

# Közúti eljutási idő becslésének lehetősége adatfúziós technikával városi úthálózaton

Az információs technológia fejlődésével és elterjedésével egyre több, korábban még nem használt lehetőség nyílt meg a közúti forgalom paramétereinek becslésére. Jogos igény, hogy az újszerű eljárások eredményeit kombináljuk a hagyományos mérőeszközökből kinyert adatokkal.

**Horváth Márton Tamás – Tettamanti Tamás – Varga István**

e-mail: hmt1990@gmail.com, tettamanti@mail.bme.hu, ivarga@mail.bme.hu

## 1. BEVEZETÉS

Az adatfúziós folyamat nehézségét az okozza, hogy a különböző típusú szenzorok által szolgáltatott adatok nem egységesek. A hálózat eltérő területeiről és időpontokból származhatnak, pontosságuk is eltérő lehet. Természetes cél, hogy a sok heterogén részletből a teljes hálózatra egy egységes egészet képezzünk. Jelen cikkben a városi útszakaszokon kialakuló eljutási idő becslésére mutatunk be egy lehetséges adatfúziós eljárást, ami a Közlekedéstudományi Szemlében korábban publikált [5] elméleti alapok gyakorlati megvalósításának lehetőségét ismerteti. A követhetőség érdekében röviden összefoglaljuk a részletesen áttekintett módszertan hátterét, alapjait.

A közúti közlekedés forgalomtechnikai paramétereinek megfelelő ismerete döntő fontosságú a színvonalas utazási szolgáltatások biztosításához akár egyéni, akár közösségi közlekedésről legyen szó. A jellemző forgalmi adatok ismerete jó alapot adhat a városi autóbusszonalak menetrendjének tervezéséhez vagy a közúti csomópontok jelzőlámpás szabályozásához. A valós idejű forgalmi információk pedig további távlatokat nyitnak meg, amelyek skálája igen széles: az egyéni útvonaltervezéstől az energiahatékony járműirányításon át a teljes közlekedési hálózat optimális irányításáig. A különféle szenzoradatok azonban önmagukban nem szolgáltatnak teljes, koherens információt a forgalom állapotáról, azaz csupán ezen adatok külön-külön való ér-

telmezése nem adja meg a hálózatot jellemző forgalomnagyságot, forgalomsűrűséget, eljutási időt vagy célforgalmi információkat. Ahhoz, hogy egy hálózat forgalmi állapotát minél jobban megismerjük, a legegyszerűbb megoldás a hálózat teljes körű „lefedése” szenzorokkal. Ez azonban csak teoretikus feltételezés, miután a szenzorok telepítése és karbantartása ekkora méretben rendkívül költségigényes feladat. Ennek megfelelően szükséges valamilyen költséghatékony megoldás keresése, hogy a ritkán telepített, illetve a heterogén formában rendelkezésre álló adatok felhasználásával jó becslést kapjunk a forgalom állapotáról. Természetesen egy ilyen algoritmusnak rengeteg problémával kell megküzdenie, mint például a különböző szemantikájú adatok, a térben és időben máshogy megjelenő adatok, illetve az adatkimaradások. Mindezeket figyelembe véve, a bemutatott eljárás célja a korszerű mérési adatok vizsgálata együttes felhasználhatóságuk szempontjából. Alapgondolatunk szerint a egyes szenzortechnológiákból származó információk megfelelő fúziójával jobb és hatékonyabb közlekedési rendszerek és szolgáltatások alakíthatók ki, szemben az egyedi mérési technológián alapuló megközelítéssel.

A téma kidolgozását az elmúlt évtizedek rohamos információtechnológiai fejlődése indukálta. A közelmúltban számtalan új technológia látott napvilágot, amelyek egy része ráadásul még csak fejlődése kezdeti szakaszában jár. A mobiltelefon (a felnőtt lakosság körében gya-

korlatilag 100%-os penetrációjú), a népszerű és ingyenes okostelefon-alkalmazások, a korszerű flottamenedzsment rendszerek (magáncégek autói és közösségi járművek egyaránt) és még sok egyéb technológia mind-mind hozzájárulhatnak egy magas színvonalú és költség-hatékony szolgáltatás megteremtéséhez.

## 2. MÉRÉSI TECHNOLÓGIÁK ÉS ADATFÚZIÓ

A közúti közlekedésben alkalmazott vagy alkalmazható mérőrendszerek köre gyakorlatilag két fő csoportra bontható: hagyományos és alternatív technológiákra. A hagyományos módszerek alatt a kifejezetten közúti forgalmi paraméterek méréséhez tervezett és a gyakorlatban alkalmazott szenzorokat értjük: hurokdetektor, pontszerű mágnesdetektor, kamera, stb. Alternatív szenzoroként pedig azokat a technológiákat azonosítjuk, amelyeket alapvetően nem forgalomtechnikai mérésekhez fejlesztettek ki, ugyanakkor mégis ilyen jellegű – másodlagos – információkat szolgáltathatnak: flottamenedzsment adatok, mobiltelefon cellainformációs adatok, mobiltelefon GPS adatok, stb. A vegyes technikák alkalmazásának alap gondolata, hogy a különböző adatok megfelelő fúziójával jobb eredményhez juthatunk, mint csupán egy-egy módszert használva.

Az adatfúzió nem egy konkrét technika, hanem olyan alapfeladat, ahol különböző információkat kell közös nevezőre hozni. Mitchell [3] így határozza meg az adatfúzió definícióját:

„Elmélet, technikák és eszközök arra a célra, hogy különböző szenzor- vagy szenzorokból származtatott adatokat közös reprezentációs formára hozzunk. Szenzorfüzió során az a célunk, hogy növeljük az információ minőségét, hogy az egy számkra releváns szempontból jobb legyen, mintha az adott forrásokat külön-külön használnánk.”

A külön-külön elszigetelten működő mérési, információs és szabályozási rendszerek önmagukban nem képesek maximális hatékonyságot elérni, miután nem áll rendelkezésükre teljes kép a forgalom állapotáról. Egy egységesített adatfeldolgozás azonban a valóságnak jobban megfelelő állapotleírást szolgáltat, amelynek eredményeképp minden alrendszer

optimálisabb működésre bírható. Az adatfúzió tehát a közúti közlekedés minden intelligens részrendszerét szolgálhatja. Ezek a rendszerek alapvetően mérő, becselő, információs, előrebecslő vagy irányító funkciókat láthatnak el [4].

Természetesen ezek a rendszerek nem minden esetben függetlenek egymástól. Sőt legtöbbször az éles határokat sem lehet meghúzni köztük, mivel gyakran egymás funkcióit támogatják vagy egészítik ki.

## 3. ADATFÚZIÓS MÓDSZERTAN ALKALMAZÁSA A VÁROSI KÖZLEKEDÉSBEN

Ma már az adatfúzió a közlekedéstudomány egyik legaktívabban kutatott területe, köszönhetően az információtechnológia óriási fejlődésének. A publikált technikák ugyanakkor javarészt az autópálya állapotának rekonstruálására irányulnak, keresztmetszeti (hurokdetektor) mérések, illetve FCD/FMD alkalmazásával. Nyitott téma viszont egy integrált – minden szenzormérést felhasználó – adatfúziós keretmodell kialakítása teljes városi hálózat állapotbecslésére. Így elmondható, hogy ez a terület még rendkívül sok lehetőséget rejt. Ennek megfelelően a következőkben egy városi, integrált adatfúziós keretmodell módszertanának alapköveit rakjuk le. A kutatást többek között a „Smarter Transport” projekt (TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012) indukálta, amelynek egyik fő célkitűzése egy vegyes mérőrendszereken alapuló forgalmi adatgyűjtő technológia fejlesztése [8].

### 3.1. A városi hálózatok problematikája

Amennyiben városi úthálózaton szeretnénk adatfúziós módszertant alkalmazni, számos nehézséggel szembesülünk, amelyek a városi közlekedés sajátosságaiból adódnak. Az egyik alapvető probléma az úthálózat bonyolultsága. Egy másik nehézség a jelzőlámpás forgalomirányítás hatása, amely „durva” beavatkozás a forgalomáramlási folyamatokba. Az autópályák forgalmát jól megfogható makroszkopikus (folyadékáramlási) modellek írják le. A városi hálózat modelljei ugyanakkor elnagyoltak, vagy – amennyiben részletesek a mikroszkopikus leírások – gyakorlati alkalmazhatóságukat megkérdőjelezi a rengeteg szükséges mérés és számítás.

További probléma, hogy a jellemzően rendelkezésre álló sokféle szenzorból csak a hurokdetektorok alkalmazhatók közvetlenül a forgalomnagyság pontos mérésére.

A fentiekből kifolyólag olyan egyszerű megközelítést kerestünk, amely bonyolult modellektől mentesen, egyszerűen csak az úthálózat egyes szakaszaira vonatkozóan igyekszik megbízható becslést szolgáltatni vegyes szenzortechnológiák fúziójával. Mivel az FCD/FMD mérések jól reprezentálják az eljutási időt, és azt akár hurokdetektoros mérésekből empirikus úton is becsülhetjük, az integrált adatfúziós keretmellünk keresett paramétere az eljutási idő.

### 3.2. Kalman-szűrő alapú szenzorfúzió

Az adatfúziós módszertanunk a közlekedésmérnöki gyakorlatban is sokat alkalmazott Kalman-szűrő technikára épül, amely egy rekurzív becslési technika a diszkrét adatok lineáris szűrés problémájára [7]. A módszerrel hatékonyan becsülhető a dinamikai rendszerek állapota még akkor is, ha a modellezett rendszer pontos természete nem ismert.

A lineáris Kalman-szűrő alkalmazásának feltétele a rendszer állapottérben történő felírása. Diszkrét, mintavételezett, időinvariáns folyamat állapotát az alábbi lineáris differenciálegyenlettel írhatjuk le:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k) \quad (1)$$

ahol  $x(k) \in \mathbb{R}^n$  az állapotvektor,  $u(k) \in \mathbb{R}^m$  a szabályozó bemenet,  $w(k)$  az állapotzaj,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  és  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$  együttható mátrixok, és  $k=1,2,\dots$  pedig diszkrét lépésköz. Az  $x(k+1)$  az állapot megváltozását írja le a  $[kT, (k+1)T]$  időintervallumban, ahol  $T$  a mintavételi idő.

A rendszer mérési egyenlete általánosan:

$$y(k) = Cx(k) + v(k), \quad (2)$$

ahol  $y(k) \in \mathbb{R}^p$  a méréseket tartalmazó vektor,  $v(k)$  a mérési zaj, és  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  a mérési együttható mátrix. A szűrő alkalmazásának feltétele, hogy  $w(k)$  és  $v(k)$  zajok nulla középértékű, Gauss-eloszlással jellemezhető sztochasztikus jelek, azaz  $E\{w(k)\} = 0$  és  $E\{v(k)\} = 0$ .

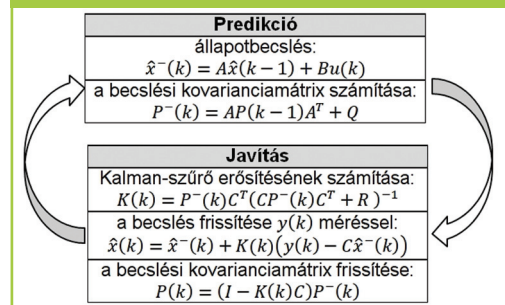
Továbbá szükséges a zajokra vonatkozó kovarianciamátrixok ismerete:

$$Q = E\{w(k)w(k)^T\}, \quad (3)$$

$$R = E\{v(k)v(k)^T\}. \quad (4)$$

A Kalman-szűrő algoritmusának lényege, hogy egy meglévő állapot becsléséből kiszámítja a következő állapot becslését, és – figyelembe véve a következő helyzetben fellépő mérési eredményt – javítja a becslést. Ezen kívül rendszerkovarianciát becsül, amit a mérés felhasználásával szintén pontosít. A működés ennek megfelelően két fázisból áll: predikció és javítás. Jelölje az állapotvektor  $k$  időpontra vonatkozó előzetes (a priori) becslését  $\hat{x}^-(k)$ , ugyanennek utólagos (a posteriori) becslését pedig  $\hat{x}(k)$ . A bevezetett becslési értékek felhasználásával meghatározható a becslés előzetes és utólagos hibája, amelyekből pedig felírható mind az a priori, mind az a posteriori becslés kovariancia mátrixa ( $P^-(k)$  és  $P(k)$ ), amelyek a becslési hibák négyzetének várható értékét reprezentálják. A két lépéses becslési algoritmust az 1. ábra szemlélteti.

1. ábra: A Kalman-szűrő kétfázisú algoritmus



Az eddig bemutatott Kalman-szűrő közvetlenül alkalmazható szenzorfúzióra. A fúzió feltétele csupán az, hogy a különböző mérési zajok között nem lehet korreláció.

Amennyiben feltételezzük, hogy több szenzormérés is folyamatosan rendelkezésre áll, a fenti módszer a következő állapottér modellel írható fel egy városi útszakasz átlagos eljutási idejének becslésére [6]:

$$x(k+1) = x(k) + w(k), \quad (5)$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k) \quad (6)$$

Az (5)-ös egyenlet a rendszer dinamikát írja le az ún. véletlen bolyongási modellel (random walk model), azaz  $A=I$  és  $B=0$ . Ennek oka, hogy nem ismerjük az eljutási idő változásának természetét, így véletlenszerű folyamatnak tekintjük. Mivel a példában csak egy darab útszakasz eljutási idejét keressük,  $x(k)$  és  $w(k)$  változók skalármennyiségek. A mérési egyenletet jelentő  $y(k)$  ugyanakkor már egy egyenletrendszert ír le. Az  $y(k)$  mérési vektor dimenziója a mérésbe bevont szenzorok számával egyezik. Ha például két különböző szenzort feltételezünk (pl. FCD és FMD), amelyek az eljutási időt mérik, akkor:

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

A Kalman-szűrő közvetlenül képes az  $y_1(k)$  és  $y_2(k)$  méréseket felhasználni az  $x(k)$  állapotváltozó becslésére. A módszer automatikusan súlyozza a méréseket a hozzá tartozó kovarianciának megfelelően, majd fuzionálja azokat egy közös optimális állapotbecslést alkotva. A megfelelő működéshez természetesen  $v_1(k)=\sigma_1$  és  $v_2(k)=\sigma_2$  szórások minél pontosabb ismeretére is szükség van. Ezek empirikus úton jól meghatározhatók. A fenti példa esetén az FCD és FMD mérések jellemző szórásából számíthatók.

### 3.3. Szenzorfüzió kapcsolt Kalman-szűrővel

Az előző fejezetben ismertetett szenzorfüziós technika hatékonyan és könnyen alkalmazható, amennyiben a mérések periodikus időintervallumonként és szinkronban előállíthatók. Ez a feltétel azonban még nagy forgalmú városi útszakaszokon sem áll fenn egyértelműen, nem beszélve a csúcsórán kívül eső időszakokról. A probléma áthidalására az ún. kapcsolt állapotter

elméletét (switched system) alkalmazhatjuk [2]. A kapcsolt leírás lényege, hogy egy adott rendszert több (véges számú) állapotter reprezentációval írunk le, amelyek gyakorlatilag különböző működési módokat jelentenek. Ezen túlmenően, az eltérő működési módokhoz külön-külön Kalman-szűrő is tervezhető. Az ily módon leírt rendszer külső események hatására vált egyik működési módból a másikba, amelyet a Kalman-szűrő átkapcsolással követ [1]. A kapcsolt, diszkrét, és lineáris állapotter leírás az (1-2) egyenletekből kiindulva:

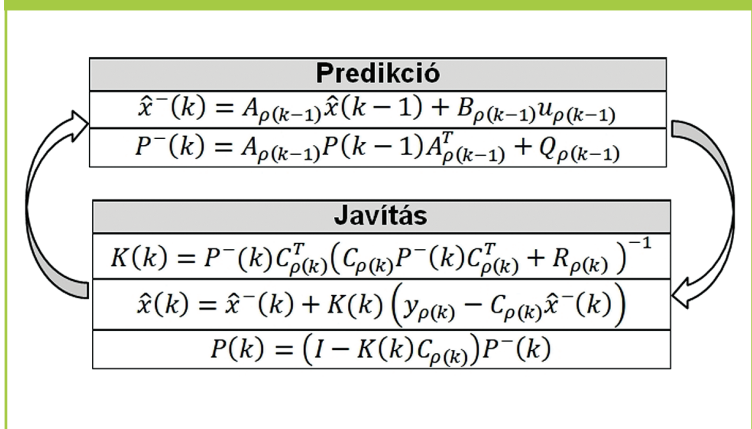
$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_{\rho(k)}x(k) + B_{\rho(k)}u_{\rho(k)}(k) + w_{\rho(k)}(k) & (8) \\ y_{\rho(k)}(k) &= C_{\rho(k)}x(k) + v_{\rho(k)}(k), & (9) \\ \rho(k) &\in S = \{1, 2, \dots, s\}, & (10) \end{aligned}$$

ahol  $\rho(k)$  diszkrét kapcsolási jel, amely a rendszer működési módjára utal  $kT$  időpillanatban és determinálja  $A, B, C$  rendszer mátrixok és  $u, w, v$  jelek értékét.  $\rho(k)$  — időbeli változását tekintve — lehet szabályalapú vagy tetszőleges szekvenciájú.

A kapcsolt Kalman-szűrő esetében is az 1. ábra szerinti algoritmus kerül felhasználásra, csak mindig az adott  $\rho(k)$  rendszermódra vonatkozóan. A szűrő a közbenső  $\hat{x}^-(k)$  és  $P^-(k)$  értékeket alkalmazza akkor is, ha az aktuális mód eltér az előzőtől:  $\rho(k) \neq \rho(k-1)$ .

A módosított becslési algoritmust a 2. ábra szemlélteti.

2. ábra: A kapcsolt Kalman-szűrő kétfázisos algoritmus



## 3.4. Városi útszakaszok eljutási idejének szenzorfüzítés becslése

A kapcsolt Kalman-szűrő alkalmazásával könnyen orvosolható a közúti közlekedés mérőeszközeire jellemző heterogenitási probléma. Az időben változó számú szenzorhalmaz teljes mértékben kezelhetővé válik, ugyanakkor a Kalman-szűrő adatfüzítés előnye is kiaknázható. A következő módszertani leírás ezeket a kedvező lehetőségeket kihasználva igyekszik tetszőleges városi útszakaszok eljutási idő becslésének adatfüzítés módszertanát felállítani.

A kapcsolt Kalman-szűrő alkalmazásának feltétele a rendszer megfigyelhetősége, azaz:

$$\text{rang} \begin{bmatrix} C_{\rho(k)} \\ C_{\rho(k)} A_{\rho(k)} \\ \vdots \\ C_{\rho(k)} A_{\rho(k)}^{n-1} \end{bmatrix} = n. \quad (11)$$

Ha nincs egyetlenegy elérhető mérés sem az adott ciklusban, a fenti feltétel természetesen nem teljesül. A mi esetünkben azonban már egy darab szenzor esetén is biztosított a (11)-es feltétel. Figyelembe véve a rendelkezésre álló szenzormérések időbeli megjelenési gyakoriságát elmondható, hogy egyedül a térben rögzített eszközök képesek mindenkor folyamatos mérésre az adott útszakaszra vonatkozóan. Ebből kifolyólag a becsléshez szükségünk van legalább egy keresztmetszeti detektorra, ami egyébiránt a gyakorlatban is sok helyen rendelkezésre áll. Minden más szenzor (pl. FCD, FMD, Bluetooth, stb.) potenciális eszközként vehető figyelembe a rendszerben, de nem feltétel a folyamatos jelenlétük. Ez a megközelítés azonban azt a problémát hordozza, hogy keresztmetszeti detektorból kell eljutási időt mérnünk, ami közvetlenül nem

lehetséges. Ennek megoldására szimulációs eljárást (mikroszkopikus forgalmi modellezést) hívhatunk segítségül. Megfelelő modellezési környezetben ugyanis lehetséges az adott útszakasz eljutási idejének meghatározása minden jellemző forgalomnagyságra. Ez történhet függvény-hozzárendeléssel ( $T=f(Q)$ ) vagy akár egyszerűen a forgalmi tartományok figyelembe vételével (pl.  $T$  átlagos eljutási idő 0-500 jármű/h, 500-1000 jármű/h, stb. esetén). Ezáltal a szimulációs eszközzel „lemért” eljutási idők közvetlenül - a valós detektor forgalomnagyságoknak megfelelően - adaptálhatók mérési eredményként.

A módszerben alkalmazható kapcsolt rendszer az (5-6) egyenletekből kiindulva:

$$x(k+1) = A_{\rho(k)}x(k) + B_{\rho(k)}u_{\rho(k)}(k) + w_{\rho(k)}(k), \quad (12)$$

$$y_{\rho(k)}(k) = C_{\rho(k)}x(k) + v_{\rho(k)}(k), \quad (13)$$

$$\rho(k) \in S = \{1, 2, \dots, s\}, \quad (14)$$

ahol  $x(k)$  állapotváltozó tehát az útszakasz átlagos eljutási idejét jelenti.  $\rho(k)$  a kapcsolási jel, ami csak a mérési egyenletre hat.  $S$  halmaz azokat a különböző mérési kombinációkat tartalmazza, amelyeket az 1. táblázatban szemléltetünk - az egyszerűség kedvéért összesen két különböző szenzort feltételezve (hurokdetektor, FCD).

Az  $y_{\rho(k)}(k)$  mérési vektorban a különböző mérőeszközök által előállított eljutásiidő-mérések kombinációi találhatóak. A  $C_{\rho(k)}$  mérési együttható mátrix minden értéke 1, elemszámát az határozza meg, hogy hány fajta szenzorból érkezett mérési eredmény. A kapcsolt Kalman-szűrő tehát az 1. táblázatnak megfelelően váltakozik a  $\rho(k)$  jel függvényében, ami ismert érték.

A  $v_{\rho(k)}(k)$  mérési zaj ismerete elengedhetetlen a megfelelő becsléshez. Ez előzetesen jól megha-

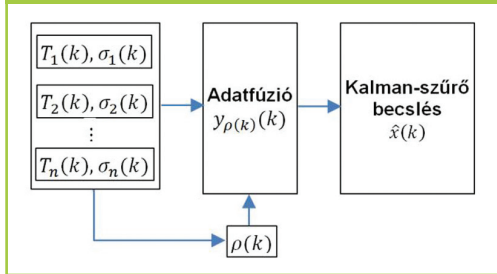
1. táblázat: A különböző mérési konfigurációk

$\rho(k)$	$y_{\rho(k)}(k)$	$C_{\rho(k)}$	$v_{\rho(k)}(k)$
1	$[T_1^{\text{hurok}}]$	[1]	$[\sigma_1]$
2	$\begin{bmatrix} T_1^{\text{hurok}} \\ T_2^{\text{FCD}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix}$

tározható a mérések jellemző szórásából. Fontos kiemelni, hogy a  $v_{\rho(k)}(k)$  időben változó, hiszen egy adott mérőeszköz szórása is változhat időben, pl. az FCD-alapú eljutási idő, amennyiben interpoláció eredménye. A keresztmetszeti detektor esetén az előzetes szimulációs eljárások kiértékelésekor jutunk szórásértékekhez. Az FCD által mért eljutási idők esetén pedig akár folyamatosan az adott méréshez kapcsolódóan is változhat a szórás. A bemutatott rendszerben a keresztmetszeti detektorok által kalkulált eljutási időnek van a legnagyobb szórása a két szenzor közül. A potenciálisan megjelenő FCD-mérések sokkal kisebb mérési zajjal terheltek, így nagyban hozzájárulnak a becslés pontosságához. Ennek egyenes következményeképpen várhatóan a forgalmasabb nappali időszakokban az adatbecslő nagyobb megbízhatóságú lesz. A kevésbé forgalmas napszakokban pedig pontatlanabb lehet a becslés. Ugyanakkor ilyen időszakokban statikus adatbázis alapján is lehet eljutási időt számolni, hiszen a forgalmi hatás nem jelentős.

A fent ismertetett adatfúziós becslési eljárást a 3. ábra szemlélteti.

3. ábra: A szenzorfüziós eljárás blokkképe városi útszakasz átlagos eljutási idejének becslésére



## 4. A MÓDSZERTAN KÍSÉRLETI MEGVALÓSÍTÁSÁNAK LEHETŐSÉGE

A gyakorlat során mért adatok kapcsolt Kalman-szűrőben való alkalmazhatóságához az szükséges, hogy egy-egy mérési periódus végén rendelkezünk az átlagos eljutási időre vonatkozó adattal, valamint annak szórásával. Ez a fejezet az előzőekben bemutatott módszertan bemeneti adatai előállításának lehetséges metodikáját mutatja be hurokdetektoros és FCD input adatok alapján.

## 4.1. A szimulációs hálózat

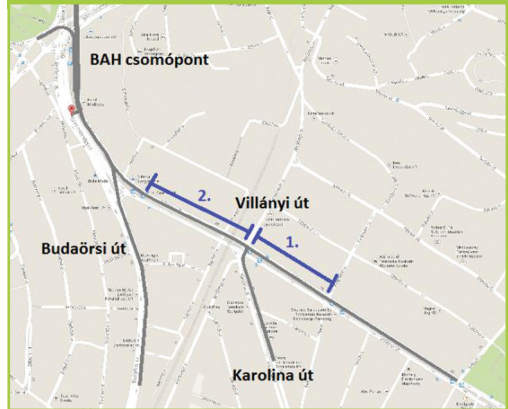
A szimulációs hálózatot egy valós budapesti helyszín, a Villányi út és a BAH csomópont környékének leképezésével hoztuk létre a Vis-sim forgalomszimulációs szoftverben (4. ábra).

4. ábra: Forgalomszimuláció futás közben



Célunk a Villányi út két egymást követő szakaszának vizsgálata volt, így a mintahálózatot ezek, valamint a forgalmi áramlataikat érdemben befolyásoló úthálózati elemek alkotják (5. ábra). A vizsgált szakaszokat kékkel jelöltük.

5. ábra: A Vissim-mintahálózat a két vizsgált tesztszakasszal



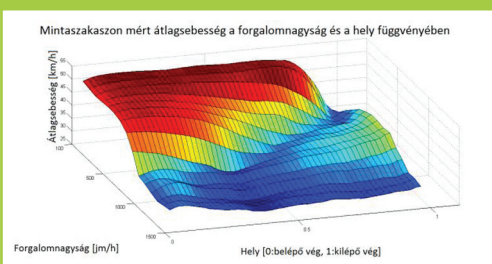
A hálózat egyéb jellemzőiben is alapvetően a valós viszonyokat tükrözi. A közúti jelzőfejek programjait a valós, hétköznap délelőttönként futó jelzésterveknek megfelelően állítottuk be. A periódusidő minden esetben 90 másodperc volt.

Alapesetben a valós hálózaton két irányban biztosított a zöldhullám: egyrészt a Villányi

úton, másrészt a Budaörsi úton, amelyek a két út találkozásánál egymással is összehangoltan működnek. Így a Villányi út felől érkezők számára egészen a BAH csomópontig biztosított a folyamatos haladás, ott viszont már megállásra kényszerülnek, mivel az ottani fázisúterv a Budaörsi út felől érkezők zöldhullámaához illeszkedik.

A szimulációs mérések során használt hurokdetektorokat a valós detektorok helyén vettük fel. Ezt azért szükséges kiemelni, mert egy adott szakaszon az egyes forgalmi paraméterek értékei a hely függvényében változnak, így fontos a mérés helyét rögzíteni. Erre mutat példát a 6. ábra, amin egy szakasz egyes pontjain – különböző gerjesztő forgalomnagyságok mellett – kialakuló átlagsebesség látható.

**6. ábra: Mintaszakaszon mért átlagsebesség a forgalomnagyság és a hely függvényében**



## 4.2. A szimulációs futtatások

A szimulációs futtatások során a detektorokkal mindkét vizsgált szakaszra külön-külön, 90 másodperces időközönként összesítve, illetve átlagolva mértük a forgalomnagyság, valamint a foglaltság értékét. Ezenfelül rögzítettük az eljutási időket is, ami majd a gyakorlatban alkalmazott mérőrendszer kimenete lesz. Elvben ennek meghatározásához bemeneti oldalon elég lenne a foglaltság mérése, hiszen annak értéke jó közelítést ad a szakasz telítettségi állapotáról. Azonban a foglaltság mérése nem oldható meg kellő pontossággal, mert így túl nagy hibák kerülhetnek a mérésbe.

Sokkal pontosabb képet kapunk úgy, ha a foglaltság helyett a keresztmetszetben elhaladó

járművek számát mérjük, hiszen itt a tévedés esélye minimális. Önmagában ezen paraméter mérése viszont nem elegendő. Ahogy egy üres hálózat telítődik, a forgalom nagysága folyamatosan nő. Viszont ahogy a hálózat túltelítetté válik, kialakulnak torlódások, a megfigyelt keresztmetszetben az időegység alatt áthaladó járművek száma lecsökken. Ilyen módon például egy mért alacsony forgalomnagyságérték jelentheti azt, hogy a hálózaton kevés jármű tartózkodik és a forgalom áramlása zavartalan (tehát a foglaltság kicsi), ugyanakkor azt is, hogy a hálózat torlódott, és a járművek szabad haladása erősen gátolt (tehát a foglaltság nagy). Ezt szemlélteti a 7. ábra.

Az előbbi megfontolásokat figyelembe véve a forgalmi állapot pontos mérése a forgalomnagyság és a foglaltság együttes mérésével lehetséges. A forgalomnagyság mérésével ismerjük az egységnyi idő alatt a keresztmetszetben áthaladó járművek számát, míg a foglaltság – bár csak kevésbé pontosan mérhető – segítségével meghatározható, hogy a hálózat a telítetlen (stabil), vagy a telített (instabil) állapotban van.

A forgalomnagyság- és foglaltságmutatók lemérése különböző szimulációs beállítások mellett történt meg, amelyekkel arra törekedtünk, hogy minél többféle forgalmi helyzetet előállítsunk. Alapvetően két gerjesztő paraméterrel dolgoztunk: a hálózatra bocsátott forgalomnagyság változtatásával, illetve a Villányi úti zöldhullámnak a Budaörsi úti zöldhullámhoz képesti elhangolásának mértékével.

## 4.3. Eljutási idő becslése hurokdetektoros adatok alapján

A mérési adatok kiértékelésének célja a vizsgált szakaszok mindegyikére egy-egy olyan „look-up-table” előállítás, amely a hurokdetektor által mért forgalomnagyság- és foglaltságértékek alapján becslést ad a szakasz aktuális átlagos eljutási időre.

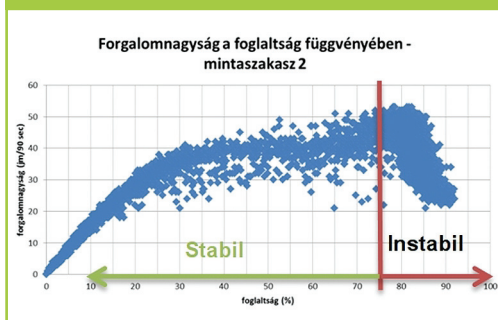
A táblázatok tartományait két lépésben határoztuk meg. Először a mért foglaltságadatokat alapján determináltuk a forgalmi állapot stabil

vagy instabil mivoltát, majd második lépésben a mért forgalomnagyság-értékek szerint stabil és instabil résztartományokat definiáltunk. Ezek után szakaszonként minden résztartományra vonatkozóan megállapítottuk az eljutási idők átlagát és szórását.

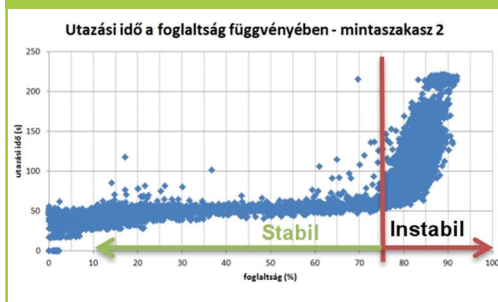
## 4.3.1. A „look-up-table” stabil és instabil tartományainak meghatározása

A forgalomnagysági tartományokat minden egyes szakaszra külön-külön meg kell határozni nagy mennyiségű historikus adat feldolgozásával. A kiértékelés alapja a forgalomnagyság-foglaltság, illetve az eljutási idő-foglaltság diagrampár, ami az egyes vizsgált szakaszokra vonatkozóan természetesen eltérő lehet. A diagramokat a 2. mintaszakaszra vonatkozóan a 7. és 8. ábrák mutatják.

7. ábra: A 2. mintaszakasz forgalomnagyság-foglaltság diagramja



8. ábra: A 2. mintaszakasz eljutási idő - foglaltság diagramja



A diagramok szétbonthatók egy stabil (torlódásmentes) és egy instabil (torlódott) tartományra, attól függően, hogy a hálózat telített-e. A stabil és instabil tartományok elválasztását

a mért eljutási idők alapján lehet megtenni. Látható (8. ábra), hogy az eljutási idők a foglaltság növekedésével párhuzamosan egy ideig kismértékben, majd egy – mindig az adott szakaszra jellemző – ponton túl sokkal nagyobb ütemben nőnek. Ez a pont a stabil (telítetlen) és az instabil (túltelített) állapotok határa. A 8. ábra egyébiránt az ellenállás függvényhez vagy más néven VDF-függvényhez (volume-delay fun on) [9] hasonló viselkedést mutat. A diagram jobb széle gyakorlatilag a jellemzett útszakasz maximális kapacitása.

## 4.3.2. A stabil és instabil résztartományok meghatározása

Egy-egy szakaszra vonatkozóan a stabil és instabil tartományok szegmentálásának alapja, hogy a szimulációs futtatások során a különböző adatok lemérését 90 másodperces periódusokban végeztük.

A szegmensek megállapításához egyszerre mértük a detektorok keresztmetszetében elhaladó járművek számát 90 másodpercenként, valamint a szakaszon ez idő alatt kialakuló átlagos eljutási időt. Amely forgalomnagyság-értékek esetén az eljutási idő hasonló volt, úgy azokból egy résztartományt képeztünk. Ennek egyik oka, hogy a táblázat túlzott elaprózódását elkerüljük, másik pedig az, hogy az eljutási idők szórását csökkentjük. Kevés adatszámú tartomány esetén ugyanis egy-két kiugró érték nagyon meg tudja növelni a szórást értékét, ami viszont a becslés pontosságának drasztikus csökkenését eredményezné. Fontos, hogy minden résztartományban álljon rendelkezésre annyi mérési adat, amellyel statisztikai elemzés végezhető. Természetesen az egyes szakaszokon, illetve a stabil és instabil tartományokban különböző számú résztartomány is meghatározható.

Annak érdekében, hogy egy-egy kiugró mérés ne okozzon bizonytalanságot, a rendszer felállítása során eltávolítottuk az extrém adatokat, ahol az eljutási idő túlságosan eltért a résztartományban számított átlagos eljutási időtől. A hibás mérések adatait (lásd: 8. ábra, 0 s-os eljutási idők) szintén eltávolítottuk a mintából. Ezen előkészítő lépések után ha-

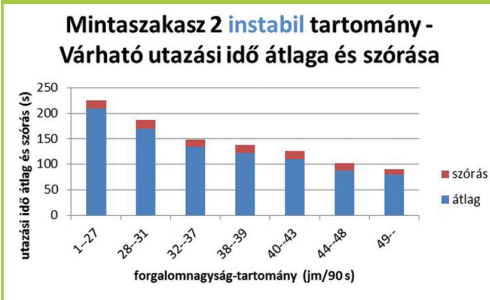
tároztuk csak meg a kategóriákba tartozó mérések esetén mért eljutási idők átlagát és szórását.

Az alábbi ábrákon láthatók egy mintaszakasz stabil és instabil tartományainak végleges rész-tartományai, illetve a hozzájuk rendelt átlag eljutási idők és azok szórásai. Ahol a szórás átlaghoz viszonyított értéke túlságosan is nagy, ott a „look-up-table” által szolgáltatott érték inkább csak iránymutatásként értelmezendő, mivel a bizonytalanság mértéke jelentős.

9. ábra: A 2. mintaszakasz stabil tartományának rész-tartományai



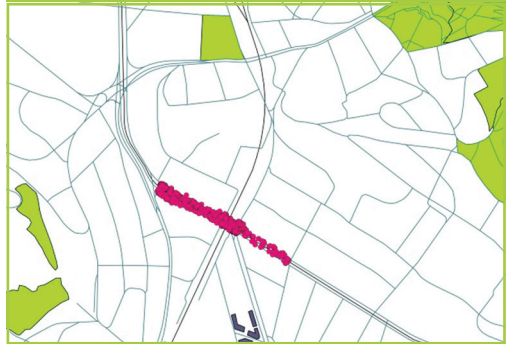
10. ábra: A 2. mintaszakasz instabil tartományának rész-tartományai



## 4.4. Eljutási idő becslése FCD-adatok felhasználásával

A felállított módszertant valós FCD-adatok alapján dolgoztuk ki, a teszterület egyheti logolási adatait felhasználva, 2012. október 22-28. között. A rögzített bejelentkezési pontokat rózsaszínnel jelölve mutatja a 11. ábra. Látható, hogy ezek a vizsgált szakaszokat teljesen lefedik.

11. ábra: A módszertan kidolgozásához felhasznált adathalmaz



Egy-egy bejelentkezéskor eltároltuk a bejelentkezés pontos idejét, GPS-koordinátáit, a jármű azonosítóját és sebességét, illetve egyéb, a vizsgálat során figyelembe nem vett jellemzőket. Ezek alapján dolgoztuk ki a módszertant, kiegészítve azzal a feltételezéssel, hogy a járművek legalább 5 másodperces időközönként bejelentkeznek.

A célunk gyakorlatilag a haladás során a szakasz belépő és kilépő végénél lévő jelzőlámpák érintése között eltelt  $t_0$  idő becslése volt. A bizonytalanságot az okozza, hogy a bejelentkezési pont csak ritkán esik pontosan egybe a szakasz valamely végpontjával. Ilyen módon a szakasz belépő és kilépő végénél fellép egy-egy  $t_1$  és  $t_2$  bizonytalansági idő, amelyek a járműnek a jelzőlámpa előtti utolsó bejelentkezése és a jelzőlámpa előtti tényleges elhaladás között eltelt időt jelentik. Ezekről annyit tudunk, hogy:

$$t_1 < t_{\log} \quad (15)$$

és

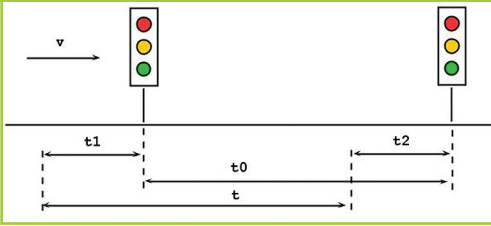
$$t_2 < t_{\log} \quad (16)$$

ahol  $t_{\log}$  a bejelentkezési időköz, esetünkben 5 másodperc. Mérföld a belépő és a kilépő végénél található jelzőlámpák előtti utolsó bejelentkezések között eltelt  $t$  időt tudjuk, amiből a valós  $t_0$  érték:

$$t_0 = t - t_1 + t_2 \quad (17)$$

A meghatározás folyamatát szemlélteti a 12. ábra.

12. ábra: A mért és valós eljutási, illetve bizonytalansági idők



A  $t$  méréseket a „look-up-table” mérési ciklusaihoz igazodva ebben az esetben is 90 másodpercenként átlagoljuk. A valós  $t_0$  időhöz képesti eltérést pedig a bizonytalansági időkből számított szórások alapján tudjuk meghatározni. A  $t_1$  és  $t_2$  felső korlátja a logolási időköz, jelen esetben 5 másodperc. A legkedvezőtlenebb esetet feltételezve a bejelentkezések térbeli eloszlását – a valós adatok eloszlásánál számunkra kedvezőtlenebb – egyenletes eloszlásúnak tekintjük, amivel a biztonságra irányába tévedünk.

Általánosan az intervallumon vett egyenletes eloszlás szórása:

$$\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}} \quad (18)$$

Esetünkben  $a$  és  $b$  a lehetséges bejelentkezési helyek két szélső pontja, amelyek között elhaladva pontosan  $t_{log}$  idő telik el. Így a bizonytalanság mértéke egy bejelentkezési pont esetén:

$$\sigma = \frac{t_{log}}{\sqrt{12}} = \frac{5 \text{ s}}{\sqrt{12}} = 1,443 \text{ s.} \quad (19)$$

Tekintve, hogy egy szakasz eljutási idejének becslése két bejelentkezési pont között eltelt idő alapján történik, a két bejelentkezés egyenletes eloszlásának konvolúcióját vesszük, és annak számítjuk a szórását:

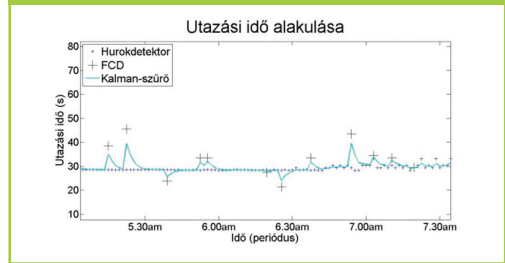
$$\sigma = \sqrt{\frac{t_{log}^2}{12} + \frac{t_{log}^2}{12}} = \sqrt{\frac{5s^2}{12} + \frac{5s^2}{12}} = 2,04 \text{ s.} \quad (20)$$

Ilyen módon előállíthatók a kapcsolt Kalman-szűrő bemenetei: a 90 másodpercenként mért átlagos  $\bar{t}$  eljutási idő és a hozzá tartozó  $\sigma$  érték.

## 4.5. A módszertan alkalmazási lehetőségei

A hurokdetektoros mérések alapján számolt eljutási idő bizonytalansága általában lényegesen meghaladja a floating car adatokból meghatározott érték bizonytalanságát. Ilyen módon a kapcsolt Kalman-szűrő alapvetően utóbbiakra támaszkodik, amennyiben van ilyen beérkező adat. Az eljárás működését tesztkörnyezetben ellenőriztük, valós mérési adatok alapján előállított bemenetek szerint. Ezt mutatja be a 13. ábra. A módszertan egy későbbi fázisban szükséges tesztelési lépése, hogy összehasonlítsuk a szinkron, a valós idejű, a helyszíni hurokdetektoros és az FCD-adatok alapján működő Kalman-szűrő által szolgáltatott eredményt az adott helyzetben ténylegesen kialakuló eljutási idővel.

13. ábra: A kapcsolt Kalman-szűrő működése



A bemutatott eljárás kiterjeszhető hálózati szintre, így az a különböző forgalmi modellek paraméterhangolásához felhasználható. A hangolás segítségével beállíthatók az egyes útszakaszok forgalomnagyság-függő ellenállásai, amik alapján meghatározható, hogy az aktuális forgalmi terhelések hatására hogyan alakul az eljutási idő. Ilyen lehetséges konkrét alkalmazási terület az ellenállás függvények (volume-delay function) [9] pontosítása vagy a two-f luid modell [10] tényezőinek javítása.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben kifejezetten a városi környezetre koncentráva egy vegyes mérőrendszeren alapuló forgalmi adatgyűjtő technológia metodológiai alapjait ismertettük. A szenzorfüzós eljárás módszertanát a kapcsolt Kalman-szűrő technikára alapozva építettük fel, amely lehetővé teszi nagyon heterogén tulajdonságú

mérőrendszerek adatainak hatékony felhasználását. Az eljárás ráadásul egy további alkalmazási lehetőséget rejt, hiszen akár valós idejű makroszkopikus forgalommodellezés javításához is alkalmazhatók az adatfúzióval nyert adatok.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak az iData Kft.-nek az FCD adatok rendelkezése bocsátásáért, továbbá a TÁMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0012: „Smarter Transport” projekt támogatásáért (a projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg).

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Böker, G., Lunze, J.: Stability and performance of switching Kalman filters, *International Journal of Control*, vol. 75 (16/17), pp. 1269-1281, 2002
- [2] Liberzon, D.: *Switching Systems and Control*, Birkhäuser, Boston, 2003
- [3] Mitchell, H. B.: *Multi-sensor data fusion: An introduction*, New York, Springer, 2007.
- [4] Qing, O.: *Fusing Heterogeneous Traffic Data: Parsimonious Approaches using Data-Data Consistency*, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2011
- [5] Tettamanti T., Bécsi T., Varga I.: A közúti forgalom becslésére felhasználható mérési adatok és együttes alkalmazhatóságuk, *Közlekedéstudományi Szemle LXIV* (3), pp. 29-42., 2014
- [6] Tettamanti T., Horváth M.T., Varga I.: Road traffic measurement and related data fusion methodology for traffic estimation, *Transport and Telecommunication*, Vol. 15 (4), pp. 269-279, doi: 10.2478/ttj-2014-0023, 2014
- [7] Welch, G., Bishop, G.: *An Introduction to the Kalman Filter*, University of North Carolina at Chapel Hill, TR95-041, 1995
- [8] Horváth, B.: *Elements of Smart Transport, Workshop on Design, Simulation, Optimization and control of Green Vehicles and Transportation*, Győr, 2014
- [9] BPR: *Traffic Assignment Manual for Application with a Large, High Speed Computer*. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Washington, U.S., 1964.
- [10] Herman, R., Prigogine, I: *A two-fluid approach to town traffic*, *Science*, Vol. 204, pp. 148-151., 1979



### The possibility of travel time estimation on the urban road network with a data fusion technology

The elaboration of the topic has been induced by the rapid development of information technology of the past few decades. Recently, several new technologies have appeared: moreover, a part of them are still in an initial stage of development. Mobile phones (with a penetration of almost 100% in the adult population), popular and free smartphone applications, advanced fleet management systems (the cars of private companies and public transportation vehicles) and many other technologies can all contribute to the creation of a high quality and cost-effective service.



### Die Möglichkeit für die Einschätzung der Reisezeit auf dem städtischen Straßennetz mit einer Datenfusionstechnologie

Die Ausarbeitung des Themas wurde durch die schnelle Entwicklung der Informationstechnologie in den letzten Jahrzehnten begründet. In der jüngsten Zeit erschienen mehrere neue Technologien, ein Teil von ihnen befindet sich sogar noch im Anfangsstadium der Entwicklung. Mobiltelefone (mit einer Penetration von fast 100% in der erwachsenen Bevölkerung), beliebte und kostenlose Smartphone-Anwendungen, fortschrittliche Flottenmanagementsysteme (sowohl für die Autos von privaten Unternehmen als auch für den öffentlichen Transport) und viele andere Technologien können alle zu der Schaffung einer kostengünstigen Dienstleistung mit hoher Qualität beitragen.