg nem tételezünk fel akadályozást, vagy rásegítést ezért $\beta=1$ (ennek módosítása, majd a modell validálásakor történik) továbbá, időegység alatt történő átadást vizsgálunk, ezért $\Delta t=1$ sec. Ily módon (3.2) egyenlet az 1 sec időegység alatt átadott l [m] járműhosszat adja meg:

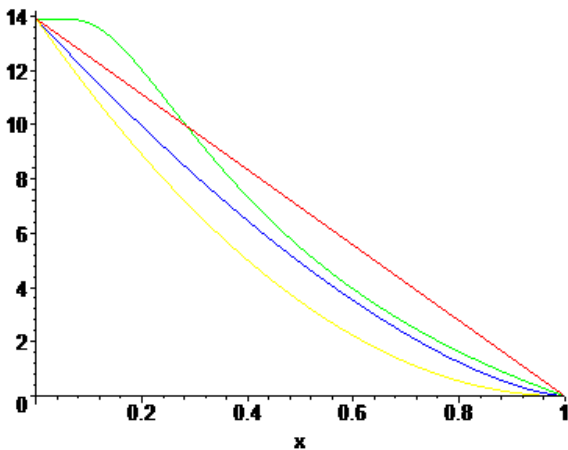
$$s \cdot v = l \quad (3.3)$$

Viszont: $n = \frac{l}{h}$, szintén az 1 sec időegység alatt átadott járműszámot adja meg, tehát l ismert a forgalommérésből:

$$l = n \cdot h \quad (3.4)$$

$v = v(s)$ sebesség-sűrűség függvény felhasználásával (3.3) és (3.4) alapján az s járműsűrűség meghatározható.

A sebesség-sűrűség kapcsolatának leírására az irodalom számos függvénytípust ajánl fel, pl. Greenshields (1935) (lineáris), vagy a Greenberg (1959) (logaritmikus) forma. További néhány függvénytípust ismertet Kövesné Gilicze É. és Debreczeni G. (2003). Ezek a függvények mérésekből adódó sztochasztikus kapcsolatok, amelyekben szereplő V_{Max} , és további konstansok regressziós módszerek eredményeként származtatott értékek. Egy szakaszon a korábban bevezetett x változó jelöli a járműsűrűséget és $v(x)$ a szakaszon haladó járművek x értéktől függő várható átlagsebességét. Különböző sebesség – sűrűség függvények görbéi láthatók a 3.2. ábrán.



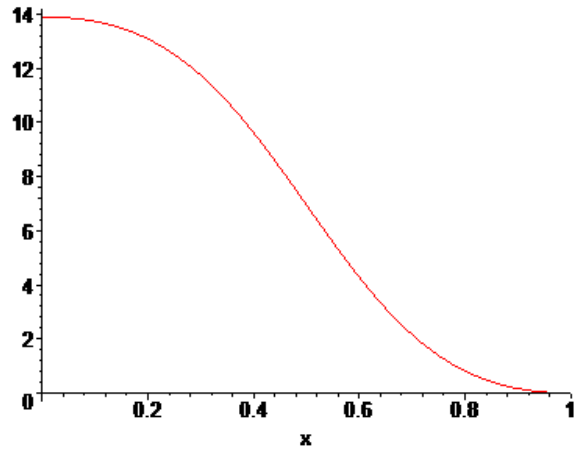
3.2. ábra: $v(x)$ [m/s] járműsebesség az x járműsűrűség függvénye

A klasszikus irodalom nem foglalkozik a környezeti vektor megadásával egy szakaszon. A V_{Max} , illetve a függvény lefutásának változtatása, megfelelő környezeti paraméterezéssel további tényezők vizsgálatát is lehetővé teszi, így pl. időjárást, látási viszonyokat, út minőségét, út szélességét is. Tehát, a sebességet nem csak az x járműsűrűség determinálja, hanem a kapcsolati mátrixban fent említett, e környezeti paramétervektorral figyelembe vett különböző környezeti, szezonális, stb. tényezők is: $V=v(x, \mathbf{e})$. Az alábbiakban röviden tekintsünk egy, a gyakorlatban jól alkalmazható és általunk felírt $V=v(x, \mathbf{e})$ függvényt:

$$v(x, \mathbf{e}) = \frac{e_4 \cdot V_{Max}}{e_3 + e_2 \cdot \left(\frac{x}{1 - x^{e_5}} \right)^{e_1}} \quad (3.5)$$

Ebben az esetben az \mathbf{e} paramétervektor 5 paramétert tartalmaz:

$$\mathbf{e} = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5]$$



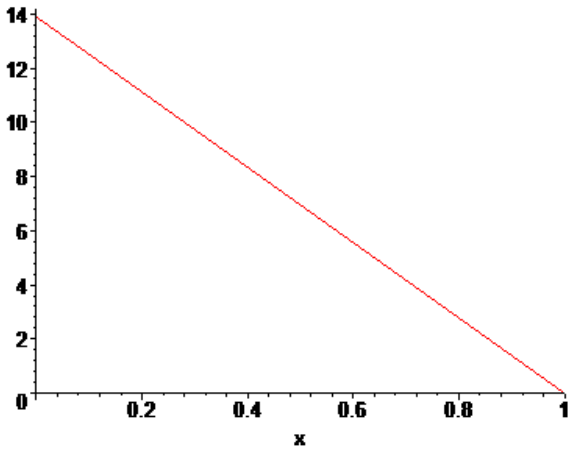
3.3. ábra: $v(x)$ sebesség - sűrűség függvény $e_1=2$; $e_2=1$; $e_3=1$; $e_4=1$; $e_5=1$ paraméterek mellett

Az alábbi táblázat az egyes paraméterek lehetséges tartományánál a kedvezőtlen és kedvező paramétertartományt mutatja be. A két diszjunkt tartomány között helyezkedik el a közbenső tartomány, amelyben a leggyakrabban fordul elő az adott paraméter. A tartományok adatai tapasztalati értékeknek tekintendők. Adott, konkrét esetben a sebesség - sűrűség mérést követően regresszió analízissel történik az $\mathbf{e} = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5]$ paramétervektor koordinátáinak meghatározása.

e_i	Paraméter jelentése	Kedvezőtlen esetknél	Kedvező esetknél
e_1	Út minőség	Rossz: $e_1=0.1 - 0.3$	Jó: $e_1=3 - 4$
e_2	Kanyargós út	Sok kanyar: $e_2=3 - 4$	Kevés kanyar: $e_2=0.1-0.2$
e_3	Csúszós út	Rossz, csúszós: $e_3=1.2 - 4$	Nincs csúszás: $e_3<1$
e_4	Biztonságérzet, látási viszonyok	Rossz: $e_4=0.5 - 0.7$	Jó: $e_4>1$
e_5	Út szélessége	Keskeny: $e_5=0.1 - 0.2$	Széles: $e_5>4$

3.1. Táblázat: \mathbf{e} paramétervektor koordinátáinak bemutatására

A most bevezetett $V=v(x, \mathbf{e})$ függvény fontos tulajdonsága, hogy ha minden paraméter értéke 1, akkor a függvény speciális esetként a Greenshields féle lineáris függvényt adja meg 3.4 ábra. Ez az eredmény jól szemlélteti azt is, hogy a Greenshields féle lineáris függvény a közbenső paraméter-tartomány adatait veszi fel és így valóban egy átlagos $v(x)$ sebesség - sűrűség függvénykapcsolatot szolgáltat a gyakorlatban!



3.4. ábra $v(x)$ függvény, a $e_1=1; e_2=1; e_3=1; e_4=1; e_5=1$ paraméterek mellett

Tehát, több sebességtörvény is létezik, jelen esetben (3.3) megoldásához alkalmazzuk az átlagos lineáris törvényt:

$$v(s) = V_{Max}(1 - s)$$

amelynél V_{Max} a megengedett maximális sebesség:

$$s \cdot V_{Max}(1 - s) = l \quad (3.6)$$

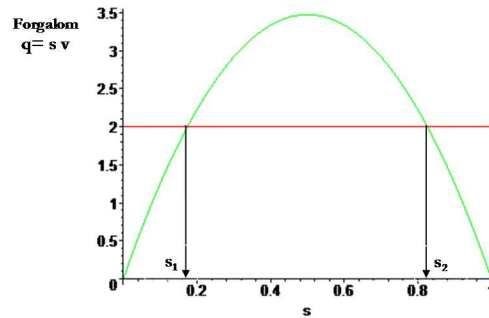
Két sűrűségérték léphet fel: A közlekedési folyamatnál mért n , h és V_{Max} jellemző paraméterekkel az alábbi eredményt kapjuk a sűrűség állapotjellemzőre:

$$s_{1,2} = 0.5 \pm \sqrt{0.25 - \frac{n \cdot h}{V_{Max}}} \quad (3.7)$$

Nem meglepő, hogy két lehetséges járműsűrűség állapotjellemzőt kapunk, kivéve ha:

$$\frac{n \cdot h}{V_{Max}} = 0.25 \quad (3.8)$$

A keresztmetszeti forgalom nem tekinthető állapotjellemzőnek! Ugyanakkora időtartam alatt átbocsájtott járműszám felléphet kis járműsűrűség és nagy sebesség szorzataként, vagy nagy járműsűrűség és kis sebesség szorzataként is, lásd 3.5. ábra.



3.5.

3.5. ábra az $s \cdot v(s)$ forgalom függvény és egy konstans forgalom érték

Annak eldöntése, hogy melyik a várható járműsűrűség állapotjellemző, az adott keresztmetszeten átáramló forgalom várható sebességének meghatározása is szükséges. Ebből a célból, a keresztmetszeti forgalomméréseket vagy kamerás mérésekkel célszerű végre hajtani, vagy a leszámlálás módszert ki kell egészíteni, a forgalomban részt vevő fedélzeti GPS készülékkel felszerelt gépjárművekkel végre hajtott sebesség mérésekkel is.

Összefoglalva, az alábbi eljárást követjük

1. A kezdeti s (input/output) járműsűrűség várható értékének meghatározásához, összevonjuk a peremeknél egymáshoz csatlakozó külső és belső szakaszt. Ezt az együttes szakaszt vizsgáljuk a csatlakozási pontban, amely egyúttal a forgalomszámlálás helye is. Az ezen a ponton (keresztmetszeten) átáramló várható járműsűrűséget jelöli s .
2. A forgalomszámlálásból származó adatokat átszámítjuk 1 sec-ra (3.1).
3. Szabadáramlást feltételére $S=1, E=1, u=1, \alpha=1, \beta=1, \Delta t=1$ mellett felírjuk az átadott járműhossza vonatkozó (3.3) egyenletet, ily módon szintén az 1 sec-ra vonatkozó átadott járműhosszat kapjuk.
4. Megválasztjuk a sebesség-sűrűség függvényt, ez esetünkben lineáris, (de adott esetben lehet más függvény is).
5. Esetünkben megoldjuk a (3.6) egyenletet, amely a (3.7) megoldást szolgáltatja.
6. A 3.5. ábra bemutatta, hogy valamely meghatározott időintervallumban mért keresztmetszeti forgalmi mérések önmagukban nem adnak egyértelmű értékeket a hálózati szakaszoknál, a várható állapotjellemzőkre, az ott fellépő várható járműsűrűségekre, (vagy ezzel egyenértékű, várható járműsebesség értékekre). A speciális, maximális forgalom esetétől eltekintve, mindig két várható sűrűség állapotjellemző lehetséges s_1 és s_2 . Hogy melyik lép fel a valóságban, az külön mérést igényel. Ennek eldöntésére alkalmaztuk, a forgalomszámlálással egy időben a GPS készülékkel felszerelt járművekkel végzett forgalomsebesség méréseket is az adott szakaszokon.
7. Ezt követően, minden inputon és outputon elvégezve a fenti számításokat beállítjuk a peremeken a várható járműsűrűség

értékeket. A modell által elvégzett szimuláció egy tranzienst követően bemutatja a teljes belső hálózaton a járműsűrűségek és sebességek időbeni alakulását.

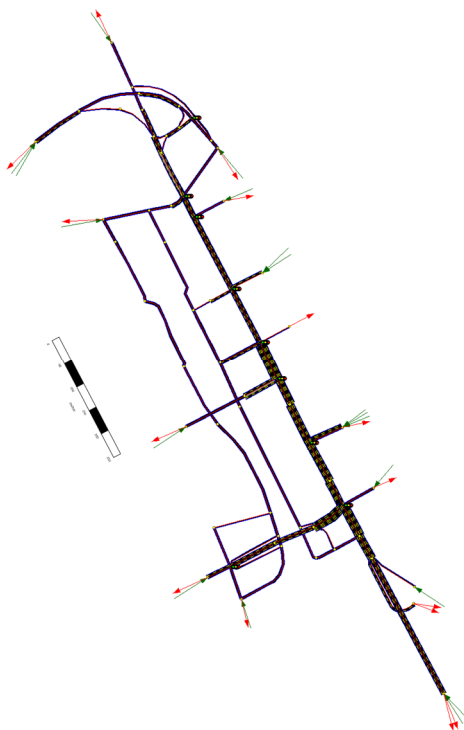
8. A validálást ezt követően az α_{ij} , β_{ij} , paraméterek optimális beállításával végezzük el. Ez egyrészt, a mért és szimulált perem- és belső forgalmi adatok eltéréseinek minimalálásával, másrészt a szakaszokon mért és számított sebesség értékek eltéréseinek minimalálásával történik.

4. GYŐR – SZENT ISTVÁN ÚT ÉS KÖRNYÉKÉNEK KÖZLEKEDÉSI SZIMULÁCIÓS MODELLJE

A modellünk, mint említettük az egyik legnagyobb forgalmat lebonyolító út, a Szent István út (1. sz. főút) és környéke területét foglalja magában. Ez a forgalmi modell fontos szerepet játszik a környezetterhelések vizsgálatának szempontjából is, Stróbl András, Péter Tamás, Fazekas Sándor (2012), Stróbl, A., Péter, T. (2013).

A hálózati modell felépítésével kapcsolatban, modellezett hálózat törzsét a Szent István út képezi, amelyhez kapcsolódóan néhány jelentősebb útszakasz és csomópont modellezését végeztük el. A modell inputszakaszai és outputszakaszai (amelyekről a modellbe beáramló, és amelyekre az azt elhagyó forgalom áramlik) az északi területen egy utca szakasznyi hosszúságúak, míg a déli oldalon a Révai Miklós utca és Eszperantó út képezik a modellezett terület határát.

Az alábbi 4.1. ábrán látható a hálózati modellünk képe, amelyet a PannonTraffic szoftverből másoltunk ki.



4.1. ábra a modellezett hálózat törzsét a Szent István út képezi

4.1 Adatok és mérések

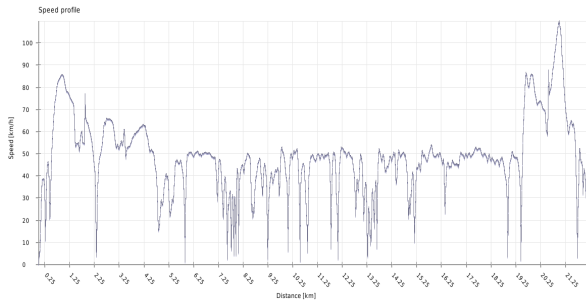
A hálózatot jellemző fő adatok:

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

<u>Inputok: 13 pontnál 18 sávot figyelembe véve</u>	<u>Output: 13 pontnál 15 sávot figyelembe véve</u>
Benczur u., 821. u. 2 db. sáv	Benczur u., 821. u.,
Béke híd,	Béke híd,
Újlak u.,	Újlak u.,
Munkácsi M. u.	Munkácsi M u.,
Jókai u. 2. db. sáv	Aradi Vértanúk u.,
Baross Gábor Híd,	Baross Gábor Híd,
Teleki László u. 3 db. sáv	Teleki László u.,
Gárdonyi G.,	Gárdonyi G.
Tihanyi Árpád u.,	Tihanyi Árpád u.,
Mészáros Lőrinc u.,	Mészáros Lőrinc u.,
Körforgalomból bevezető út.	Kivezető jobbra 2 db. sáv
Bissinger József Híd 2 db. sáv	Bissinger József Híd 2 db. sáv

4.1. Táblázat: Inputok és Outputok bemutatására

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 készülékekkel végzett forgalomsebesség mérések. A GPS-es mérések adatfájlljai tárolásra kerültek az adatbázisban. További feldolgozás eredményeként a GPS koordináták alapján a rendszerünk a megfelelő útszakaszokhoz hozzárendelte a vizsgált időszakra vonatkozó egyedi jellemző sebességfüggvényeket is. Ilyen mérési eredménye látható pl. a 4.2. ábrán, amely magában foglalja a városba történő be- és kihajtás mellett, a Szent István úton mért sebesség értékeket is.



4.2. ábra: Az útvonalon mért jellemző sebesség értékek, a szakaszhelyek függvényében

A hálózati modellezést a PannonTraffic Engineer szoftverrel végeztük, melyben a hálózati elemek felvétele során már méretarányosan kerülnek tárolásra az egyes útszakaszok hosszai, geometriájuk, Péter, T., Stróbl, A., Bede, Zs., Kalincsak, I., Fazekas, S. (2013).

5 JELZŐLÁMPÁK FÁZISTERVEI

A forgalmat irányító jelzőlámpák fázisterveit a Magyar Közút Zrt. Győri Igazgatósága és Győr város Önkormányzata bocsátotta a rendelkezésünkre, melyeket az eredeti dokumentáció scannelt formájában kaptunk kézhez. Az egyes lámpaprogramokat ezen oknál fogva kézi adatrögzítéssel tudtuk felvinni a rendszerbe, amely meglehetősen időigényes folyamat (egyes csomópontokban akár 10-nél is több forgalmi irány került definiálásra, amelyeket modell szinten akár 12-15 kapcsolati elemen is el kell végezni). A modellben felvett jelzőlámpák közül egy forgalomfüggő vezérlésű egység van (Benczúr utca), de mivel annak működőképességéről nincsen információ, így a hurokdetektorok meghibásodásának esetére tervezett fix jelzéstervet vettük most fel. Összegezve, az alábbi 9 csomópontokban működő jelzőlámpák fázisterveinek eredeti dokumentációja alapján működnek a szoftverben is a felvett fázistervek:

- Tihanyi Árpád út – Csaba utca
- Tihanyi Árpád út – Szent István út (Gárdonyi Géza utca – Nádor aluljáró)
- Teleki László utca – Szent István út
- Baross Gábor út – Szent István út (Baross Gábor Híd)
- Aradi Vértanúk útja – Szent István út (Városház tér)
- Jókai utca – Szent István út
- Munkácsy Mihály utca – Szent István út
- Újlak utca – Szent István út
- Benczúr utca – 821. sz. út találkozása

A jelzőlámpák tárgyalása kapcsán megemlíjtük a fázistervek által szabott forgalmi korlátozó jelleget. Megállapítottuk, hogy egyes irányokban (jellemzően balra nagy ívben kanyarodó) a zöld jelzés idejének néhány másodpercesre tervezett hossza a forgalomszámlálások során megállapított egységjárműszámot képtelen áteresztetni a csúcsórai forgalomban, míg az

ugyanabból a sávból jobbra kanyarodó járműveknek biztosított zöld idő kihasználatlan maradt (egyes csomópontokban külön forrás sávokra értendő a helyzet).

6 INPUT ÉS OUTPUT SZAKASZOK $B(T)$ FÜGGVÉNYEI, ÁLLAPOTFÜGGVÉNYEI

Az input szakaszokon felvettük a keresztmetszetre számított forgalomnagyságnak megfelelő becsült járműsűrűség függvényeket. A járműsűrűség a matematikai modellnek megfelelő módon került definiálásra: az útszakaszon haladó járművek összes hosszának és a szakasz hosszának hányadosát jelenti, amely $[0,1]$ zárt intervallumon vehet fel értéket és dimenzió nélküli mérőszám (m/m). Ezt a járműsűrűség függvényt alapul véve végzi a forgalomkeltést a modell Δt beállított időközönként számítva. A forgalommérések és szimulációs eredmények összevetése abban nyilvánul meg, hogy a forgalomszámlálások során negyedórás intervallumokban mért egységjármű számok összegét a modellezésből, a minden időpillanatban rendelkezésre álló járműsűrűség értékekből kell előállítani. A modellezés során figyelembe kell venni azt a valós helyzetet is, hogy az inputon beállított járműsűrűsége túl, a célszakasz járműsűrűségétől is függ a Δt időközönként az input szakaszról a hozzá kapcsolódó belső útszakaszra átadott járműhossz értéke, továbbá az „egységjármű” átlagos hossza sem egy egzakt mennyiség (utóbbi a járműsűrűségből történő egységjárműre átszámításhoz szükséges). Kezdeti feltételként a célszakaszon 0 járműsűrűség értéket feltételezve számítjuk ki a Δt időközönként átadandó járműmennyiséget, amely negyedórás intervallumra extrapolálva a forgalomszámlálás során mért értékkel kell megegyezzen. A szimuláció előrehaladtával az inputszakaszhoz kapcsolódó belső útszakaszon a járműsűrűség nyilvánvalóan 0-tól különböző értéket vesz fel, melynek eredményeképpen az átadott járműhossz módosul a számíthatóhoz képest. Mivel modellezésünk során a csúcsórai (7:15-8:15) forgalomnagyságot modellezzük, azaz konstans járműsűrűség függvényeket veszünk fel, végül a szimuláció során beálló stabil állapot szerint kell a két szakasz között értelmezett β függvény értékét finomhangolni a validálás során.

Jelen hálózati modellünkben az α_{ij} értékeinek beállítása jellemzően MIMO rendszer szerint történt, melyben a csomóponti forgalomszámlálások egyes forgalmi irányainak értékeit vizsgáltuk az elosztási függvény szempontjából. A módszer alkalmazásával kiküszöbölhető a MIMO rendszernek fent említett határozatlansága, és validálható lesz a modellünk ennek megfelelően.

Mivel az inputokon konstans járműsűrűségeket vettünk fel, így élhetünk azzal az egyszerűsítéssel, hogy az $\alpha(t)$ függvényeket is állandó értékűnek vesszük fel. Ezen függvények értékét validáláskor felül kell vizsgálni a szimuláció során a belső hálózat elemein kialakuló járműsűrűség függvények értékeinek változása miatt. Az $\alpha(t)$ függvények változása a kiinduló állapothoz képest a jelzőlámpák által irányított csomópontokban különösen nagy lehet azokban az esetekben, amikor a közös forrásszakaszról induló járművek eltérő

célszakaszai irányában szignifikánsan eltér az alkalmazott szabad jelzés időtartama.

Parkolóhelyek felvételét és modellezését jelen vizsgálatban mellőztük, mert a modellezni kívánt Szent István úton egyáltalán nincs, a környező utcákban található parkolóok forgalmát pedig az input szakaszokon belépő forgalomban figyelembe vesszük, így ennél a speciális hálózathoz nincsen jelentőségük.

7. A HÁLÓZATI PARAMÉTEREK VALIDÁLÁSÁNAK ELŐKÉSZÍTÉSE

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:

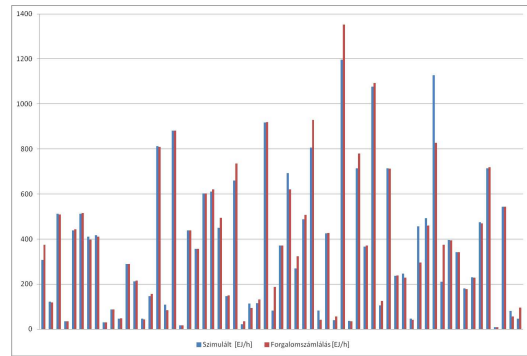
$$r_{x,y}=0.9925070033$$

amely a gyakorlatban már 100%-os korrelációnak tekinthető. A szoftvert képessé tettük arra, hogy a beállított egységjármű hosszának megfelelően negyedórás, ill. órás átlag forgalomnagyságot tudjon exportálni a szimuláció során számított járműsűrűség adatsorokból. A kidolgozott eljárás az egyik alapfeltétele annak, hogy a validálást elvégezhesük a modell paraméterein.

A következőkben a hálózati modellből a szimuláció során kinyert forgalomnagyságok és a hivatalos forgalomszámlálások eredményeit vetettük össze *7.1. ábra*. Megjegyezzük itt, hogy egyes helyeken a forgalomszámlálás által egy irányban vett és egyetlen értékkel jellemzett forgalomnagyság a modellünkben több értékszegmensben realizálódik, ugyanis egy forgalmi irányt több sávkapcsolatban lehet megvalósítani. Ezeket az értékeket szummázva vettük figyelembe az összehasonlíthatóság érdekében.

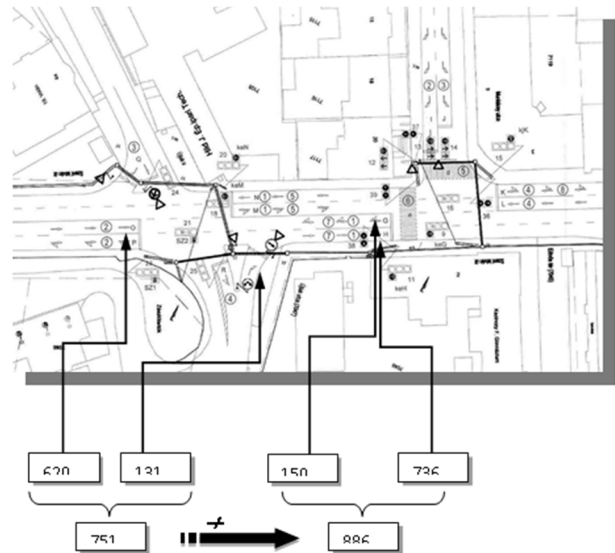
A szimuláció a vizsgált időszakra (7: 15 - 8: 15) vonatkozóan 6 másodperc alatt futott le. A szimuláció 24h-s időtartamra vonatkozó futtatási ideje 2 perc 14 másodperc.

A szimuláció futásakor megfigyelhető, hogy a legelső esetben, mintegy 13-17 perc transziens 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.



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

A validálás során tehát, a város által rendelkezésünkre álló forgalomszámlálási adatokra támaszkodtunk. Az adatokat minden esetben a hétköznap 7:15-8:15 közötti időtartamra összegzett forgalomnagyság tekintetében vizsgáltuk. A forgalomszámlálási adatokra vonatkozóan meg kellett állapítani viszont, hogy már ezeknél önmagukban is helyenként, szignifikáns inkonzisztencia mutatkozott.



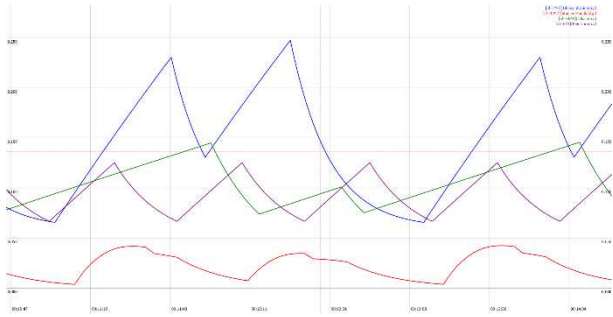
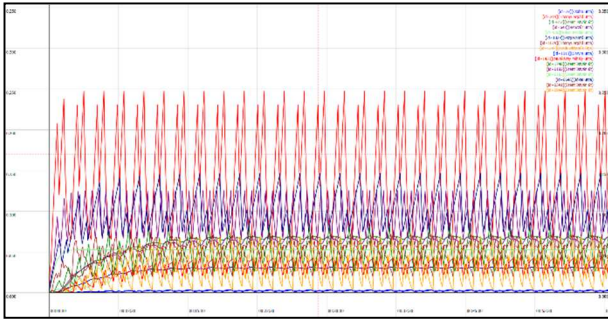
7.2. ábra: Szignifikáns mérési hibák a forgalomszámlálásban

A fenti ábrán egy szemléltetés látható az említett eltérésekből; a Szent István út Újlaki úttal illetve Munkácsy utcával történő kereszteződése területén láthatóak a forgalmi irányok, kiegészítve azokat a fent rögzített időintervallumra megállapított forgalomnagyságokkal. **Jól látható, hogy az Újlaki kereszteződéstől a Munkácsy utca kereszteződéséig nincsen egyéb befonódó forgalom, illetve a két csomópont középpontjának távolsága 74 m, azaz meglehetősen közel vannak egymáshoz. Ezen körülmények ellenére mintegy 15%-os eltérés tapasztalható az egymáshoz közvetlenül kapcsolódó forgalomszámlálási adatok között ugyanazon időszakban.**

Ha tekintetbe vesszük azt, hogy a forgalomszámláló biztosok feltehetően kézi adatrögzítéssel végezték a számlálást, illetve elképzelhető – bár nem helyes –, hogy eltérő napokon történt

az egyes csomópontok forgalomszámlálása, akkor a folyamat sztochasztikusságát figyelembe véve elképzelhetőek ekkora eltérések. A probléma az, hogy a szoftverben ezek a hibák nyilvánvalóan nem jelentkeznek, ezért a forgalomszámlálási adatokhoz képest szignifikáns eltérések tapasztalhatók helyenként. Ezt igyekeztünk kiküszöbölni a forgalomszámlálási adatokkal nem rendelkező útszakaszokra történő korrigálással.

A következőkben néhány útszakasz szimuláció során keletkezett járműsűrűség-idő függvényét mutatjuk be a teljesség igénye nélkül.



7.3. ábra: Járműsűrűség-idő függvények a részletesen modellezett hálózat kiválasztott szakaszain

8. KONKLÚZIÓ

A fejezetben a nagyméretű közúti közlekedési hálózati folyamatok matematikai modellezését vizsgáltuk tetszőleges zárt görbe által körülhatárolt tartományon. A modell az adott tartományra szűkített hálózati modell, amely a pozitív nemlineáris rendszerek osztályába tartozik. A modellezésére a PannonTraffic szuper szimulációs eszközt alkalmaztuk. A bemutatott modell Győr város közlekedési hálózatának egy fontos résztartománya, amely a Szent István utat foglalja magában. A mért keresztmetszeti forgalmi adatok negyedórás bontásban álltak rendelkezésre. Ennek szükségszerű figyelembe vétele negyedóránként stabil járműsűrűség peremfeltételeket teremtett. Ily módon a vizsgált tartományon és bármely résztartományon óránként négyszer szükségszerűen megfigyelhető volt a Lyapunov stabilitás is. A validálást követően a mért és modell alapján számított, óránkénti keresztmetszeti forgalom közötti korrelációs együttható $r_{xy}=0.9925070033$ értéket adott, amely a gyakorlatban már 100%-os korrelációnak tekinthető.

Új eredmény: A peremeken mért forgalmi adatok és a forgalomban mért sebességadatok alapján felírt dinamikus

forgalmi modellre validálási módszert dolgoztunk ki, amely kiterjedt a peremek forgalmi adatain kívül a belső keresztmetszeteken mér forgalmi adatokra is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

IRODALOMJEGYZÉK

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.

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

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

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

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

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

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) 008

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, T., Szabó, K. (2012) A new network model for the analysis of air traffic networks. In: Peridoica Polytechnica-Transportation Engineering 40/1 (2012) 39–44. doi: 10.3311/pp.tr.2012-1.07 web: <http://www.pp.bme.hu/tr> ISSN 1587-3811 (online version); ISSN 0303-7800 (paper version)

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., Kalincsa, 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/>

Stróbl András, Péter Tamás, Fazekas Sándor (2012) Stratégiai zajtérkép készítése makroszkopikus közúti közlekedési modellt alkalmazó szoftverrel, Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia (IFFK-2012). Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2012.08.29-2012.08.31. Budapest: Óbudai Egyetem, Paper 11. pp. 71-75. (ISBN:978-963-88875-3-5) <http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/>

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 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/>