

## A variábilis hálózatok leírása és gyakorlati alkalmazások

Dr. Bede Zsuzsanna, Dr. Péter Tamás

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

Kivonat: Cél az állapotfüggő irányítás lehetséges alkalmazásának kutatása a változtatható irányú forgalmi sávok rendszereknél. Irányonként jelentősen eltérő forgalmak (délelőtt a város központja felé, ill. délután kifelé haladó forgalmak) irányítására megoldás lehet a változtatható irányú forgalmi sávok rendszere, ahol az egyes sávok irányítása az igényeknek megfelelően, azaz forgalomfüggően változnak. Ezen rendszer modellezése is már egy érdekes kérdést vet fel, mivel az irányítás változtatásával magát a modellt is strukturálisan változtatni kell. A váltást követően az irányváltó sáv és egyes útszakaszok között a kapcsolat megszűnik, míg más útszakaszok között pedig új keletkezik, így ezeket a kapcsolatokat csak egymást kizáróan lehet a modellben figyelembe venni. A modell alkalmas több sávot is figyelembe venni, ahol a sávok ily módon egymással is kapcsolatban állhatnak. Magát a változtatható irányú sávok rendszert létjogosultságát egy győri (Szent István út) példával szemléltetjük. Egy valódi helyzet szimulációját hasonlítjuk össze, adott forgalom nagyság mellett, egy ugyanazon szakaszon változtatható irányú sáv működtetésével. A kétféle szimuláció során a menetidőket vetjük össze.

### 1. BEVEZETŐ

A változtatható irányú forgalmi sáv elve a közlekedési áramlatok irányválttatására épül. Az adott útfelületen az igényeknek megfelelően a sávok számát változtathatjuk (napszakonként, szezonálisan stb.) a különböző irányokban. *Bede Zs., Péter T. 2009.1; Bede Zs., Péter T. 2009.2; B. Wolshon, L. Lambert 2006*

Napjainkban a közlekedési hálózatok fejlesztésénél az első számú szempont a torlódások csökkentése, számos megoldás közül a leginkább támogatott megoldás a meglévő úthálózat jobb kihasználtságának fokozása, egy ilyen egyszerű technikai hátteret igénylő elv, melyet az Amerikai Egyesült Államok számos államában már az 1920-as évektől használtak, az úgynevezett Reversible Lanes, azaz a változtatható irányú sáv elve.

A városokra jellemző centralizáltság miatt a torlódások a délelőtti órákban a központ irányába alakulnak ki, míg délután a városból kivezető utakra jellemzőek. Az irányok adott időpillanatban eltérő forgalomnagyságát kihasználva célszerű tehát változtatható irányú forgalmi sávokat kialakítani, melyek figyelembe veszik az aktuális forgalom nagyságot és ez alapján mindkét iránynak megfelelő kapacitást biztosítanak. *B. Wolshon, L. Lambert 2006*

Európában is láthatunk kezdeményezéseket változtatható irányú sáv alkalmazására, itt a legtöbb országban az angol Tidal Flow elnevezés ismert. Az Egyesült Királyságban Sheffield-ben a A61-es Queens Road-on 1 sáv irányát lehet változtatni, a Wales-i Cardiff-ban az A470-es North Road egy mérföldes szakaszán szintén egy sáv irányítását változtatják. A délelőtti csúcsidőszakban 2 sávon lehet a centrum felé haladni és egyen kifelé, míg délután megfordul ez az irány. Ugyancsak

hasonló kialakítású a Lincoln-i A15-ös Canwick Road. Németországban Hamburg közelében a Bunesautobahn 7 New Elbe alagút 2 sávja fix kiosztású, 2 sávot az aktuális forgalomnak megfelelően irányítanak. Horvátországban Kraljevica mellett található változtatható irányú sáv alkalmazása és Hollandiában is találunk több kísérleti megoldást.

### 2. A KAPCSOLATI MÁTRIX, IRÁNYÍTÓJELEK ÉS ÁLLAPOTJELLEMZŐK

A két forgalmi irány szerint vizsgáltuk a szakaszokat és megállapíthatjuk, hogy kétféle kapcsolati forma létezik: *Péter, T. (2012), Péter, T. and Bokor, J. (2010), Péter, T. and Bokor, J. (2011).*

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

A kapcsolati mátrix sok információt tartalmaz. Jelen esetben két dolgot kell kiemelünk:

- van-e kapcsolat két elem között
- milyen irányú az átadás ebben a kapcsolatban.

A kapcsolati mátrixban minden olyan kapcsolat változatlan marad, amelyet nem érint az irányválttatás. (Pl., ha j mindkét irány esetében változatlanul tud kooperálni egy p parkolóval. Az irányválttatás által érintett kapcsolatoknál a mindkét irányhoz fűződő kapcsolatok egymást kizárják. Tehát, a kapcsolati mátrixban, egy időpillanatban csak egy kapcsolat jelenhet meg. Állandó geometriai kapcsolat esetén főátlóra tükröződik a kapcsolat az irányválttatás következtében. A csak

egy irányhoz fűződő kapcsolat esetén nincs tükrözés. Csak egyik irányban jelenik meg ez a kapcsolat.

Végül nagyon fontos, hogy nem egy időben történik a kapcsolatváltás a kapcsolati mátrixban. Egy irány esetén is két lépésben történik a kapcsolatok bontása. 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.

### 3. A VARIÁBILIS HÁLÓZAT ÁLTALÁNOS FELÉPÍTÉSE

A változtatható irányú útvonalak tervezését ott célszerű megvizsgálni, ahol nem az útvonalról történő lehajtásoknál, ill. a végén keletkező dugók okozzák a torlódást, hanem magán a sávon az időszakonként megnövekedett járműsűrűség okoz lassú előrehaladást és torlódásokat. Az ilyen sávok elhelyezkedését tekintve két esetet különböztethetünk meg *Bede et. al (2013)*:

- Diszjunkt rendszerekre történő alkalmazás. A gyakorlatban azok az esetek, amely esetekben geometriailag különböző hálózati tartományokban helyezkednek el a vizsgált rendszerek és egymástól függetlenül működtethető rendszereknek tekinthető alkalmazás történik. Bár, mindig fontosak a komplex vizsgálatok, de ilyenkor elvben külön-külön rendszertervek készíthetők az egyes esetekre.
- Nem diszjunkt rendszerek esete: Egy közös rendszertervet kell készíteni az ilyen rendszer esetére, amelynek praktikus lehet az a célja is, hogy kezelhető diszjunkt rendszerekre bontsuk szét ezt is.

Mindegyik esetben, a rendszertervben meg kell tervezni és ki kell alakítani a szükséges infrastruktúrát, amely minden fellépő irány esetére biztosítja a hálózati elemek között szükséges geometriai kapcsolatokat és egyúttal végrehajtja az adott irányokhoz tartozó irányítást is. A közbeni időt is figyelembe véve, minden változtatható irányú részrendszert 3 fázisállapot jellemez. Ha egymástól függetlenül,  $n$  helyen valósítunk meg irányváltást, a kapcsolási rendszer egyetlen kapcsolati hipermátrixa  $3^n$  féle fázisállapotot valósít meg az alkalmazás során.

Az optimális forgalom lebonyolódása azt igényli, hogy mindenkor vegyük figyelembe azokat a különböző terhelési értékeket, amelyek a napi, heti, és irányonkénti változások során fellépnek, tehát biztosítsuk az irányítás adaptivitását.

Az irányítást tekintve szintén két esetet különböztethetünk meg:

- A fogalomirányító központból kiadott utasítás alapján, a napszaki forgalmi helyzethez alkalmazkodó időbeni vezérlés működik. Ebben az esetben az új közlekedési rendre vonatkozó modellszámítások és kialakítást követő mérések alapján kell meghatározni az időbeni vezérlést.
- A forgalmi helyzet alapján, állapotfüggő automatikusan működő intelligens irányítás alkalmazása. Ebben az esetben modell prediktív

irányítási (MPC) módszert javasolunk, amely olyan numerikus-optimalizáláson alapuló irányítási módszer, amelynél – diszkrét időt feltételezve – a beavatkozó jel jövőbeni értékeit (véges időhorizonton előretekintve) minden diszkrét időlépésben egy előírt célfüggvény optimalizálása révén határozzuk meg. A célfüggvény értéke függ a rendszer jövőbeni állapotaitól, melyeket a rendszer modellje alapján, a beavatkozó jelek és a kezdőállapot függvényében számolni tudunk. Az ily módon működő irányítási eljárás esetén, a programalkotó rendszer már teljesen fogalomtól függő és a fő jellemzője az adaptivitás.

Diszjunkt rendszerek esetén külön-külön a peremsűrűségek mérését feltételezve összefoglalható az egyes változtatható irányú szakaszokra egy közös irányítási séma!

Jelölje valamely változtatható irányú szakasznál a  $t$  időpontban az időegység alatt átbocsájtott járműszámot az  $l$ -es irányban engedélyezett haladás esetében az inputoknál  $n_l^{Inp}(t)$ , az outputoknál  $n_l^{Outp}(t)$ , valamint a belső hálózati elemek között  $n_l(t)$ .

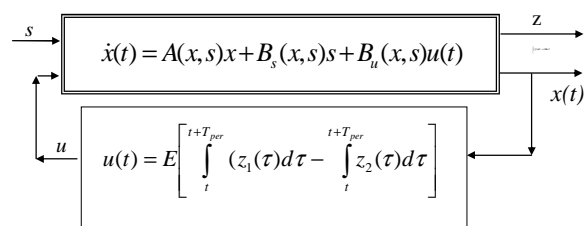
A 2-es irányban engedélyezett haladás esetében pedig az inputoknál  $n_2^{Inp}(t)$ , az outputoknál  $n_2^{Outp}(t)$ , valamint a belső hálózati elemek között  $n_2(t)$ .

Tekintsük az 3.1 ábrán látható irányítási hurkot a  $z(t)$  performance jel figyelembevételével, amely a diszjunkt rendszert magában foglaló hálózati modellnél az alábbi:

$$z(t) = [n_1^{Inp}(t) + n_1^{Outp}(t) + n_1(t)] \cdot u(t) + [n_2^{Inp}(t) + n_2^{Outp}(t) + n_2(t)] \cdot (1 - u(t))$$

Ahol:  $z(t)$  az adott változtatható irányú szakaszra vonatkozó performance jel, amelyről feltesszük, hogy nemnegatív, integrálható valós függvény. Az  $A(x,s)$ ,  $B_s(x,s)$  és  $B_u(x,s)$  mátrixok konstruálásáról [Péter; 2012] cikkben olvashatunk. Ekkor a  $z(t)$  valamely  $[t_0, t]$  intervallumon történő integrálásával az irányítás az alábbi cél megvalósítását tűzi ki:

$$\int_{t_0}^t z(\tau) \cdot d\tau = Z(t) - Z(t_0) \rightarrow Max!$$



3.1 ábra Az irányítási hurok

Ahol a  $Z(t) - Z(t_0)$  különbség az a járműszám, amelyet egy  $t_0$  kezdeti időponttól az adott  $t$  időpontig a változtatható irányú szakasz átbocsájtott, az addig megvalósult  $u(t)$  irányítás mellett.

Az eljárás  $T_{per}$  lépésközönként végez vizsgálatot a lehetséges fázisokra, ahol  $T_{per}$  egyúttal az a fázisidő, amelyre előre számolunk és felhasználjuk az alábbi  $E$  függvényt:

$$E(x) = 1 \text{ if: } x > 0 \text{ and } E(x) = 0 \text{ if: } x \leq 0.$$

Az  $u(t)$  irányítójel az adott perióduson:

$$u(t) = E \left( \int_t^{t+T_{per}} z_1(\tau) d\tau - \int_t^{t+T_{per}} z_2(\tau) d\tau \right)$$

Ha  $E(x) = 1$  akkor  $u(t) = 1$ , ez esetben az 1-es irányhoz tartozó  $z_1(t)$  performance jel valósul meg az adott perióduson:

$$z_1(t) = n_1^{Imp}(t) + n_1^{Outp}(t) + n_1(t)$$

Ha  $E(x) = 0$  akkor  $u(t) = 0$ , ez esetben a 2-es irányhoz tartozó  $z_2(t)$  performance jel valósul meg az adott perióduson:

$$z_2(t) = n_2^{Imp}(t) + n_2^{Outp}(t) + n_2(t)$$

#### 4. GYŐR, SZENT ISTVÁN ÚT MODELLEZÉSE

A változtatható irányú sáv alkalmazására egy lehetőség lehet Győrött a Szent István út, mivel ezen útszakasz mindkét irányában rendelkezésünkre áll min. 2-2 sáv és ha egy sávot elveszünk az egyik iránytól, akkor még mindig marad egy sáv a másiknak.

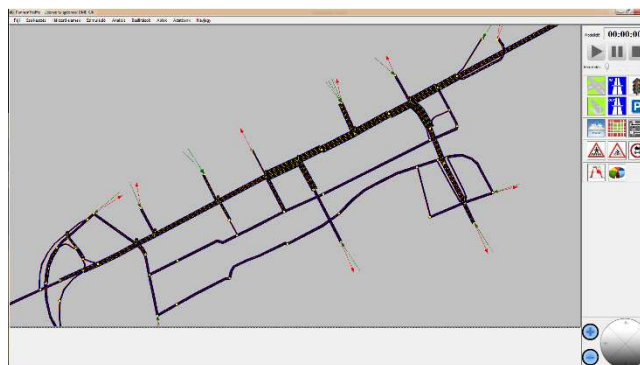
A lakott területen történő használat során fontos probléma merül fel a balra kanyarodó sávokkal kapcsolatban. A biztonság szempontjából a legegyszerűbb módszer az, ha megszüntetjük a balra kanyarodás lehetőségét a teljes hálózaton. Ebben az esetben a balra kanyarodni kívánó járművek háromszor jobbra kanyarodással érhetik el úti céljukat, amit a mellékutcákban valósíthatnak meg. Számolni kell azzal, hogy a forgalom mellékutcába való terelésével nagyobb torlódást okoz, mint a változtatható irányú sáv mellőzése. A továbbiakban a balra kanyarodás lehetőségét vizsgáltuk. A változtatható irányú sáv alkalmazásával az eredeti elrendezés szerinti balra kanyarodó sáv lesz a változtatható irányú, a másik iránytól elvett sáv lesz a belső balra kanyarodó sáv.

Ezzel a megoldással a csomópont geometriai mérete nem változna, de nagyobb odafigyelést igényelne az egyes sávok irányának megállapítása, amit minden egyes sáv fölött Változtatható Jelzéseképű Táblákkal lehetne jelölni, esetleg útburkolatba épített jelzésadókkal. A továbbiakban a szimuláció során a balrakanyarodás lehetőségével számoltunk.

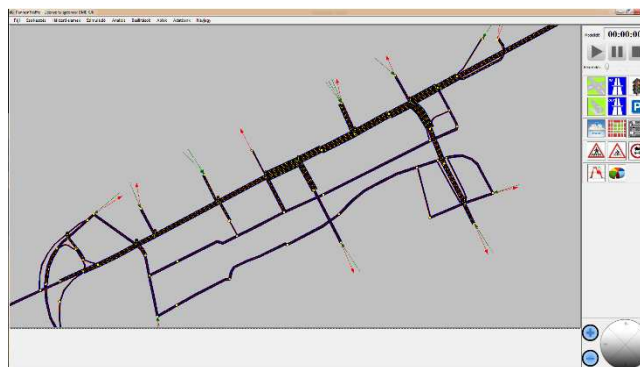
A jelenlegi helyzet szimulációját követően a sávok számának megváltoztatásával az input és output szakaszokon lévő forgalomsűrűség nem változik, csak a sávok közötti szétosztás aránya. A lámpaprogramok is a jelenlegi használatnak megfelelően működnek az egyes irányok részére.

A Szent István út modellezése látható a 4.1 ábrán, ami a jelenlegi kialakítást mutatja, míg az 4.2 ábrán a 821-es főút felől a 81-es főút irányába haladókat segítettük plusz 1 sávval.

Mivel a két irány forgalomnagysága közel egyforma, így normál szituációban, ha az egyik irányt segítjük, ugyanolyan mértékben gátoljuk a másik irány forgalmát, ezért jelen helyzetben a változtatható irányú sáv használatát speciális szituációkban javasolt alkalmazni. Ha a környező utcák irányítása és az által a forgalma is változik, akkor érdemes lesz újra vizsgálni. Így forgalomterelés vagy baleset során nyerhetünk a speciális sáv használatával. Ha előre tudjuk, hogy a két irány forgalma jelentősen eltér, mint például sportrendezvények során, akkor ezzel a sávhasználattal könnyíthetjük a várost közlekedési szennyeződéstől.



4.1 ábra Jelenlegi kialakítás



4.2 ábra Változtatható irányú sávok kialakítás

A továbbiakban olyan szituációkban vizsgáltuk a hálózatot, amely során a forgalomnagyság jelentősen eltért a két irányban, ilyen valós példát láthatunk Budapest néhány sugárirányú főútjain, ezért a következőkben egy budapesti példa kerül bemutatásra, mivel itt a jelenlegi forgalmi szituációt tudjuk összevetni a speciális sáv alkalmazásával.

#### 5. KONKLÚZIÓ

A megfordítható irányú közlekedési rend általános matematikai modellezésének vizsgálatával megállapítható, hogy a hálózatot leíró matematikai modellünk pozitív nemlineáris dinamikus rendszer. *Arneson and Langbort: (2009)*, a modell lényegét tekintve, makroszkopikus modell. Bármely részhálózaton történő forgalmi irányváltás esetén, a hálózat egyes elemeinek funkciói és az elemei közötti kapcsolatok megszűnnek, helyettük új kapcsolatok és új funkciójú elemek lépnek működésbe. Egy mintahálózaton a forgalomsűrűségtől függően, vizsgáltuk az új elvű optimális irányítás lehetőségét, amely a hálózati gráf struktúrájának

dinamikus változtatásával történik. Megállapítható, hogy a modell vizsgálatával nyert eredményeink összhangban vannak azokat a forgalmi értékeket, amelyeket a gyakorlatban megvalósított változtatható irányú forgalmi sávokkal működő közúti közlekedési rendszereken végzett mérések alapján kaptak, és a szakirodalmi hivatkozásainkban is szerepelnek. A változtatható irányú szakasz maximális járműátbocsátására a hálózati modell alapján, MPC-alapú irányítási stratégiát határoztunk meg, amely irányítás egyaránt figyelembe veszi mindkét esetben a szakaszon, illetve annak minden bemenetén és kimenetén a járműsűrűségeket a szakasz optimális működtetése érdekében.

#### 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

Arneson and Langbort (2009): H. Arneson - C. Langbort: Linear Programming Based Routing Design for a Class of Positive Systems with integral and Capacity Constraints. Proceedings of the 1st IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems, Venice, Italy, September 24-26, 2009

Bede és Péter (2009.1): Bede Zs. - Péter T.: A változtatható irányú forgalmi sávok hazai alkalmazásának aktualitása, egy lehetőség, a közúti forgalom optimalizására,

Közlekedéstudományi Szemle LIX. évf. 2. szám 2009 április p. 21-36

Bede és Péter (2009.2): Bede Zs. - Dr. Péter T.: A változtatható irányú forgalmi sávok alkalmazása során fellépő kockázati tényezők elemzése, Városi Közlekedés XLIX. évf. 6. szám 2009. december p. 326-332

Bede et. al (2013): Bede Zs. - Péter T. - Szauter F.: Variable network model In: Tankut ACARMAN (szerk.) 1st IFAC Workshop on Advances in Control and Automation Theory for Transportation Applications. Konferencia helye, ideje: Istanbul, Törökország, 2013.09.16-2013.09.17. Istanbul: 2013. pp. 173-177.

Péter, T. (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

Péter, T. and Bokor, J. (2011). New road traffic networks models for control, GSTF International Journal on Computing, Volume 1, Number 2, pp. 227-232. DOI: 10.5176\_2010-2283\_1.2.65, February 2011.

Péter, T. and Bokor, J. (2010): 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)

B. Wolshon – L. Lambert (2006): Brian Wolshon - Laurence Lambert: Reversible Lane Systems: Synthesis of Practice. Journal of Transportation Engineering, December, 2006.