



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar  
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

# Utazási idő becslése adatfúziós technikával városi útszakaszokon

**Horváth Márton Tamás**

AAHSL4

*Konzulens:*

**Dr. Tettamanti Tamás**

Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2014. december 12.

**Absztrakt:** Az információs technológia fejlődésével és elterjedésével egyre több, korábban még nem használt lehetőség nyílt meg a közúti forgalom paramétereinek becslésére. Magától értetődően felmerülő igény, hogy ezen újszerű eljárások eredményeit kombináljuk a hagyományos mérőeszközökből kinyert adatokkal. A folyamat nehézségét az okozza, hogy a különböző típusú szenzorok által szolgáltatott adatok nem egységesek. A hálózat eltérő területeiről származhatnak, akár eltérő időpontokban és pontosságuk is eltérő lehet. Természetes cél, hogy a sok kis heterogén részletből egy egységes egészet képezzünk a teljes hálózatra vonatkozóan. A dolgozat városi útszakaszokon kialakuló utazási idő becslésére mutat be egy lehetséges adatfúziós eljárást.

**Kulcsszavak:** adatfúzió, Vissim, kapcsolt Kalman-szűrő, hurokdetektor, FCD

## Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani konzulensemnek, dr. Tettamanti Tamásnak a dolgozat elkészítésében nyújtott kiemelkedő, mindenre kiterjedő segítségéért. Köszönettel tartozom az iData Kft-nek a floating car adatok rendelkezése bocsátásáért, valamint a BKK Közútnak a hurokdetektoros mérési adatok rendelkezésre bocsátásáért, továbbá a „Smarter Transport” projekt támogatásáért, melynek keretében a diplomaterv alapötlete megszületett. Köszönöm a PTV AG-nek a rendelkezésemre bocsátott Vissim forgalomszimulációs szoftvert.

# Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	ii
Ábrák jegyzéke	iv
Táblázatok jegyzéke	vi
<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
<b>2. Az adatfúzió bemutatása</b>	<b>3</b>
2.1. Mérési technológiák és jellemzőik . . . . .	3
2.1.1. Induktív hurokdetektor . . . . .	4
2.1.2. Flottamenedzsment-rendszerek floating car adatai . . . . .	7
2.2. Az adatfúzió meghatározása . . . . .	7
2.3. Adatfúzió alkalmazása a közúti közlekedésben – áttekintés és célkitűzés . . . . .	9
<b>3. Kalman-szűrő alapú adatfúziós eljárás kidolgozása</b>	<b>11</b>
3.1. A Kalman-szűrő . . . . .	11
3.2. Az alkalmazott módszertan – a kapcsolt Kalman-szűrő . . . . .	14
3.2.1. Városi útszakaszok utazási idejének szenzorfüziós becslése . . . . .	15
<b>4. A módszertan kísérleti környezete</b>	<b>19</b>
4.1. A szimulációs hálózat . . . . .	19
4.2. A szimulációs futtatások . . . . .	21
4.2.1. A szimulációs és a valós eredmények eltérései . . . . .	23
4.3. Utazási idő becslése hurokdetektoros adatok alapján . . . . .	25

4.3.1.	A look-up-table stabil és instabil tartományainak meghatározása . . . . .	25
4.3.2.	A stabil és instabil résztartományok meghatározása . . . . .	26
4.4.	Utazási idő becslése floating car adatok felhasználásával . . . . .	27
<b>5.</b>	<b>A módszertan gyakorlati alkalmazási kérdései</b>	<b>31</b>
5.1.	A rendelkezésre álló adatállomány problémája . . . . .	31
5.2.	A hurokdetektoros adatok felhasználása . . . . .	32
5.3.	A floating car adatok felhasználása . . . . .	34
5.3.1.	A floating car adatok korrekciója . . . . .	36
5.3.2.	A floating car adatok tartományokba sorolása . . . . .	38
5.4.	Az alkalmazott kapcsolt Kalman-szűrő . . . . .	39
<b>6.</b>	<b>Az utazási idő becslésének megvalósítása</b>	<b>41</b>
6.1.	A csak hurokdetektoros üzem behangolása . . . . .	42
6.1.1.	Az optimális nagyságrendű hangolási paraméter meghatározása . . . . .	42
6.1.2.	Az adaptív hangolási paraméter meghatározása . . . . .	46
6.2.	Az együttes FCD és hurokdetektoros üzem behangolása . . . . .	50
6.3.	Adatfúzió – utazási idő becslése kapcsolt Kalman-szűrővel . . . . .	54
<b>7.</b>	<b>Összefoglalás</b>	<b>56</b>
<b>A.</b>	<b>A mikroszimulációs futtatások technikai részletei</b>	<b>58</b>
<b>B.</b>	<b>Az alkalmazott look-up-table</b>	<b>61</b>
	<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>62</b>

# Ábrák jegyzéke

2.1. Hurokdetektor [fotó: Tamaskovics Gergely] . . . . .	5
2.2. Hurokdetektor működési elve [1] . . . . .	5
2.3. Floating car adatok továbbításának folyamata [2] . . . . .	7
3.1. A Kalman-szűrő kétfázisos algoritmus [24] . . . . .	13
3.2. A kapcsolt Kalman-szűrő kétfázisos algoritmus [22] . . . . .	15
3.3. A szenzorfüziós eljárás blokk-sémája városi útszakasz átlagos utazási idejének becslésére [11] . . . . .	18
4.1. A Vissim-mintahálózat a vizsgált tesztszakasszal . . . . .	20
4.2. Mintaszakaszon mért átlagsebesség a forgalomnagyság és a hely függvényében . . . . .	21
4.3. Mikroszimuláció futás közben . . . . .	22
4.4. A forgalomnagyság-foglaltság diagram a szimulációs mérési keresztmetszetben . . . . .	23
4.5. A forgalomnagyság-foglaltság diagram a valós mérési keresztmetszetben . . . . .	24
4.6. Az utazási idő-foglaltság diagram a szimulációs mérési keresztmetszetben . . . . .	26
4.7. A mintaszakasz stabil tartományának résztartományai . . . . .	27
4.8. A mintaszakasz instabil tartományának résztartományai . . . . .	28
4.9. A módszertan kidolgozásához felhasznált adathalmaz . . . . .	29
4.10. A mért és valós utazási-, illetve bizonytalansági idők . . . . .	30
5.1. Sebesség-foglaltság diagram a valós mérési keresztmetszetben . . . . .	33

5.2.	A forgalmi áramlat alakulása a tesztidőszak alatt . . . . .	34
5.3.	Mért és korrigált eljutási idők . . . . .	38
6.1.	A $Q_{hurok}$ paraméter változtatásának hatása . . . . .	43
6.2.	A $Q_{hurok}$ paraméter változtatásának hatása a stabil tartományban .	44
6.3.	A $Q_{hurok}$ paraméter változtatásának hatása az instabil tartományban	45
6.4.	A $Q_{hurok} = 1000$ paraméter szükségességének alátámasztása . . . . .	45
6.5.	Az adaptív $Q_{hurok}$ paraméteres Kalman-szűrő az instabil tartományban . . . . .	49
6.6.	Az adaptív $Q_{hurok}$ paraméteres Kalman-szűrő a stabil tartományban	49
6.7.	Az adaptív $Q_{hurok}$ paraméteres Kalman-szűrő . . . . .	50
6.8.	A $Q_{FCD+hurok}$ paraméter változtatásának hatása . . . . .	51
6.9.	A $Q_{FCD+hurok}$ paraméter változtatásának hatása a stabil szakaszon	52
6.10.	A $Q_{FCD+hurok}$ paraméter változtatásának hatása az instabil szakaszon	52
6.11.	Az egy, illetve a két üzemmódot alkalmazó szűrők közti különbség a tesztkörnyezetben . . . . .	53
6.12.	A kapcsolt Kalman-szűrő realiztikus körülmények között - utazási idő becslésének megvalósítása . . . . .	54
A.1.	Túlterhelt állapot forgalmi szimulációja . . . . .	59

# Táblázatok jegyzéke

2.1. Hurokdetektorok jellemzői [22] . . . . .	6
2.2. FCD-szenzorok jellemzői [22] . . . . .	8
3.1. A különböző mérési konfigurációk [22] . . . . .	17
3.2. Mérési konfiguráció $n$ db szenzor együttes használata esetén . . . .	18
5.1. Helyszíni mérések eredményei . . . . .	37
5.2. A változók méretének alakulása az egyes mérési konfigurációk esetén	39
B.1. Look-up-table – mintaszakasz . . . . .	61



# 1. fejezet

## Bevezetés

A modern közlekedés egyik alapeleme a színvonalas utazási szolgáltatások biztosítása, legyen szó akár egyéni, akár közösségi közlekedési módokról. Mindennek feltétele a forgalomtechnikai paraméterek megfelelő pontosságú, valós idejű ismerete, amely alapján lehetővé válik egy-egy csomópont, útvonal vagy akár egy teljes hálózat adott kritérium szerinti optimális irányítása. Ideális esetben az egész rendszert megfelelően sűrűn telepített, egységes szenzorokkal lenne érdemes megfigyelni, ami viszont óriási költségekkel járna. Azonban már a mai állapotok szerint is a hálózat igen nagy részén található valamilyen szenzor, ami alapján a forgalom egy-egy meghatározott, de nem mindenhol feltétlenül azonos jellemzője vizsgálható. Ilyenek például a közúti csomópontok környékén elhelyezett hurokdetektorok, melyekkel többek között forgalomnagyság mérhető, vagy a közlekedésben résztvevők mobiltelefonjai helyzetének figyelése, melyből az útszakaszokon kialakuló eljutási időre vagy sebességre vonható le következtetés. Mindezen információk azonban a hálózat különböző helyeiről érkeznek, sok esetben különböző időben, különböző időközönként, különböző megbízhatósággal és különböző adatstruktúrában [11].

A dolgozat alap gondolata, hogy a vegyes szenzorokból származó információk megfelelő fúziójával jobb és hatékonyabb közlekedési rendszerek és szolgáltatások alakíthatók ki, mint az egyes technikák egymástól elszeparáltan történő alkalmazásával. A dolgozat célja, hogy egy olyan lehetőséget mutasson be, mellyel a sok kis, különálló részletből egy egységes egészet lehet létrehozni.

Az elmúlt néhány évben számos olyan technológia terjedt el – és minden bi-

zonnyal fog elterjedni –, melynek elsődleges feladata nem is feltétlenül a forgalomtechnikai paraméterek mérése, azonban ilyen tevékenységre is alkalmazható. Ilyenek a flottamenedzsment-rendszerekből vagy a mobiltelefonokból származó adatok, melyeket a hagyományos közúti mérőeszközökből kinyert mérési eredményekkel kombinálva új távlatok nyílnak a hálózat forgalmi állapotának megfigyelésében és ezen keresztül irányításában is.

Diplomatervemben városi útszakaszokon kialakuló utazási idő becslésére létrehozott adatfúziós módszertant ismertetek, valós helyszínt modellezve. A különböző szenzorokból származó valós mérések eredményeit kapcsolt Kalman-szűrővel fuzionáltam, melyet MATLAB programnyelven programoztam le. Külön metódusokat dolgoztam ki, amikkel megteremtettem az alkalmazott alternatív és hagyományos mérőeszközökből származó nyers adatok felhasználhatóságát. A szükséges forgalmi vizsgálatokat a Vissim mikroszkopikus forgalomszimulációs szoftver segítségével végeztem. A diplomaterv alapgondolatát a „Smarter Transport” projektben végzett munkám indukálta; a kutatási program egyik fő célkitűzése egy vegyes mérőrendszereken alapuló forgalmi adatgyűjtő technológia fejlesztése.

## 2. fejezet

# Az adatfúzió bemutatása

A fejezet a dolgozat témáját adó adatfúziós technika hátterét ismerteti. A leírás struktúrája és bizonyos részei egyeznek a kutatás korábbi szakaszában írt, a dolgozat készítése idején elbírálás alatt álló cikk [11] egyes szakaszaival.

### 2.1. Mérési technológiák és jellemzőik

A közúti közlekedés adatgyűjtő rendszereit két fő csoportra bonthatjuk: a hagyományos és az alternatív technológiákra. Előbbiek alatt olyan eszközöket értünk, melyeket kifejezetten a forgalomtechnikai paraméterek mérésére fejlesztettek ki. Utóbbiak körébe pedig azokat az újszerű technológiákat soroljuk, melyeket alapvetően nem forgalmi mérések végzésére alkottak meg, viszont – az eredeti célhoz képest mintegy mellékesen – hatékonyan alkalmazhatók ilyen célokra. A hagyományos technológiák körébe tartozik az induktív hurokdetektor, a kamera, a pneumatikus detektor, stb. Az alternatív eljárások csoportjába a flottamenedzsment-rendszerekből származó ún. „úszókocsis” adatok (FCD – Floating Car Data), utazó mobiltelefon cellainformációs adatok (FMD – Floating Mobile Data), stb. felhasználását soroljuk.

A teljes hálózat forgalmi állapotának megismerésére a hagyományos szenzorok alkalmazása szükséges – hiszen pontos, elsődleges adatokat szolgáltatnak –, de nem elégséges, mivel a teljes lefedettség nem érhető el az aránytalanul magas telepítési és fenntartási költségek miatt. Ezen segít az utóbbi években rohamosan fejlődő

alternatív technológiák elterjedése, melyek alapja a közlekedés monitorozásának szempontjából a megfigyelt járművek helyváltoztatásának követése. A módszer mind az egyéni mind a közösségi közlekedésben alkalmazott, főleg áruszállítók, taxik és közösségi közlekedési vállalatok körében. Magyarországon is láthatunk ilyenre példát a Magyar Közútnál [20] vagy a budapesti FUTÁR rendszer esetében [5]. A mobiltelefonos és az önálló GPS-adatok gyűjtése mellett a szegmens talán legdinamikusabban fejlődő területe a flottamenedzsment-rendszerek alkalmazása, mely egyre inkább elterjedté válik. Ezek a rendszerek nemcsak a forgalmi menedzsment fejlődését segítik elő, de a valós idejű információszolgáltatásért fizetni hajlandó járművezetők egyre növekvő igényeit is ki tudják elégíteni. Így olyan, korábban megválaszolatlan kérdésekre is választ kaphatnak, hogy például van-e torlódás a bejárni kívánt útvonalon, illetve hogyan lehet azt elkerülni, stb. Mindezek alapja, hogy az adatforrásokból beérkező információ legyen pontos, aktuális és teljes [13].

Az előbbieken alapján a dolgozat egy olyan eljárást mutat be, melyben a Budapesten legelterjedtebb hagyományos mérőeszköz, az induktív hurokdetektor mérési adatait floating car adatokkal fuzionáljuk. A következőkben ezeket az adatforrásokat mutatom be részletesebben.

### 2.1.1. Induktív hurokdetektor

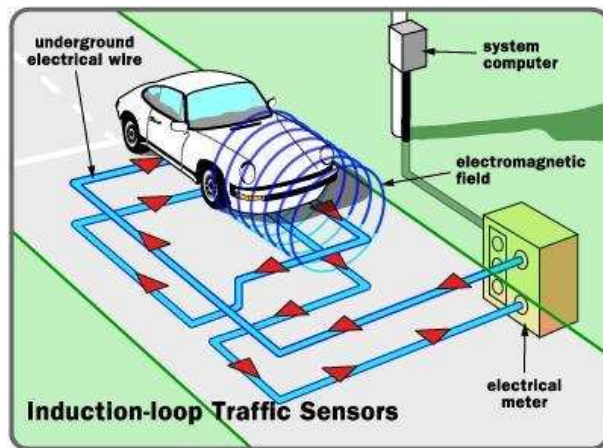
A közúti közlekedésben a járműérzékelés céljára jelenleg legelterjedtebben használt mérőeszköz az induktív hurokdetektor. Egy ilyen érzékelőt mutat a 2.1. ábra.

A szerkezet négy fő részből áll: magából az útpályába vágjt érzékelő hurokból, egy kiértékelő áramkörből, az energiaellátást biztosító tápegységből és az előbbieket összekötő kábelből. Az érzékelő hurok egy maximum 10 menetes tekercs, amibe váltakozó áramot vezetve mágneses tér indukálódik. Ha egy jármű elhalad vagy megáll a detektor felett, akkor az a mágneses teret elhangolja. Ekkor a hurokban a váltakozó áram szinuszos jelének frekvenciája és fázisa is módosul. A változások mértékéből lehet következtetni a jármű jelenlétére, valamint különböző forgalmi paraméterek értékeire. Ezt illusztrálja a 2.2. ábra.

A forgalmi mérésekhez egy adott mérőponton sávonként egy detektorra van szükség, amely a sáv közepén helyezkedik el. A mérőhurok tekercsét az útpályába vágják, szélessége jellemzően 1,5-2,5 m, hosszúsága 1-3 m, a vágjat mélysége 3-10



2.1. ábra. Hurokdetektor [fotó: Tamaskovics Gergely]



2.2. ábra. Hurokdetektor működési elve [1]

cm.

A magyar viszonyok ismeretében érdemes megjegyezni, hogy az útpálya nem megfelelő állapota esetén a detektor is könnyen sérülhet. A nyomvályúsodás, illetve az elhasználódott burkolat, valamint a nem megfelelő időjárási körülmények a detektor felgyorsuló ütemű tönkremeneteléhez vezetnek.

Hátrányai mellett azonban az induktív hurokdetektor olyan előnyökkel rendelkezik, amik miatt jelenleg ez a legelterjedtebb hagyományos mérőeszköz. Az alap forgalmi paraméterek mérésére megfelelőképpen alkalmas technológia, aminek költsége az egyéb mérési technikákhoz képest alacsony, ezenfelül a kialakítása eléggé rugalmas, így sok helyen alkalmazható [14, 18].

A hurokdetektorok (és egyben a hagyományos keresztmetszeti szenzorok) legfontosabb jellemzőit foglalja össze a 2.1. táblázat.

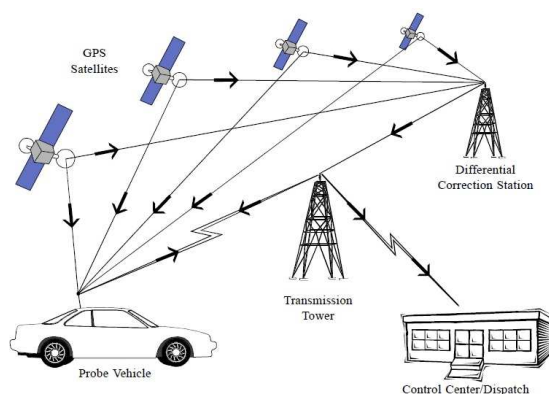
2.1. táblázat. Hurokdetektorok jellemzői [22]

<b>Hurokdetektorok (keresztmetszeti szenzorok) jellemzői</b>	
Mérhető és számítható paraméterek	forgalomnagyság
	időbeli foglaltság
	sebesség
	követési időköz
Mintavételi idő	gyakorlatilag tetszőleges
Műszaki előnyök	megbízható pontosságú mérés
	folyamatos rendelkezésre állás
Hátrány	költséges telepítés és üzemeltetés
	a költségek miatt nem alkalmas teljes hálózatok lefedésére
	nem alkalmas nagyobb térbeli kiterjedésű mérésekhez (OD-mátrix, eljutási idők, útvonalak)
	gyakori meghibásodás

### 2.1.2. Flottamenedzsment-rendszerek floating car adatai

A floating car adatok közös jellemzője, hogy a hagyományos technikák által mérhető forgalmi paramétereken túl további többlétszolgáltatásokat nyújtanak. A flottamenedzsment rendszerek fő célja, hogy az üzemeltető a cég járműveinek működési paramétereiről (pl. üzemanyag-fogyasztás) és pozíciójáról (GPS-adatok) valós idejű információkkal rendelkezzen. A járműveken elhelyezett fedélzeti egység bizonyos – pár tíz másodperces vagy perces nagyságrendű – időközönként bejelentkezik a központba, és elküldi az adatokat egy ún. időbélyeggel, ami a küldés másodpercre pontos időpontját takarja. A szenzorfüzió szempontjából a GPS-adatok sűrűsége és megbízhatósága a releváns tényező [13].

Az on-line rendszer működése során a járműfedélzeti egységek a mért adatokat meghatározott időközönként mobilhálózaton keresztül továbbítják egy központi szerver felé, ahol az adatok tárolása, valamint a kapcsolódó kommunikációs feladatok ellátása történik, mind a járművek, mind az üzemeltető felé [20]. Ezt a folyamatot szemlélteti a 2.3. ábra.



2.3. ábra. Floating car adatok továbbításának folyamata [2]

Az FCD-szenzorok jellemzőit a 2.2. táblázat foglalja össze.

## 2.2. Az adatfüzió meghatározása

Az adatfüzió nem egy konkrét technika, hanem egy olyan alapfeladat, ahol különböző információkat kell egységes formára hozni [11]. Mitchell az adatfüziót

2.2. táblázat. FCD-szenzorok jellemzői [22]

FCD-szenzorok jellemzői	
Mérhető és számítható paraméterek	pozíció időbélyeggel
	pillanatnyi sebesség
	eljutási idő
	útvonal
	honnan-hová információ
Mintavételi idő	nagyon változó, rendszerfüggő
Műszaki előnyök	megbízható pontosságú mérés
	nincs telepítési és üzemeltetési költség (általában szolgáltatás formájában megvásárolható adatok)
Hátrány	a rendelkezésre álló FCD információk nem feltétlen reprezentatívak a számosságuk miatt (nem mindig megy mindenhol FCD jármű)
	egy teljes hálózat forgalmi adatainak becsléséhez több flotta adatai is kellhetnek
	nem alkalmas forgalomnagyság adatok számítására
	buszsávban haladó közösségi járművektől és taxiktól érkező információk csak korlátozottan használhatók



az alábbi módon definiálja [19]: „Elmélet, technikák és eszközök arra a célra, hogy hogy különböző szenzor- és származtatott adatokat közös reprezentációs formára hozzunk. Szenzorfüzió során az a célunk, hogy növeljük az információ minőségét, hogy az a számunkra releváns szempontból jobb legyen, mintha az adott forrásokat külön-külön használnánk.”

## 2.3. Adatfüzió alkalmazása a közúti közlekedésben – áttekintés és célkitűzés

A különböző adatfüziós lehetőségek vizsgálata napjainkban a közúti közlekedés igen aktívan kutatott területe, melynek eszköze az esetek jelentős többségében a Kalman-szűrő, vagy annak valamilyen módosított algoritmusai.

Az adatfüzió jelenlegi alkalmazási területeiről nyújt áttekintést [8], külön hangsúlyt fektetve az intelligens közlekedési rendszerekben történő alkalmazhatóságra is. A jövőbeni kihívásokat és lehetőségeket foglalja össze [23], kiemelve, hogy jelenleg a kutatások többségében külterületi utak, jellemzően autópályák szakaszain vizsgálják az adatfüzió lehetőségét. Leggyakrabban a forgalom nagyság vagy az utazási idő előrebecslése a cél. Erre mutat be egy programozási lehetőséget autópályán [7]. Dolgozatom témájához hasonlóan, Kalman-szűrő alkalmazásával, utazási idő becslésének lehetőségét mutatta be [6], autópályaszakaszokon. Városi hálózaton tette meg ugyanezt [17], de egy másfajta módon, a kiterjesztett Kalman-szűrő egyik változatát alkalmazva. Az utazási idő mellett sebesség becslésének céljából, autópályán vetette össze többféle lehetséges eljárás teljesítményét [3].

Nem csak a bemutatott példák alapján, hanem általánosan is kijelenthető, hogy az adatfüziós kutatásoknak pusztán egy kisebb része foglalkozik a városi úthálózat vizsgálatával. Ennek két egyértelmű nehézsége az autópálya-szakaszokkal szemben az úthálózat összetettsége, valamint a jelzőlámpás forgalomirányítás zavaró hatása. Előbbi a járművek által bejárt útvonalak rekonstruálását nehezíti meg, utóbbi pedig a forgalom szabad áramlásába jelent igen komoly beavatkozást [22]. Ebből kifolyólag egy olyan egyszerű módszertan kidolgozása a cél, amelyik az úthálózat szakaszaira egyenként próbál becslési eredményeket szolgáltatni.

Az adatfüziós módszertanok ismertetése során szintén ritkábban fordul elő,

hogy a kidolgozott eljárás működőképességét többféle, valós adatforrásból származó mérési eredmény alapján mutassák be, sok esetben csak keresztmetszeti szenzorok adatait használják, mint például [10]. Dolgozatomban így arra teszek kísérletet, hogy a városi útszakaszokon kialakuló utazási idő becslésére szolgáló olyan adatfúziós módszertant ismertessek, amelynek működőképességét valós floating car adatok és valós hurokdetektoros mérések eredményei alapján tudjam bemutatni.

## 3. fejezet

# Kalman-szűrő alapú adatfúziós eljárás kidolgozása

Az előzőek alapján jelen fejezetben egy Kalman-szűrő alapú technikát, valamint annak háttérét ismertetem, mellyel városi útszakaszokon kialakuló utazási időre adhatunk becslést hurokdetektoros és floating car adatok alapján. Az első alfejezetben bemutatom az alap Kalman-szűrőt [12], majd ezt követően a kapcsolt Kalman-szűrőt, ami a dolgozat témájául szolgáló módszertan alapját adja. A szűrő leírását a kutatás korábbi szakaszában írt [11] és [22] alapján mutatom be, a következő két alfejezetben az egyenletek egyes magyarázó részeit szó szerint, illetve szó szerinti fordításban vettem át.

### 3.1. A Kalman-szűrő

Welch és Bishop [24] meghatározása alapján a Kalman-szűrő olyan matematikai egyenletek együttese, melyek segítségével rekurzív módon megbecsülhető egy folyamat állapota. A szűrő a vizsgált rendszer pontos természetének ismerete nélkül is alkalmas annak múltbeli, jelenbeli és jövőbeli állapotainak becslésére. „A lineáris Kalman-szűrő alkalmazásának feltétele a rendszer állapotterben történő felírása. Diszkrét, mintavételezett, időinvariáns folyamat állapotát az alábbi line-

áris differenciaegyenlettel írhatjuk le:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k), \quad (3.1)$$

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:

$$y(k) = Cx(k) + v(k), \quad (3.2)$$

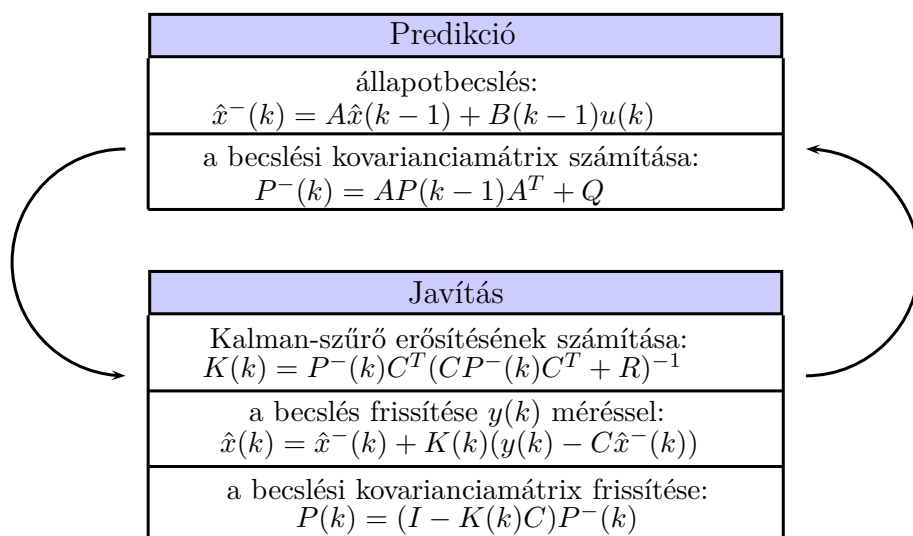
ahol  $y(k) \in \mathbb{R}^p$  a méréseket tartalmazó vektor,  $v(k)$  a mérési zaj, és  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$  a mérési együttható mátrix. A szűrő alkalmazásának feltétele, hogy  $w(k)$  és  $v(k)$  zajok nulla középértékű, Gauss-eloszlással jellemezhető sztochasztikus jelek, azaz  $Ew(k)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

$$Q = E\{w(k)w(k)^T\}, \quad (3.3)$$

$$R = E\{v(k)v(k)^T\}. \quad (3.4)$$

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 kovarianciamátrixa ( $P^-(k)$  és  $P(k)$ , amelyek a becslési hibák négyzetének várható értékét reprezentálják). A kétlépéses becslési algoritmust a 3.1. ábra szemlélteti.

Az eddig bemutatott Kalman-szűrő közvetlenül alkalmazható szenzorfüzióra. A füzió feltétele csupán az, hogy a különböző mérési zajok között nem lehet korreláció. Amennyiben feltételezzük, hogy több szenzormérés is folyamatosan rendel-



3.1. ábra. A Kalman-szűrő kétfázisos algoritmus [24]

kezésre áll, a fenti módszer a következő állapotter modellel írható fel egy városi útszakasz átlagos eljutási idejének becslésére:

$$x(k+1) = x(k) + w(k), \quad (3.5)$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k). \quad (3.6)$$

A 3.5 egyenlet a rendszerdinamikát írja le az ún. véletlen bolyongási modellel (random walk model), azaz  $A = I$  és  $B = 0$ . Ennek oka, hogy nem ismerjük az utazási idő változásának természetét, így véletlenszerű folyamatnak tekintjük. Mivel a példában csak egy darab útszakasz utazási idejét keressük,  $x(k)$  és  $w(k)$  változók skalármennyiségek. A mérési egyenletet jelentő  $y(k)$  ugyanakkor már egy egyenletrendszert ír le.  $y(k)$  mérési vektor dimenziója a mérésbe bevont szenzorok számával egyezik meg. Ha például 2 különböző szenzort feltételezünk (pl. FCD és hurokdetektor), amelyek az utazási időt mérik:

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_2(k) \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

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. Jelen példa esetén az FCD és hurokdetektoros mérések jellemző szórásából számíthatók.”

## 3.2. Az alkalmazott módszertan – a kapcsolt Kalman-szűrő

Az előző alfejezetben ismertetett alap Kalman-szűrő önmagában csak akkor lenne alkalmazható városi útszakaszokon kialakuló utazási idő becslésére hurokdetektoros és floating car adatok alapján, ha az egyes forrásokból periodikusan, szinkronban, hiánytalanul érkeznének az adatok. Amennyiben van forgalom az útszakaszon, ez a hurokdetektorról elmondható, de az FCD-ről semmiképpen sem. Olyan megoldásra van tehát szükség, amely képes kezelni azokat a helyzeteket is, amikor csak az egyik forrásból érkezik adat. Ilyen esetek kezelésére alkalmas a kapcsolt Kalman-szűrő elmélete [4], ami a dolgozatban bemutatott adatfúziós módszertan alapját adja.

A kapcsolt Kalman-szűrő tulajdonképpen egy véges számú állapotter-reprezentációval leírt, másképpen szólva több működési móddal rendelkező Kalman-szűrő. Az egyes működési módok közül az adott mérési periódus során beérkező adatok alapján választjuk ki a megfelelőt, amivel az utazási időre becslést adunk. A dolgozat témáját adó módszertan működési módjainak bemutatása előtt a kapcsolt Kalman-szűrő egyenleteit ismertetem.

„A kapcsolt, diszkrét, és lineáris állapotter leírás a 3.1-3.2 egyenletekből kiindulva:

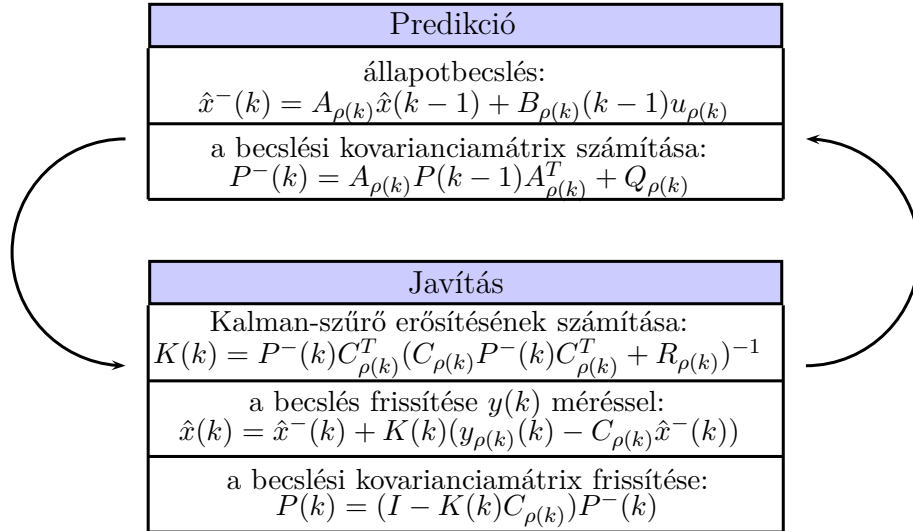
$$x(k+1) = A_{\rho(k)}x(k) + B_{\rho(k)}u_{\rho(k)}(k) + w_{\rho(k)}(k), \quad (3.8)$$

$$y_{\rho(k)}(k) = C_{\rho(k)}x(k) + v_{\rho(k)}(k) \quad (3.9)$$

$$\rho(k) \in S = \{1, 2, \dots, s\}, \quad (3.10)$$

ahol  $\rho(k)$  diszkrét kapcsolási jel, amely a rendszer működési módjára utal  $kT$  idő-

pillanatban és determinálja  $A, B, C$  rendszermátrixok és  $u, w, v$  jelek értékét.  $\rho(k)$  - időbeli változását tekintve - lehet szabályalapú vagy tetszőleges szekvenciájú. A kapcsolt Kalman-szűrő esetében is a 3.1. 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 eltérő az előzőtől:  $\rho(k) \neq \rho(k-1)$ . A módosított becslési algoritmust a 3.2. ábra szemlélteti.”



3.2. ábra. A kapcsolt Kalman-szűrő kétfázisú algoritmus [22]

### 3.2.1. Városi útszakaszok utazási idejének szenzorfüziós becslése

Az előbbieken ismertetett kapcsolt Kalman-szűrő alkalmazásával tehát lehetővé válik a heterogén adatforrásból, nem feltétlenül azonos periódusonként érkező mérési adatok fúziója. Az alkalmazás konkrét technikai részleteit mutatja be jelen alfejezet.

A kapcsolt Kalman-szűrő alkalmazásának feltétele a rendszer megfigyelhetőség-

ge, azaz:

$$\text{rang} \begin{bmatrix} C_{\rho(k)}^T \\ C_{\rho(k)}^T A_{\rho(k)} \\ \vdots \\ C_{\rho(k)}^T A_{\rho(k)}^{n-1} \end{bmatrix} = n. \quad (3.11)$$

Gyakorlati szempontból ez azt jelenti, hogy minden periódusban kell érkeznie legalább az egyik forrásból mérési adatnak. Esetünkben ez a hurokdetektor, a floating car adatok beérkezése nem kötelező. Ugyanakkor utazási időt érdemben mérni csak a floating car adatok alapján lehet, egy darab keresztmetszetben elhelyezett hurokdetektor pontos mérésre nem alkalmas, azzal csak a pontos eredményre vonatkozó következtetéseket tudunk levonni. Tehát a dolgozatban bemutatott módszertan hurokdetektoros adatai stabilan rendelkezésre állnak, de esetenként igen nagy pontatlansággal, míg a floating car adatok sokkal ritkábban érkeznek, de bizonytalanságuk lényegesen kisebb. Ilyen módon a szűrő úgy működik, hogy amíg csak hurokdetektoros adat érkezik – ami viszont mindig igaz – addig viszonylag nagyobb bizonytalansággal becsli az utazási időt. Abban a mérési periódusban viszont, amikor beérkezik egy floating car adat is, a mérés sokkal pontosabb lesz. Ilyen módon a floating car adatok egyfajta fixpontokként szolgálnak, amely fixpontok között a hurokdetektoros mérések alapján becsül a rendszer.

A kapcsolt Kalman-szűrő alkalmazásának technikai feltétele annyi, hogy mindkét adatforrásból kellő pontossággal tudjunk utazási időt becsülni. Ez a floating car adatok esetében jóformán minden további nélkül közvetlenül megoldható, a keresztmetszeti hurokdetektoros mérések esetén viszont csak közvetetten, nagyszámú szimulációs mérés lefuttatása után. A szimulációk során változatos forgalmi körülményeket létrehozva szinkronban rögzítésre kerülnek a valós detektorral egyező helyen lévő virtuális detektor által mért foglaltság és forgalomnagyság-értékek, valamint a kialakuló utazási idők. Ezek alapján lehet következtetni a valós hurokdetektor által mért adatokból a valós hálózaton kialakuló utazási időre. Az egyes forrásokból érkező adatok felhasználhatóságát lehetővé tevő módszertanokat részletesen bemutatom a következő fejezetben.

„A módszerben alkalmazható kapcsolt rendszer a [3.5-3.6](#) egyenletekből kiin-



dulva:

$$x(k+1) = x(k) + w(k), \quad (3.12)$$

$$y_{\rho(k)}(k) = C_{\rho(k)}x(k) + v_{\rho(k)}(k), \quad (3.13)$$

$$\rho(k) \in S = \{1, 2\}, \quad (3.14)$$

ahol  $x(k)$  állapotváltozó tehát az útszakasz átlagos utazási idejét jelenti.  $\rho(k)$  a kapcsolási jel, ami csak a mérési egyenletre hat.  $S$  halmaz azokat a különböző mérési kombinációkat tartalmazza, amelyeket a 3.1. táblázat mutat – a dolgozat módszertana szerint 2 különböző szenzort feltételezve (hurokdetektor, FCD).”

3.1. táblázat. A különböző mérési konfigurációk [22]

$\rho(k)$	$y_{\rho(k)}(k)$	$C_{\rho(k)}$	$v_{\rho(k)}(k)$
1	$T_1^{hurok}$	1	$\sigma_1$
2	$T_1^{hurok}$ $T_2^{FCD}$	1 1	$\sigma_1$ $\sigma_2$

Az  $y_{\rho(k)}(k)$  mérési vektorban a különböző mérőeszközök által mért utazásiidő-értékek találhatók. A  $C_{\rho(k)}$  mérési együttható mátrix egyelemű akkor, ha az adott mérési periódusban csak hurokdetektoros adat érkezett, míg ha FCD-mérés is rendelkezésre áll, akkor kételemű. A kapcsolt Kalman-szűrő a 3.1. táblázat szerint változik a  $\rho(k)$  jel függvényében, ami az adott periódusban bejövő, illetve be nem jövő adattípusok alapján ismert érték.

A  $v_{\rho(k)}(k)$  mérési zajt az egyes adatforrások mérési eredményeinek jellemző szórásából kapjuk meg. Fontos kiemelni, hogy  $v_{\rho(k)}(k)$  időben változó, például a floating car adatok alapján mért utazási idők esetén folyamatosan, az adott mérési periódushoz kapcsolódóan is változhat a szórás értéke. A bemutatott rendszerben a hurokdetektoros mérések szórásai az FCD-mérésekénél lényegesen nagyobbak, hiszen – mint arról már fentebb szó esett – a hurokdetektorokkal csak közvetetten, számítások elvégzése után következtethetünk az utazási időre [11].

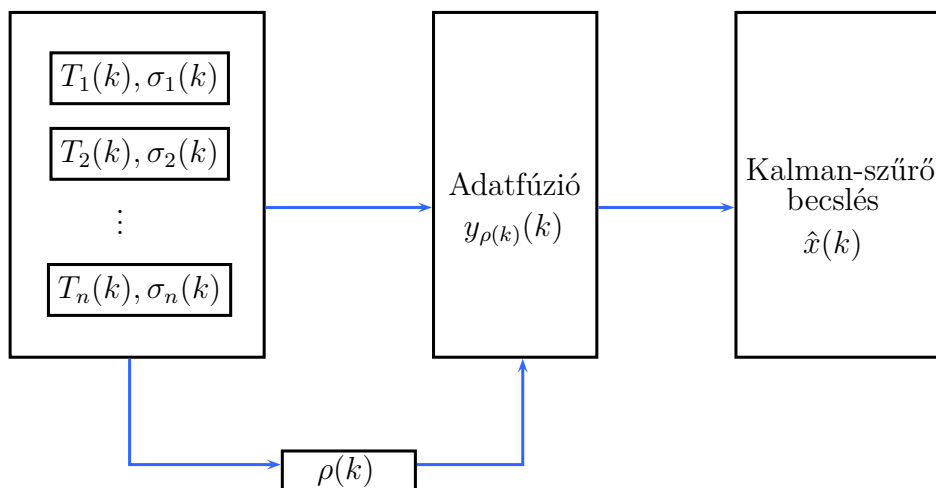
Érdemes megjegyezni, hogy a módszertan több ( $n$  db) mérőeszközre is kiterjeszhető. A 3.2. táblázat azt az esetet mutatja, amikor épp minden egyes szenzor használatban van, de természetesen itt is előfordulhatnak olyan konfigurációk, amikor csak 1, 2, 3, ..., ( $n - 1$ ) mérőeszközt használ a rendszer. Ezekben belül további

változatot jelent, hogy ha az adott számú, éppen használt mérőeszközök típusa eltér. Például  $n = 2$  esetben ez lehet hurokdetektor és FCD vagy hurokdetektor és FMD. Fontos kiemelni, hogy a hurokdetektort a felállított módszertan szerint minden mérési konfigurációnak tartalmaznia kell.

3.2. táblázat. Mérési konfiguráció  $n$  db szenzor együttes használata esetén

$\rho(k)$	$y_{\rho(k)}(k)$	$C_{\rho(k)}$	$v_{\rho(k)}(k)$
$n$	$\begin{bmatrix} T_1^{\text{szenzor}_1} \\ T_2^{\text{szenzor}_2} \\ \vdots \\ T_n^{\text{szenzor}_n} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix}$

A dolgozatban ismertetett adatfúziós becslési eljárást a 3.3. ábra mutatja.



3.3. ábra. A szenzorfüziós eljárás bloksémája városi útszakasz átlagos utazási idejének becslésére [11]

## 4. fejezet

# A módszertan kísérleti környezete

Az előző fejezetben láthattuk, hogy a gyakorlat során mért adatok kapcsolt Kalman-szűrőben való alkalmazhatóságához az szükséges, hogy egy-egy mérési periódus végén rendelkezünk az átlagos utazási időre vonatkozó adattal, valamint annak szórásával. Jelen fejezet első része bemutatja azt a szimulációs hálózatot, amin a módszertan felállítása történt. Az ezt követő részekben a kapcsolt Kalman-szűrő input adatainak megfelelő formára hozására a kutatás során kidolgozott eljárásokat mutatom be, melyekkel az egyes adatforrásokból származó utazásiidő-eredmények periódusonkénti átlag- és szórásértékei előállíthatók. A hurokdetektoros mérések esetében egy a szimulációs méréseken alapuló look-up-table felállításának folyamatát ismertetem, míg az FCD-mérések esetében egy a kutatás során kidolgozott és alkalmazott, a kívánt típusú adatokat eredményező számítási eljárást mutatok be. A módszertant egy valós budapesti mintaszakaszra vonatkozóan mutatom be, mellyel analóg módon egy nagyobb hálózat is vizsgálható, megfelelő szakaszokra bontva. A leírás jelentős részben egyezik a kutatás korábban szakaszában írt [11] cikkel.

### 4.1. A szimulációs hálózat

A kísérleti szakaszt és környékét leképező szimulációs hálózaton végzett futtatások a hurokdetektoros mérések alapján az utazási időre, valamint annak szórásértékére iránymutatást adó look-up-table felállításához szükségesek.

A szimulációs hálózatot valós budapesti helyszínen, a Villányi út és a BAH csomópont környékének leképezésével hoztam létre a Vissim mikroszkopikus forgalom-szimulációs programban. Célom a Villányi útnak a Karolina úttól a Budaörsi út/Villányi út villamosmegállóig vezető szakaszának vizsgálata volt, így a mintahálózatot ez, valamint a forgalmi áramlatát érdemben befolyásoló úthálózati elemek alkotják, a mellékutcák hatását nem vettem figyelembe. Ezt mutatja a 4.1. ábra. A vizsgált mintaszakaszt kékkel jelöltem.



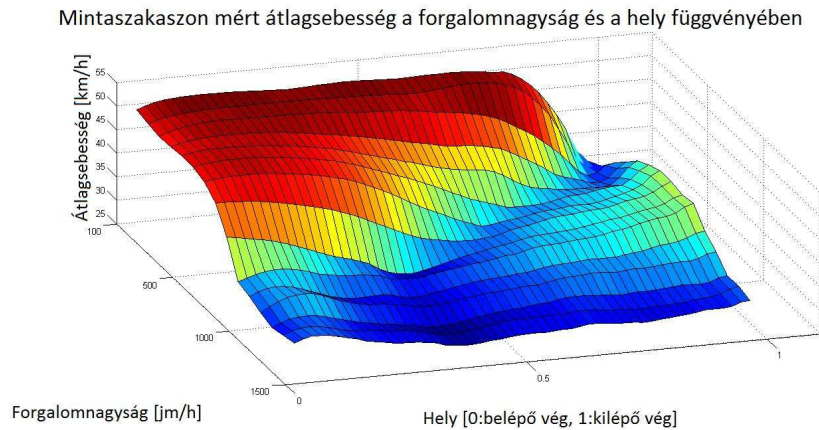
4.1. ábra. A Vissim-mintahálózat a vizsgált tesztszakasszal

A hálózat egyéb jellemzőiben is alapvetően a valós viszonyokat tükrözi. A közúti jelzőfejek programjait a valós, hétköznapi reggelként futó jelzésterveknek megfelelően állítottam be. A periódusidő minden esetben 90 s volt.

Alapesetben a hálózaton két irányban biztosított a zöldhullám: egyrészt a Karolina út felől érkező Villányi úton, másrészt a Budaörsi úton, melyek a két út találkozásánál egymással is összehangoltan működnek. Így a Karolina út felől érkezők számára egészen a BAH csomópontig biztosított a folyamatos haladás, ott viszont már megállásra kényszerülnek, mivel az ottani fázisterv a Budaörsi út felől érkezők zöldhullámához illeszkedik.

Mindez azt is eredményezi, hogy a mintaszakaszon eltöltött idő kevesebb azok számára, akik a Karolina út felől lépnek be, mint azoknak, akik a Villányi út felől. Ilyen módon a mintaszakaszon mért átlagos utazási idő a kétféle érték között lesz. A jelenségre a dolgozat későbbi részében még kitérek.

A szimulációs mérések során használt hurokdetektorokat természetesen a valós detektorok helyén vettem fel. Ezt azért szükséges kiemelni, mert egy adott szakaszon az egyes forgalmi paraméterek értékei a hely függvényében változnak, ezért fontos a mérés helyét rögzíteni. Erre mutat példát a 4.2. ábra, amin egy szakasz egyes pontjain – különböző gerjesztő forgalomnagyságok mellett – kialakuló átlagsebesség látható.



4.2. 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 mértem a forgalomnagyság, valamint a foglaltság értékét. Ezenfelül rögzítettem az utazási 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 túl nagy hibák kerülhetnek így 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 forgalomnagyság-érték 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 4.5. 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 kevéssé pontosan mérhető – segítségével meghatározható, hogy a hálózat a telítetlen (stabil), vagy a telített (instabil) állapotban van.

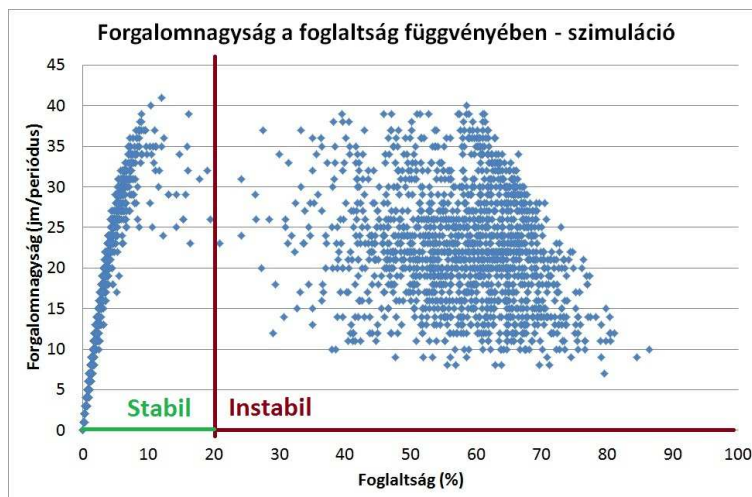
A forgalomnagyság- és foglaltságmutatók lemérése különböző szimulációs beállítások mellett történt meg, amelyekkel arra törekedtem, hogy minél többféle forgalmi helyzetet előállítsak. Alapvetően két gerjesztő paraméterrel dolgoztam: a hálózatra bocsátott forgalomnagyság változtatásával, valamint a BAH csomópontnál forgalmi zavar generálásával, illetve nem generálásával. Az egyes bemeneteken a hálózatra bocsátott forgalmak aránya minden esetben közel azonos volt, a valós helyszíni hurokdetektorok által rögzített arányokat tükrözte. A szimuláció futás közbeni képét mutatja a 4.3. ábra. Részletesebb leírás az *A függelékben* olvasható.



4.3. ábra. Mikroszimuláció futás közben

A szimulációs hálózat futtatási eredményei, illetve a valós helyszíni hurokde-

tektor mérési adatai alapján előálló forgalomnagyság-foglaltság diagramokat mutatnak a 4.4. és 4.5. ábrák. Jól látható a fundamentális összefüggés grafikonjával [9] való hasonlóság (igaz, városi környezetben).

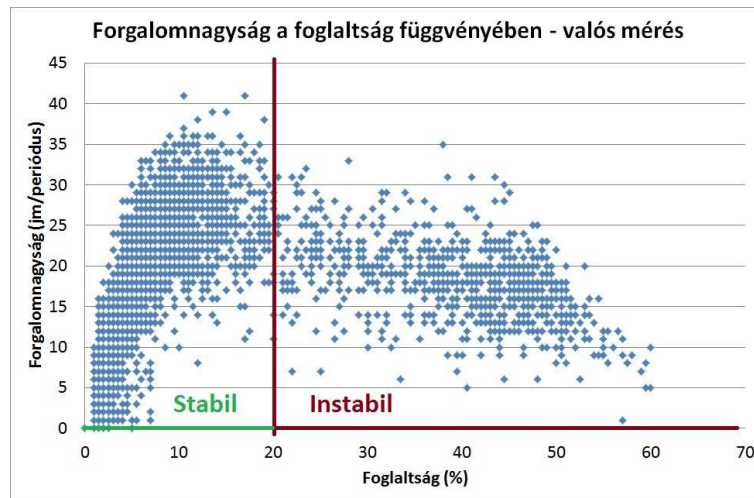


4.4. ábra. A forgalomnagyság-foglaltság diagram a szimulációs mérési keresztmetszetben

#### 4.2.1. A szimulációs és a valós eredmények eltérései

Ahogy fentebb írtam, a szimulációs hálózatot a valós viszonyokat követve hoztam létre, mégis, a 4.4. és 4.5. ábrákon látható, hogy az eredmények között eltérés tapasztalható. A differenciának két fő forrása lehet: a járművezetői modell és a valós sofőrök másfajta viselkedése, illetve a hálózati elemek szimulátorba való beépítéséből fakadó különbség. A járművezetői modell javasolt áthangolására számos kutatás, illetve tervezői direktíva készült már, például [15, 16, 21], de ezek javaslatai nem egybehangzóak. Tekintettel erre, valamint arra, hogy a Vissim természetesen egy validált szoftver, a járművezetői modell mélyreható vizsgálatától eltekintettem, az önmagában akkora kutatási téma, ami jelen dolgozat keretein túlmutat.

A mérési eredményekre legnagyobb befolyással bíró szimulációs hálózati elem maga a mérő hurokdetektor. A futtatások során kialakuló foglaltságértékek nagyban függenek a detektor hosszától, minél rövidebb, a kialakuló foglaltságértékek



4.5. ábra. A forgalomnagyság-foglaltság diagram a valós mérési keresztmetszetben

annál kisebbek (egy bizonyos határig). Ilyen minimális hosszúságú detektorokat vettem fel, ám az instabil tartományban a valós mérések során tapasztalnál magasabb foglaltságértékek alakultak ki. A vizsgálat szempontjából viszont felhasználhatóak a mérési eredmények, mivel a foglaltság mérésére csak azért van szükség, hogy a forgalmi állapot stabil vagy instabil mivoltát azonosítani tudjuk, és ezt mind a 4.5., mind a 4.4. diagram alapján meg lehet tenni.

Az igazán fontos tényező a forgalomnagyság pontos mérése. A diagramokon látható, hogy a szimulációs mérések során lényegében az összes előforduló valós állapotot sikerült előállítani. Ezenfelül előálltak olyan esetek is, amik a valóságban megfigyelt időtartam alatt nem, viszont könnyen lehet, hogy máskor ilyen előfordult (vagy a jövőben előfordulhat). Fontos kiemelni azonban, hogy az egy jelzőlámpa-periódus során áthaladt járművek száma döntő részben egyezett a valós helyszíni mérések során tapasztaltakkal. A diagramok minden forgalomnagyság-foglaltság pontpárt csak egyszer mutatnak, holott azok - főleg a szimulációk során - többször is előfordulhattak. Minél szélsőségesebb egy értékpár, annál ritkábban.

Összességében az mondható el, hogy bár vannak eltérések a valós és a modellezett adatok között, de a vizsgálat szempontjából ezek nem befolyásolnak döntően. A forgalomnagyság pontos mérése és a foglaltság tájékoztató jellegű mérése – stabil vagy instabil forgalmi állapot meghatározásához – elegendő.



## 4.3. Utazási idő becslése hurokdetektoros adatok alapján

A mérési adatok kiértékelésének célja a vizsgált szakaszra egy olyan look-up-table előállítás, amely a hurokdetektor által mért forgalomnagyság- és foglaltságértékek alapján becslést ad a szakaszon aktuális átlagos utazási időre.

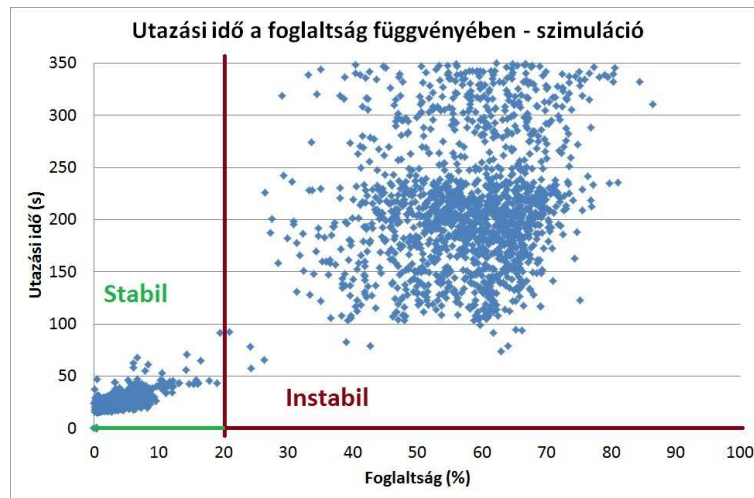
A táblázatok tartományait két lépésben határoztam meg. Először a mért foglaltságadatokat alapján determináltam a forgalmi állapot stabil vagy instabil mi-voltát, majd második lépésben a mért forgalomnagyság-értékek szerint stabil és instabil résztartományokat definiáltam. Ezek után a szakaszok minden résztartományára vonatkozóan megállapítottam az utazási idők átlagát és szórását.

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

A forgalomnagysági tartományokat – hálózati vizsgálat esetén – minden egyes szakaszra külön-külön meg kell határozni nagy mennyiségű historikus adat feldolgozásával. A kiértékelés alapja a forgalomnagyság–foglaltság, illetve az utazási idő–foglaltság diagrampár, ami az egyes vizsgált szakaszokra vonatkozóan természetesen eltérő lehet. A diagramokat a mintaszakaszra vonatkozóan a 4.4. és 4.6. ábrák mutatják.

A 4.6. diagramban megfigyelhető szakadás oka az, hogy a mintaszakaszon elő-álló utazási idő ugrásszerűen változik meg, az átmenet igen rövid ideig tart. Torló-dás kialakulása esetén a BAH csomóponttól megkezdődik a sorfelépülés a Budaörsi úton. Amint a sor eléri a Villányi utat, egyszerűen nincs lehetőségük a járműveknek a Budaörsi útra való belépésre (4.1. ábra). Ez majdhogynem teljesen diszkrét átmenet. A valós hálózaton kis számban kialakulnak köztes menetidők is, ami szintén a szimulátor és a valóság járművezetői magatartása közti különbségekkel magyarázható.

Ahogy arról már szó esett, a diagramok szétbonthatók egy stabil és egy instabil tartományra, attól függően, hogy a hálózat telített-e. A stabil és instabil tartományok elválasztását a mért utazási idők alapján lehet megtenni. Látható (4.6. ábra), hogy az utazási idők a foglaltság növekedésével párhuzamosan egy ideig kismérték-



4.6. ábra. Az utazási idő-foglaltság diagram a szimulációs mérési keresztmetszetben, 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.

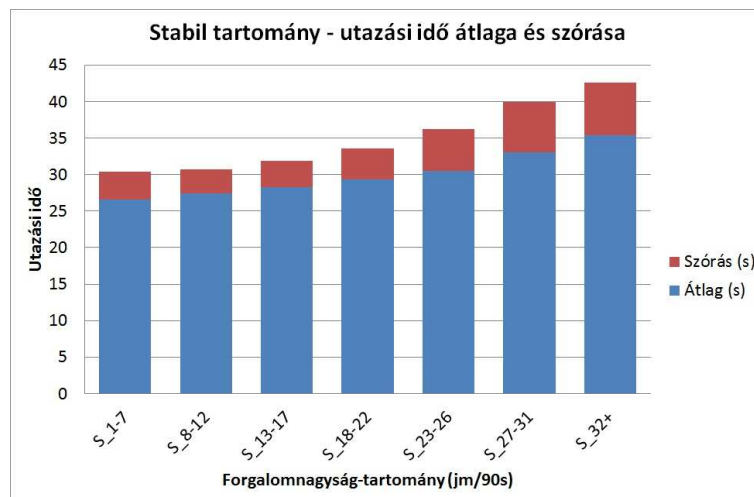
### 4.3.2. A stabil és instabil résztartományok meghatározása

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

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

Annak érdekében, hogy egy-egy kiugró mérés ne okozzon bizonytalanságot, a rendszer felállításakor eltávolítottam az extrém adatokat, ahol az utazási idő túlságosan eltért a résztartományban számított átlagos utazási időtől. Ezen törölt adatok a résztartomány utazásiidő-adatainak maximum az alsó és felső 2-2%-át tehetnék ki. A hibás mérések adatait (4.6. ábra, 0 s-os utazási idők) szintén töröltem. Ezen előkészítő lépések után határoztam meg a kategóriákba tartozó mérések esetén mért utazási idők átlagát és szórását.

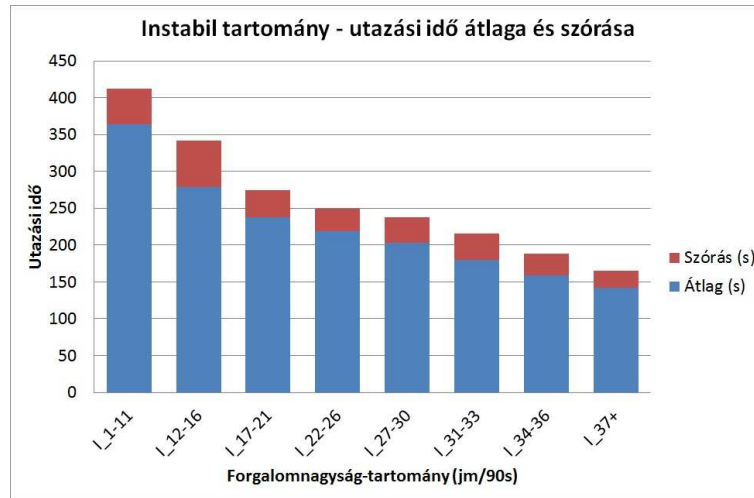
A 4.7. és 4.8. ábrákon láthatók a mintaszakasz stabil és instabil tartományainak végleges résztartományai, illetve a hozzájuk rendelt átlag utazási idők és azok szórásai. A részletes táblázat a *B függelékben* található. Ahol a szórás átlaghoz viszonyított értéke túlságosan is nagy, ott a look-up-table által szolgáltatott érték inkább csak iránymutatásként értelmezendő, mivel a bizonytalanság mértéke jelentős.



4.7. ábra. A mintaszakasz stabil tartományának résztartományai

## 4.4. Utazási idő becslése floating car adatok felhasználásával

A felállított módszertant valós floating car adatok alapján dolgoztam ki, a teszterület összesen 16 napi logolási adatait felhasználva, 2012. szeptember 3-11.



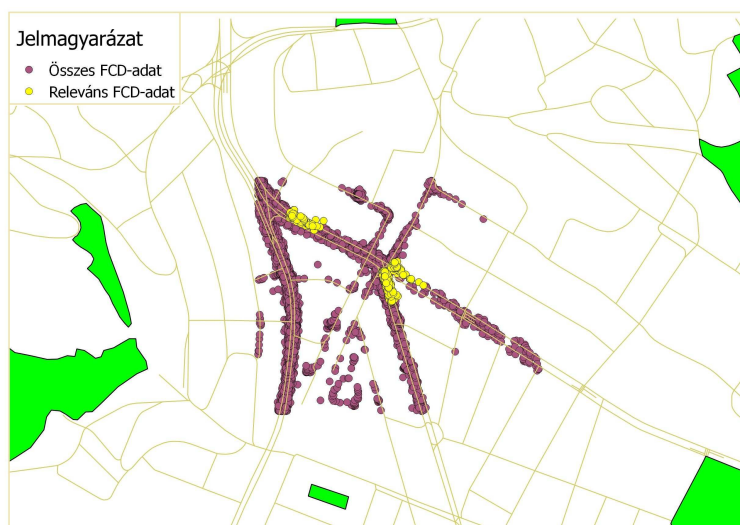
4.8. ábra. A mintaszakasz instabil tartományának résztartományai

és 2012. október 22-28. között. Az adatokat az iData Kft. bocsátotta rendelkezésre. A rögzített bejelentkezési pontokat lilával jelölve mutatja a 4.9. ábra. Látható, hogy ez a mintaszakaszt teljesen lefedi. A vizsgálat szempontjából a mintaszakaszra történő be- és kilépési zónákban található, sárgával jelölt pontok a relevánsak, ezekről később lesz szó részletesen.

Egy-egy bejelentkezéskor eltárolásra kerül a bejelentkezés pontos ideje, GPS-koordinátái, a jármű azonosítója és sebessége, illetve egyéb, a vizsgálat során nem figyelembe vett jellemzők. Ezek alapján dolgoztam ki a módszertant, kiegészítve azzal a feltételezéssel, hogy a járművek legalább 5 másodperces időközönként bejelentkeznek. Ezek alapján meghatározható a releváns floating car adatok tartománya, melyet a fenti ábrán sárgával jelölve láthatunk. Feltételezve, hogy a járművek maximális sebessége 50 km/h, a ki- és belépési tartományok hossza a jelzőlámpától visszafelé számított 70 m, mivel:

$$\frac{50 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \cdot 5 \text{ s} \approx 70 \text{ m}. \quad (4.1)$$

Cél a haladás során a szakasz belépő és kilépő végénél lévő jelzőlámpák vonalának érintése között eltelt  $t_0$  idő megbecsülése. A bizonytalanságot az okozza, hogy a bejelentkezési pont csak ritkán fog pontosan egybeesni a szakasz valamely vég-



4.9. ábra. A módszertan kidolgozásához felhasznált adathalmaz

pontjával. Ilyen módon a szakasz belépő és kilépő végénél fellép egy-egy  $t_1$  és  $t_2$  bizonytalansági idő, melyek a járműnek a jelzőlámpa előtti utolsó bejelentkezése és a jelzőlámpa előtti tényleges elhaladás között eltelt időt jelentik. Ezekről annyit tudunk, hogy:

$$t_1 < t_{log} \quad (4.2)$$

és

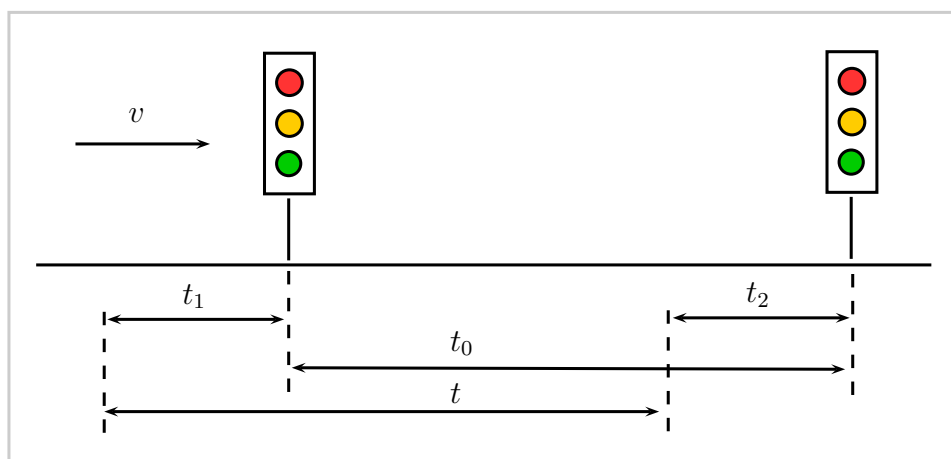
$$t_2 < t_{log}, \quad (4.3)$$

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

$$t_0 < t - t_1 + t_2. \quad (4.4)$$

A meghatározás folyamatát szemlélteti a 4.10. ábra.

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



4.10. ábra. A mért és valós utazási-, illetve bizonytalansági idők

esetet feltételezve a bejelentkezések térbeli eloszlását – a valós adatok eloszlásánál számunkra kedvezőtlenebb – egyenletes eloszlásúnak tekintjük, amivel a biztonság irányába tévedünk.

Általánosan az  $[a, b]$  intervallumon vett egyenletes eloszlás szórása:

$$\sigma = \frac{b - a}{\sqrt{12}}. \quad (4.5)$$

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

$$\sigma = \frac{t_{log}}{\sqrt{12}} = \frac{5s}{\sqrt{12}} = 1,443s. \quad (4.6)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{t_{log}^2}{12} + \frac{t_{log}^2}{12}} = \sqrt{\frac{(5s)^2}{12} + \frac{(5s)^2}{12}} = 2,04s. \quad (4.7)$$

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

## 5. fejezet

# A módszertan gyakorlati alkalmazási kérdései

Ebben a fejezetben az eddig ismertetett, elméleti úton kidolgozott módszertanba illeszttem bele a valós mérési adatokat. Az FCD-mérések alapját a már említett iData-adatok adják, míg a hurokdetektorok esetében a vizsgált szakaszt üzemeltető BKK Közút valós detektoros mérési eredményeit veszem figyelembe. A fejezet első felében az adatforrások gyakorlati felhasználhatóságával kapcsolatos feladatokat mutatom be, míg a második részben az alkalmazott kapcsolt Kalman-szűrő konkrét paramétereit ismertetem.

### 5.1. A rendelkezésre álló adatállomány problémája

A gyakorlati alkalmazást megnehezíti, hogy a rendelkezésre álló adatforrások nem azonos időben mért eredményeket tartalmaznak. Az FCD-mérések 2012. szeptember 3-11, illetve 2012. október 22-28. között készültek, míg a hurokdetektoros adatok a 2013. szeptember 2-10, illetve a 2013. október 21-27. közötti időtartamokban. Ezenfelül a használhatónak bizonyult FCD-mérések meglehetősen ritkásak, a legnagyobb adatsűrűség 4-5 rekord óránként. Ilyen módon a direkten, klasszikus módon történő fúzióknak két gátja is fellép, ezért ezt a lehetőséget elvetettem.

A rendelkezésre álló floating car adatok arra elegendőek, hogy létre lehessen

hozni egy átlagos hétköznap reggel 5:00-10:00 közötti forgalmi lefolyás rekonstrukcióját. Első lépésben hurokdetektoros adatokból kiválasztottam egy keddi reggel, 2013. szeptember 3. 5:00-10:00 közötti adatait. Ezután ezekből meghatároztam, hogy a forgalom állapota melyik időintervallumban volt stabil és melyikben instabil, valamint kijelöltem a kettő közötti átmeneti tartományokat is. Második lépésben a 16 napra összesen rendelkezésre álló, használhatónak minősülő FCD-mérési adatot is besoroltam stabil, instabil, illetve a kettő közötti átmeneti kategóriába. Harmadik lépésben véletlenszerűen párosítottam az azonos kategóriákban lévő hurokdetektoros és floating car adatokat. Kiindulásként a hurokdetektoros mérések véletlenszerűen kiválasztott feléhez (tehát nem rendezetten minden második elemhez) párosítottam floating car adatot, másik feléhez nem, utóbbival modelleztem azt az állapotot, amikor csak detektoros mérés áll rendelkezésre. Stabil kategóriába eső hurokdetektoros méréshez a stabil, átmenetihez az átmeneti, instabilhoz az instabil kategóriába eső FCD-mérések közül rendelttem hozzá véletlenszerűen egy értéket.

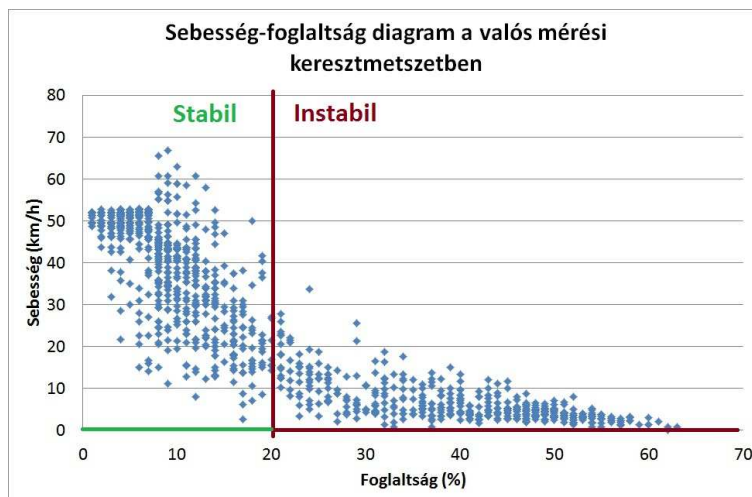
A következő alfejezetekben a folyamatok részleteit mutatom be, ahol szükséges, kitérve arra is, hogy az előző fejezetben bemutatott eljárás alkalmazhatósága érdekében milyen adatfeldolgozási lépéseket tettem meg.

## 5.2. A hurokdetektoros adatok felhasználása

A helyszínen lévő hurokdetektor 90 másodperces időközönként méri a forgalomnagyság-, foglaltság- és sebességértékeket. A look-up-table alkalmazásához az első két tényező ismerete elég, a harmadik segítségével pedig egy becslést kapunk arra vonatkozóan, hogy mekkora volt a torlódás mértéke, illetve volt-e egyáltalán torlódás. A három mért adat historikus összegzése után előállíthatók a mintaszakaszon valós mérési keresztmetszetében kialakult valós forgalomnagyság-foglaltság és sebesség-foglaltság diagramok, előbbit már láthattuk a 4.5. ábrán, utóbbit pedig az 5.1. ábra mutatja. A stabilitás-instabilitás határát jelen esetben a foglaltság-sebesség diagramról tudjuk leolvasni, ami a vizsgálat szempontjából megfeleltethető a szimulációs vizsgálatok során kimért utazási idő-foglaltság diagramnak (4.6. ábra). A teljesen szabad áramlást jelző, közel 0%-tól körülbelül 20%-os foglaltság-értékig a sebesség egyenletesen csökken, a magasabb értékeknél pedig stagnál. Ez



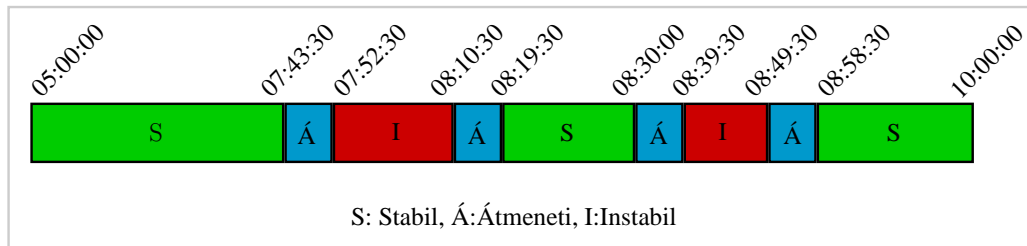
alapján megállapítható, hogy ez az érték a stabilitás határa a valóságban, ezt kell határértékként figyelembe venni a hurokdetektoros adatoknak a look-up-table tartományaiba történő besorolásakor. Ez egyezik a korábban (4.5. ábra) megállapított értékkel.



5.1. ábra. Sebesség-foglaltság diagram a valós mérési keresztmetszetben

Megjegyzendő, hogy a stabilitás-instabilitás határa nem szükségszerűen esik egybe a valós és a szimulációs mérések során, de ez nem is probléma, hiszen a határvonal megállapítása csak annyi célt szolgál, hogy a forgalmi áramlat stabilitásáról képet kaphassunk. Ezzel szemben a forgalomnagyságot már pontosan kell mérni, ahogy arról korábban is szó esett. Érdeemes megemlíteni ezenfelül azt is, hogy a valós mérési keresztmetszetben mért sebesség és az utazási idő szorzata csak akkor adja ki a szakasz hosszát, ha a mérés keresztmetszetében mért sebesség egyezik a szakaszon kialakuló térbeli átlagsebességgel. Ennek esélye igen kicsi. A keresztmetszeti sebesség a szakasz különböző részein eltérő, ezt mutatta a dolgozat korábbi részében a 4.2. ábra.

A leírtak alapján tehát egy mérési periódusra vonatkozóan első lépésben összeadjuk a mérési keresztmetszetben lévő hurokdetektorok adatait (feltéve, hogy nem hibásak): a forgalomnagyság-értékeket összeadjuk, a foglaltságértékeket pedig ki-átlagoljuk. Második lépésben a kiátlagolt foglaltságérték alapján meghatározzuk, hogy a forgalom állapota a stabil (ha az érték kisebb 20%-nál) vagy az instabil (egyéb esetben) tartományba esik éppen. Ezután a táblázatból kiolvassuk az átla-



5.2. ábra. A forgalmi áramlat alakulása a tesztidőszak alatt

gos utazási idő és a hozzá tartozó szórás értékét. Harmadik lépésben manuálisan kijelöljük az átmeneti tartományokat, melyeket ott vettem fel, ahol a forgalom állapota stabilból instabilba vált. A váltást megelőző és követő 3-3 periódus (tehát 4,5 - 4,5 perc) állapotát minősítettem átmenetivé. Utóbbi tulajdonképpen technikai szempontból fontos, hogy a stabil és az instabil tartományok közötti ugrásszerű változást kezelni lehessen. Mindez összefügg a valóságban tapasztaltakkal: a stabil és az instabil állapot között van egy rövid ideig tartó átmenet, ami pontosan nem definiálható.

A kiválasztott, 2013. szeptember 3-án 05:00 és 10:00 között mért eredmények alapján — az átmeneti tartományok kijelölése után — a forgalmi állapot az 5.2. ábrán látható módon alakul.

### 5.3. A floating car adatok felhasználása

Ahogy arról korábban már szó esett, a floating car adatok a számunkra releváns szempontból bizonyos időközönkénti bejelentkezések sorozataként tekinthetők, melynek során ismerjük a bejelentkezés helyét és idejét. Egy fedélzeti berendezéssel felszerelt jármű mérési adatai a vizsgálat szempontjából akkor értékelhetőek, ha történt bejelentkezés valamely belépési tartományon és a kilépési zónában is. A dolgozat korábbi szakaszára visszatekintve a 4.9. ábra sárgával jelölt logolási pontjai azok, amik releváns adatként szóba jöhetnek, ezek fekszenek a szakasz belépési és kilépési pontjain található jelzőlámpák vonalai előtt 70-70m-re (a vonatkozó számítást lásd a korábbi részben). Azonban a ténylegesen felhasználható adatok köre ennél sokkal szűkebb. Egy jármű a rendelkezésre álló 16 napos mérések során többször is megtehetette ugyanazt az utat, ilyen módon előfordulhat, hogy a

szakaszra történő be- és kilépési bejelentkezések két különböző végighaladás során lettek rögzítve. A vizsgált mintaszakasz hossza nagyjából 260 m, így az 5 percet meghaladó utazásiidő-értékeket nem vettem figyelembe a továbbiakban.

Előfordulhat, hogy piros lámpánál várakozás közben egy jármű többször is bejelentkezik, amíg a be- vagy a kilépési zónákban tartózkodik. Ilyen esetekben mindig a legkésőbbi bejelentkezési adatot vettem figyelembe.

Összefoglalva az alábbi adatszűrési lépéseket tettem meg a térbeli szűrés után relevánsnak minősített bejelentkezési adatokkal (4.9. ábra):

1. A kilépő zóna adatainak járműazonosítóit egyenként (automatizált módon) átnéztem, hogy szerepelnek-e akár a Villányi úti, akár a Karolina úti belépési zónában. Amikre ez nem volt igaz, azokat az adatokat töröltem.
2. A Villányi úti és Karolina úti belépő zónák járműazonosítóit egyenként (automatizált módon) átnéztem, hogy szerepelnek-e a kilépési zónában. Amikre ez nem volt igaz, azokat az adatokat töröltem.

Az így megmaradó adatokat a követő lépések során napi bontásban vizsgáltam, ezzel csökkentve az olyan esetek számát, amikor a ki- és a bejelentkezés külön-külön utazásokhoz tartozik.

3. Összerendeltem – napokra lebontva – az egy gépjárműhöz tartozó összes ki- és bejelentkezési adatot.
4. Amennyiben a belépési vagy a kilépési oldalon több adat is szerepelt, és azok között csak pár másodperc telt el, úgy a korábbi időpontra vonatkozó adatot (vagy adatokat) töröltem. Ezzel egyrészt minimalizáltam a jelzőlámpánál történő várakozásból eredő bizonytalanságot, másrészt pedig minden járműre vonatkozóan megtaláltam a kilépés fixnek tekintett időpontját (vagy időpontjait).
5. Az egy járműre vonatkozóan megmaradó fixnek tekintett kilépési adatok mindegyikéhez – amiből ehhez a lépéshez érve egy napra vonatkozóan 3-nál több már egy esetben sem volt – hozzárendeltem az összes, még ki nem törölt belépési időpontot.

6. A kilépési fixpontok időbélyegének idejéből kivontam az összes hozzá rendelt belépési pont időbélyegének idejét. A kilépési pontot a hozzá rendelt belépési pontok közül azzal párosítottam össze, melyre igaz volt, hogy a két idő különbsége minimális, de nem negatív. (Ekkor feltételezhetően az ellenkező irányba ment a jármű.) Ezáltal minden kilépési fixponthoz hozzárendeltem a belépési fixpontot.
7. Ha a kilépés és a belépés között 5 percnél több idő telt el — tekintve, hogy a vizsgált útszakasz hossza kb. 260 m, ez azt jelentené, hogy a jármű átlagsebessége kisebb, mint 1 m/s — a pontpárt töröltem.

A szűrési kritériumokat a 16 vizsgált nap adataiból összesen 212 db pontpár teljesítette, ami a fejezet elején ismertetett megfontolásokat figyelembe véve 212 db FCD-alapú utazásiidő-értéket jelent, a továbbiakban ezekből dolgozom.

### **5.3.1. A floating car adatok korrekciója**

A dolgozat korábbi részében szó esett róla, hogy a mintaszakaszra a Karolina út felől belépők zöldhullámban, zavartalan forgalmi állapot esetén megállás nélkül tudnak végighaladni az útszakaszon, míg a Villányi út felől belépők a reggeli csúcsidőben nagyjából 12 másodperces várakozásra kényszerülnek a szakasz kilépő végénél található jelzőlámpánál. (Az érték a helyszíni mérések és a Vissimben végzett szimulációk alatt lényegében megegyezett.) Ilyen módon a szakaszon kialakuló átlagos utazási idő úgy jön létre, hogy a Karolina út felől érkező járművek ennél mindig gyorsabban, a Villányi út felől érkezők pedig lassabban tudnak végighaladni az útszakaszon. Ezt fogják tükrözni az FCD-mérések is. Ekkor viszont a hurokdetektoros mérésekre kidolgozott look-up-table eredményeihez képest megtévesztő képet kapnánk. Szükséges tehát a beérkező FCD-mérések korrekciója, amit helyszíni mérések alapján tettem meg munkanapi reggeli csúcsidőben, ami a tesztidőszakkal egyezik.

Céлом az volt, hogy meghatározzak egy-egy számértéket, amivel a Karolina útról indulók értékeit növelni, a Villányi útról indulókét pedig csökkenteni szükséges. A tényezők kiszámításánál két mutatót vettem figyelembe: egyrészt a Villányi útról érkezők utazási idejének többletét a Karolina útról érkezőkéhez képest, más-

részt pedig a két ág forgalomnagyságát. A számítás során a forgalomnagyságok arányában osztottam szét a két irány között a valóságban a csak a Villányi út felől érkezőket sújtó várakozási időt. A szétosztást úgy végeztem el, hogy az összes jármű együttes, összegzett eljutási ideje változatlan maradjon.

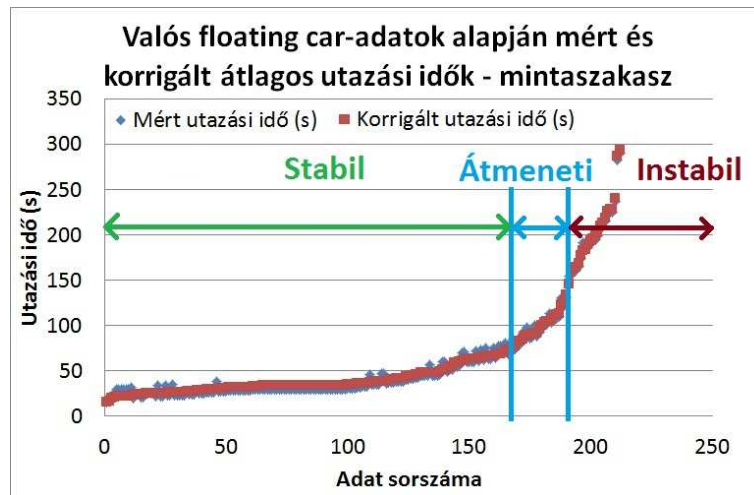
A számításhoz a helyszínen reggeli csúcsidőben mért eljutási időket, illetve a valós hurokdetektorok által szolgáltatott forgalomnagyság-adatokat vettem alapul. A mért eljutási időket és forgalomnagysági arányokat mutatja az 5.1. táblázat. Érdeemes megjegyezni, hogy a táblázatban szereplő átlag figyelembe vétele elvben erős torzítást okozhat, de jelen esetben a két átlagérték különbsége a releváns tényező, ami viszont a mérések során minden forgalmi körülmény között közel állandó volt.

5.1. táblázat. Helyszíni mérések eredményei

Belépő szakasz:	<b>Karolina út</b>	<b>Villányi út</b>
Átlagos eljutási idő (s):	178,6	190,4
Forgalomnagyság aránya:	2,4	1

Látható, hogy a két irány eljutási ideje közti különbség 12 s, ezt osztottam szét a Villányi úti és Karolina úti áramlatok közötti 1 : 2,4 forgalomnagysági arányokat alapul véve. Ilyen módon a Karolina útról belépő járművek FCD-méréseihez  $12 \cdot \frac{1}{1+2,4} \approx 3,5$  másodpercet adtam hozzá, míg a Villányi útról érkezőkéből  $12 \cdot \frac{2,4}{1+2,4} \approx 8,5$  másodpercet vontam le. A korrekciótól eltekintettem, amennyiben a levonás után az utazási idő valószerűtlenül kicsi értéket vett volna fel. Mivel a két belépési zóna egymáshoz közel esik, ráadásul a két áramlat találkozása után egy vasúti híd is – melynek zavaró hatása jelentős – keresztezi az utat, előfordulhatott helymeghatározási hiba.

A módszer finomítható azzal, ha a különböző napszakokra különböző korrekciós tényezőket állapítunk meg, azonban ettől a rendelkezésre álló kis számú adat miatt eltekintettem. Megjegyzendő továbbá, hogy a végül alkalmasnak minősülő, 16 teljes nap során rögzített 212 FCD-rekordból 164 esetben a Karolina út volt a kiindulópont és 48 esetben a Villányi út. Ez 3,41:1 arányt jelent. Ugyanakkor pusztán a flottamenedzsment-rendszerek járművei a teljes sokasághoz képest nem képviselnek reprezentatív mintát, ezért ettől eltértem.



5.3. ábra. Mért és korrigált eljutási idők

### 5.3.2. A floating car adatok tartományokba sorolása

Az FCD-méréseket a korrigált értékek alapján soroltam be stabil, instabil, valamint a kettő közötti átmeneti tartományba. A kategóriaképzéshez nagyság szerint sorba állítottam az FCD-mérések alapján számolt, majd korrigált eljutási időket. Ezt mutatja az 5.3. ábra, melyen feltüntettem az eredeti, korrekció nélküli adatokat is.

A korrigált eljutási időket pirossal, az eredeti mérési eredményeket késsel jelöltem. A piros pontsorozat fölött elhelyezkedő kék pontok a Villányi útról belépő járművek adatai, míg az alatta lévők a Karolina útról érkezőké.

A stabil, instabil és átmeneti tartományokat grafikus úton jelöltem ki. Látható, hogy az esetek nagy többségében az utazási idő 70 s alatt marad, ezt minősítettem stabil tartománynak. Megfigyelhető a 150 s-os eljutási idő környékén egy szakadás, így az e fölötti értékeket soroltam az instabil kategóriába. A köztes tartományt tekintettem átmenetinek, melynek a hurokdetektoros mérések kategóriába sorolásához hasonlóan technikai szerepe van, az ugrásszerű stabil-instabil váltást simítja valamelyest.

## 5.4. Az alkalmazott kapcsolt Kalman-szűrő

A kapcsolt Kalman-szűrőt a MATLAB numerikus matematikai szoftverben programoztam le a korábban bemutatott elméleti háttér alapján. Az 5.2. táblázatban összefoglalva látható, hogy a csak hurokdetektoros, illetve a kombinált FCD-hurokdetektoros üzemmódban hogyan alakul az egyes változók mérete.

5.2. táblázat. A változók méretének alakulása az egyes mérési konfigurációk esetén

Változó neve	Változó jelentése	Méret	
		Hurok ( $\rho(k) = 1$ )	Hurok+FCD ( $\rho(k) = 2$ )
x	a keresett átlagos utazási idő	$1 \times 1$	$1 \times 1$
P	a becslési hibák négyzeteinek várható értéke	$1 \times 1$	$1 \times 1$
Q	az állapotdinamikai egyenlet hibája	$1 \times 1$	$1 \times 1$
K	a Kalman-szűrő erősítése	$1 \times 1$	$1 \times 2$
C	a rendszer állapotmátrixa	$1 \times 1$	$2 \times 1$
R	a mérési egyenlet hibája	$1 \times 1$	$2 \times 2$
y	a mérési értékek	$1 \times 1$	$2 \times 1$

Az  $x, P, K$  és  $y$  változókra nincs közvetlen ráhatásunk,  $y$  a szűrő működése során periódusonként újra bekért,  $x, P$  és  $K$  pedig folyamatosan újraszámított értékek. Ezzel ellentétben magunk határozhatjuk meg  $C, Q$  és  $R$  értékét, utóbbi kettővel a szűrő behangolását végezhetjük el [24]. Ezen mátrixok értékeit [4] állítása alapján állítottam be. Eszerint  $R$  értéke minél kisebb, a Kalman-szűrő annál inkább elfogadja a mérést, és  $Q$  értéke minél kisebb, annál inkább elfogadja a becslést.

Az  $R$  mátrix – ahogy arról korábban már szó esett – a különböző mérési konfigurációk bemeneti adatainak szórásait tartalmazza. Az 1-es (csak hurokdetektoros) mérési konfigurációban:  $R = [\sigma_{hurok}^2]$ , míg a 2. (hurokdetektoros és FCD-s) esetben:  $R = \begin{bmatrix} \sigma_{hurok}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{FCD}^2 \end{bmatrix}$  diagonális mátrixot alkalmaztam. A szórásértékeket az egyes periódusokban a korábban bemutatott metódusok alapján tudjuk előál-

lítani, melyek tehát minél nagyobbak, a mérés annál bizonytalanabb, így annál kevésbé fogadja el a Kalman-szűrő, és annál inkább a becslést veszi magasabb súllyal figyelembe.

A  $Q$  mátrix esetünkben mindkét mérési konfigurációban egy elemű. Tudjuk, hogy ha van beérkező FCD-mérés, az nagy pontosságú, így ekkor az a célunk, hogy a Kalman-szűrő inkább a mérést fogadja el.

A leírtakat figyelembe véve a szűrő kézi hangolására érdemi lehetőségünk a  $Q$  értékének változtatásával van, erre mutat példát a következő fejezet, ahol a szűrő, illetve a dolgozatban bemutatott módszertan működését ismertetem.



## 6. fejezet

# Az utazási idő becslésének megvalósítása

Az utazási idő becslését a már ismertetett módon, valós hurokdetektoros és FCD-mérések alapján létrehozott környezetben mutatom be. 2013. szeptember 3-ai hurokdetektoros adatok képezték a kiindulópontot, melyek alapján meghatároztam a forgalom aznap 05:00-10:00 közötti stabil és instabil fázisait, illetve kijelöltem a köztük lévő átmeneti tartományokat (5.2. ábra). Ezt követően a 2012. szeptember 3-11., illetve 2012. október 22-28. közötti floating car adatokat soroltam stabil, instabil és átmeneti kategóriákba. Harmadik lépésként a hurokdetektoros adatok meghatározott arányához sorsoltam FCD-mérési adatokat, melyek stabilitási kategóriája egyezett az adott detektoros mérés stabilitási tartományával. Ilyen módon előállítottam az adatfúziós módszertan alapját képező kapcsolt Kalman-szűrő bemeneti adatait. A tesztkörnyezet valóság-hű mivoltát 2014 őszén, stabil és instabil forgalmi körülmények között személyesen mért utazásiidő-értékek segítségével szemléltetem. Az egyes stabilitási kategóriákba eső értékeket az FCD-mérésekhez hasonlóan sorsolással rendeltem az adott kategórián belül véletlenszerűen kiválasztott hurokdetektoros adatokhoz. Ezzel támpontot kapunk arra vonatkozóan, hogy a hurokdetektoros és FCD historikus adatokból rekonstruált események valóban megtörténhettek-e, ezzel egyben a szűrő és az adatfúziós módszertan működésének helyességét is alátámasztva.

A helyszíni utazásiidő-mérések adatait az FCD-mérések során alkalmazott,

az 5.1. táblázat szerint számolt korrekciós tényezőkkel módosítva vettem figyelembe.

Az utazási idő becslésének megvalósításához szükséges a Kalman-szűrő behangolása. Erre a különböző működési módok során alkalmazott  $Q$  értékek megfelelő megválasztása ad módot. A csak hurokdetektoros beérkező mérés üzemmódjában a  $Q_{hurok}$ , míg az FCD és hurokdetektoros mérések együttes beérkezése esetén alkalmazott üzemmódban a  $Q_{FCD+hurok}$  jelöléseket használom a továbbiakban. Célom a mérési környezet felállítási módjából fakadóan nem lehet a  $Q$  értékek egzakt megadása, csak a paraméter megfelelő nagyságrendjének meghatározása. Különböző útszakaszokon ráadásul különböző eredményeket is kaphatunk, melyeknek a nagyságrendje viszont nagy valószínűséggel egyezik. Általánosan igaz, hogy a  $Q$  érték növelésével a szűrő egyre gyorsabban fog reagálni, szemléletesen megfogalmazva: egyre inkább csak a mérési pontokat „köti össze” [4, 24].

Elsőként a  $Q_{hurok}$  paramétert hangoltam be, majd miután ennek megtaláltam a megfelelő nagyságrendjét, akkor végeztem el a  $Q_{FCD+hurok}$  beállítását.

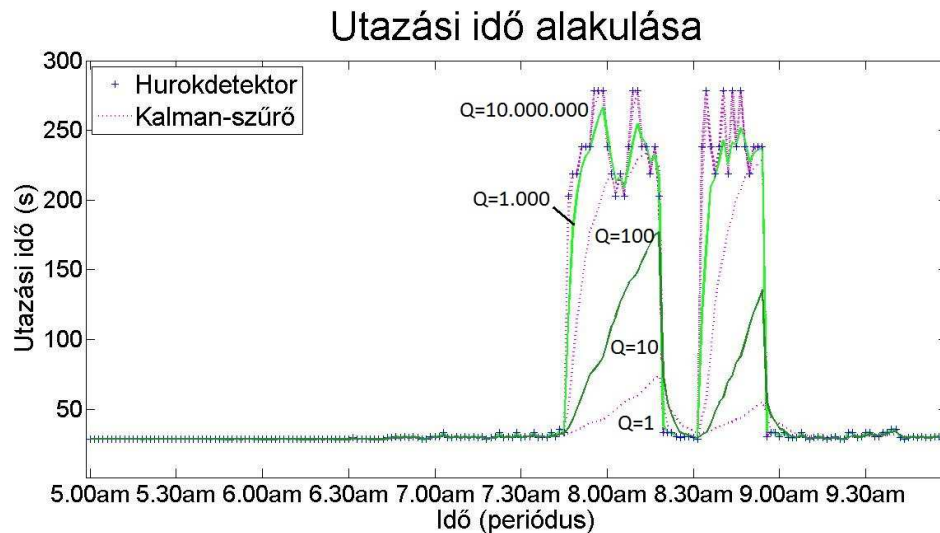
## 6.1. A csak hurokdetektoros üzem behangolása

A csak hurokdetektoros üzem behangolása során az eltérő forgalmi körülményekre vonatkozóan eltérő nagyságrendű  $Q_{hurok}$  érték bizonyult optimálisnak. Ez az előző fejezetben megállapított konstans érték helyett valamilyen adaptív paraméter használatát teszi indokolttá. Az alfejezet első része az optimális nagyságrendek meghatározását mutatja be, míg a második az adaptív paraméter előállítási módját ismerteti.

### 6.1.1. Az optimális nagyságrendű hangolási paraméter meghatározása

A helyes nagyságrendűnek vélt  $Q_{hurok}$  hangolási paraméter megtalálásához kezdeti próbákat végeztem el a tesztkörnyezetben  $Q = 1, 10, 100, \dots, 10.000.000$  értékekkel, hogy a paraméter változásának hatása egyértelműen látható legyen. Ez alapján meg tudtam állapítani, hogy melyik az a tartomány, ahol a paraméter változtatása releváns hatással bír. A próbák eredményei azt mutatták, hogy a sta-

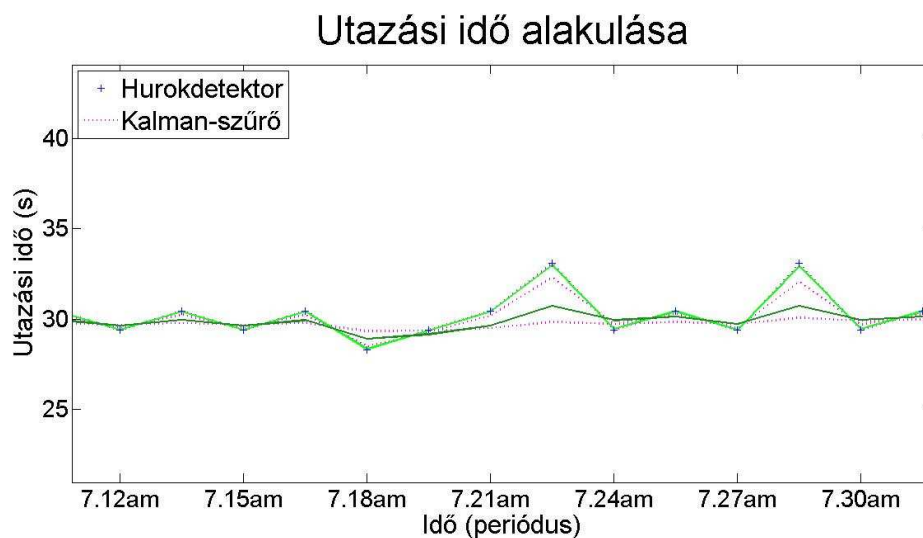
bil és az instabil forgalmi körülmények között eltérő nagyságrendű  $Q$  paraméter használata indokolt. Stabil forgalmi körülmények között – ekkor az utazási idő alacsony –  $Q = 10$ , míg instabil esetben – ekkor az utazási idő magas –  $Q = 1000$  az optimális nagyságrend. A következőkben előbbit sötétzöld, utóbbit világoszöld vonal szemlélteti.



6.1. ábra. A  $Q_{hurok}$  paraméter változtatásának hatása

A 6.1. ábrán látható a  $Q_{hurok}$  paraméter változtatásának hatása a teljes teszt-időszakra vonatkozóan. Minél kisebb a paraméter értéke, annál kevésbé képes az eljárás a stabil-instabil váltásokat lekövetni, az érték növekedésével viszont a szűrő hatás csökken. Látható, hogy a stabil szakaszokon optimálisnak minősített, relatíve kicsi  $Q_{hurok} = 10$  (sötétzöld) nagyságrendű eset nem tudja megfelelően leereagálni a nagyobb váltásokat. Azonban, ha csak a stabil tartományt tekintjük (lásd 6.2. ábra), érvényesül a kívánt mértékű szűrő hatás. Az ábrán 4 nagyságrendet különböztethetünk meg:  $Q = 1, 10, 100$  és  $1000$ . Utóbbival (világoszöld) az összes  $Q_{hurok} > 1000$  változat grafikonja egybeesik. Ezen helyzetekben a szűrő hatás már nem érvényesül, csak a mérési pontok összekötése történik meg. Ezeknél valamivel erősebb, de még mindig elég gyenge szűrést mutat a  $Q_{hurok} = 100$  paraméterű grafikon. A legegyszerűsebb,  $Q_{hurok} = 1$  értékű változat viszont már egyértelműen túl lassú.

Az instabil tartományban (6.3. ábra) a  $Q_{hurok} < 1000$  paraméterű szűrők nem



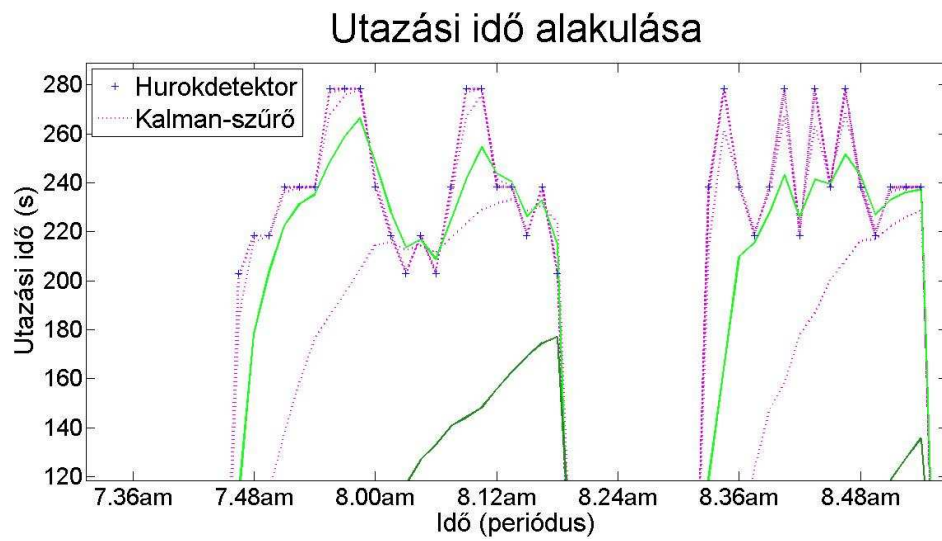
6.2. ábra. A  $Q_{hurok}$  paraméter változtatásának hatása a stabil tartományban

tudják lekövetni a változásokat, míg a  $Q_{hurok} > 1000$  nagyságrendeknél tulajdonképpen csak a mérési pontok összekötése valósul meg, így ebben a tartományban egyértelműen a  $Q_{hurok} = 1000$  (világoszöld) nagyságrend az optimális.

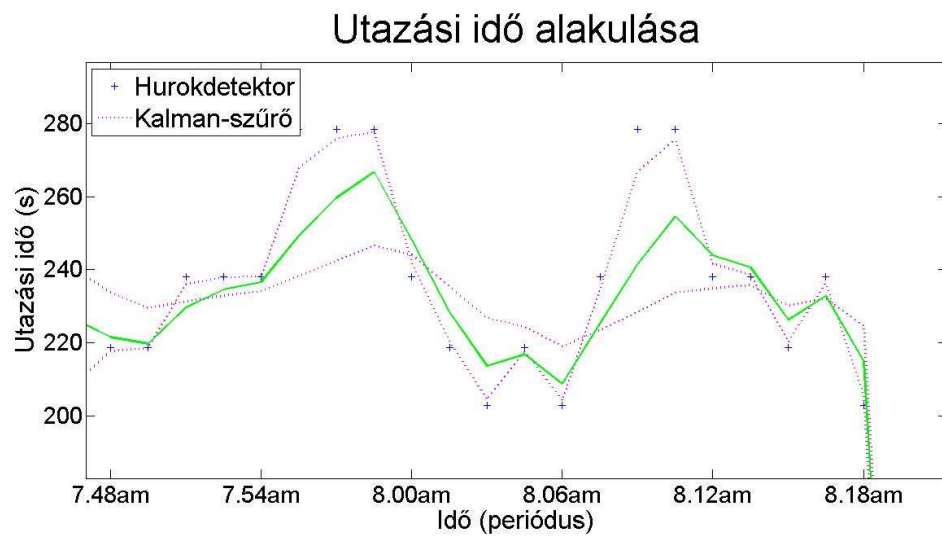
Felmerülhet a kérdés, hogy az instabil tartományban nem csak az okozza-e a nagy értékű  $Q_{hurok}$  paraméter szükségességét, hogy a stabil-instabil váltás lekövethető legyen. Ebből kifolyólag végeztem egy olyan vizsgálatot, ahol a szűrőket az instabil tartomány kezdetétől indítottam, ilyen módon nem kellett lereagálniuk ezt a kiugró változást. A vizsgálatot az optimális  $Q_{hurok} = 1000$  (világoszöld), valamint az egy nagyságrenddel kisebb és nagyobb szűrőkre végeztem el. Ezt mutatja a 6.4. ábra.

Látható, hogy a  $Q_{hurok} = 100$  paraméterű („egyenletesebb”) szűrő a változásokat még így is kicsit lassan – igaz, az előbbieknél lényegesen jobban – reagálja le, ez főleg a 7:54-8:00 és a 8:06-8:12 közötti időszakokban látszik. Ilyen módon a stabil tartományban optimálisnak minősített  $Q_{hurok} = 10$  paraméterű eljárás sem alkalmazható, mivel az még lassabb lenne. A  $Q_{hurok} = 10000$  paraméterű szűrő pedig értelemszerűen továbbra is túl gyors.

Ilyen módon tehát kijelenthető, hogy a stabil tartományban nagyságrendileg  $Q_{hurok}^S = 10$ , míg az instabilban  $Q_{hurok}^I = 1000$  paraméterű szűrő alkalmazása szükséges. A korábbiakban  $Q$ -ra konstansként tekintettünk, az eltérő nagyságrendek



6.3. ábra. A  $Q_{hurok}$  paraméter változtatásának hatása az instabil tartományban



6.4. ábra. A  $Q_{hurok} = 1000$  paraméter szükségességének alátámasztása

miatt viszont ennek dinamikus változtatása szükséges. A következőkben bemutatom, milyen módszerrel valósítottam ezt meg.

### 6.1.2. Az adaptív hangolási paraméter meghatározása

Az előbbieken felül a változó nagyságrendű  $Q_{hurok}$  hangolási paraméter alkalmazásának szükségességét támasztja alá az a tény is, hogy a hurokdetektoros adatok alapján az utazási időre becslést adó look-up-table (4.7. és 4.8. ábrák) stabil tartományában az utazási időre vonatkozóan abszolút értékben sokkal kisebb a szórás, mint az instabil részen. (Relatívén viszont nagyjából egyforma a két érték.) A szűrő működését az eljutási idő adott periódusban tapasztalható szórása döntően befolyásolja. Az érték minél kisebb, a szűrő annál nagyobb bizonyossággal kezeli az adott utazási időre vonatkozó értéket. A stabil tartományokban a bizonyosság nagy, az instabilban kisebb. Ezt tükrözi a  $Q_{hurok}$  paraméter értéke is, amelyet emiatt a look-up-table által az adott mérési periódus forgalmi állapota alapján megállapított szórásértékkel hoztam összefüggésbe.

Az előző fejezetben szó esett róla, hogy a szűrő behangolására  $R$  és  $Q$  paraméterek (3.1. táblázat) változtatásával van lehetőségünk.  $R$  értékeit az egyes mérőeszközök méréseinek szórásnégyzeteiből határoztam meg, most az eredetileg konstansnak felvett  $Q$  értékeivel is hasonlót teszek. Fontos kiemelni, hogy az állapotdinamikai egyenlet hibája ( $Q$ ) és a mérési egyenlet hibája ( $R$ ) jelentésük szerint egymással nem függenek össze, másra vonatkoznak. Mérnöki, gyakorlati szempontból vizsgálva viszont számszakilag mégis jól kifejezhető kapcsolat állt elő közöttük a rendelkezésre álló valós mérési adatok feldolgozása alapján.

Abban az esetben, amikor csak hurokdetektoros mérési adat érkezik be egy periódusban,  $R = \sigma_{hurok}^2$ . Kiinduló kísérletező feltételezésem szerint ezen analógiára számszakilag felállítható az alábbi összefüggés:

$$Q = \alpha \cdot \sigma_{hurok}^2, \quad (6.1)$$

ahol  $\alpha$  valós konstans. Az előző alfejezetben megállapítottak alapján  $Q_{hurok}$  optimális nagyságrendű értéke stabil forgalmi körülmények között 10, instabil esetben 1000. Ilyen módon megvizsgáltam, hogy a szórásnégyzetek számszakilag kapcsolatba hozhatók-e ezzel a két számértékkel, találhatók-e olyan  $\alpha$  értékek, amik a 6.1

egyenlet szerint minden forgalmi körülmény között az optimális nagyságrendű  $Q$  értéket adják eredményül. Kísérleteim pozitív eredménnyel zárultak, a folyamatot a következőkben ismertetem.

Célom az volt, hogy mind a stabil, mind az instabil tartományra meghatározzak egy-egy jellemző szórásnégyzetértéket a felállított look-up-table és a valós hurokdetektoros mérési adatok alapján. A jobb követhetőség érdekében érdemes ismételtlen megjegyezni, hogy a valós hurokdetektoros adatok 90 másodperces bontásban állnak rendelkezésre, vagyis pontosan egyeznek a kidolgozott módszertanban szereplő aggregálási periódusokkal. Az adatfeldolgozás során az alábbi lépéseket végeztem el:

1. A hurokdetektoros adatokból kiválasztottam azokat, amelyekben a forgalom-nagyság értéke nagyobb volt 0 jármű/periódusnál, illetve amik nem voltak hibásak. (Így összesen 14715 db rekord maradt.)
2. Minden egyes hurokdetektoros mérést besoroltam a look-up-table megfelelő kategóriáiba. (4.7. ábra és 4.8. ábra)
3. Az egyes rekordokhoz hozzárendeltem a look-up-table megfelelő szórásértékét.
4. Szétválasztottam a stabil, illetve instabil körülményekhez tartozó rekordokat. (12994 db esett a stabil tartományba, 1721 db az instabilba.)
5. Mind a stabil, mind az instabil tartományokban megnéztem, hogy az egyes (look-up-table-ből származó) szórásértékek hányszor fordulnak elő, majd vettem a szórásértékek előfordulásszámmal súlyozott átlagát.
6. Az előző lépés átlag szórásértékét négyzetre emeltem. (Külön a stabil és külön az instabil tartományban.)

A számítás eredményeként a szórásnégyzetekre a stabil esetben  $\bar{\sigma}_S^2 = 18,76s^2$ , míg az instabilban  $\bar{\sigma}_I^2 = 1953,64s^2$  értékek adódtak. Tudjuk, hogy  $Q_{hurok}^S$  és  $Q_{hurok}^I$  nagyságrendje 10, illetve 1000, így a 6.1 egyenletből kiindulva a keresett konstan-

sok:

$$\alpha_S = \frac{Q_{hurok}^S}{\bar{\sigma}_S^2} = \frac{10}{18,76} = 0,53 \quad (6.2)$$

$$\alpha_I = \frac{Q_{hurok}^I}{\bar{\sigma}_I^2} = \frac{1000}{1953,64} = 0,51 \quad (6.3)$$

Ahogy arról már korábban szó esett, a tesztkörnyezetből kifolyólag a Kalman-szűrőnek csak a nagyságrendi behangolása lehet reális cél, így a  $Q_{hurok}^S = 10$  és  $Q_{hurok}^I = 1000$  nagyságrendi értékek. Ebből kifolyólag, mivel a 6.2-6.3 egyenletek 0,51 és 0,53 konstansai egymáshoz igen közel esnek, célszerűnek tartottam egy közös értéket meghatározni. Összesen 12994 db stabil és 1721 db instabil eset fordult elő a rendelkezésre álló valós hurokdetektoros mérések során, így az ezek alapján vett súlyozott átlag értéke adja a végső szorzót. Az eredmény:  $0,51 + \frac{12994}{12994+1721} \cdot (0,53 - 0,51) = 0,528 \approx 0,53$ , tehát lényegében a stabil érték szorzóját veszem át az instabil esetekre vonatkozóan is. Ilyen módon az adaptív  $Q_{hurok}$  paraméter értékét minden esetben az alábbi összefüggés alapján számíthatjuk:

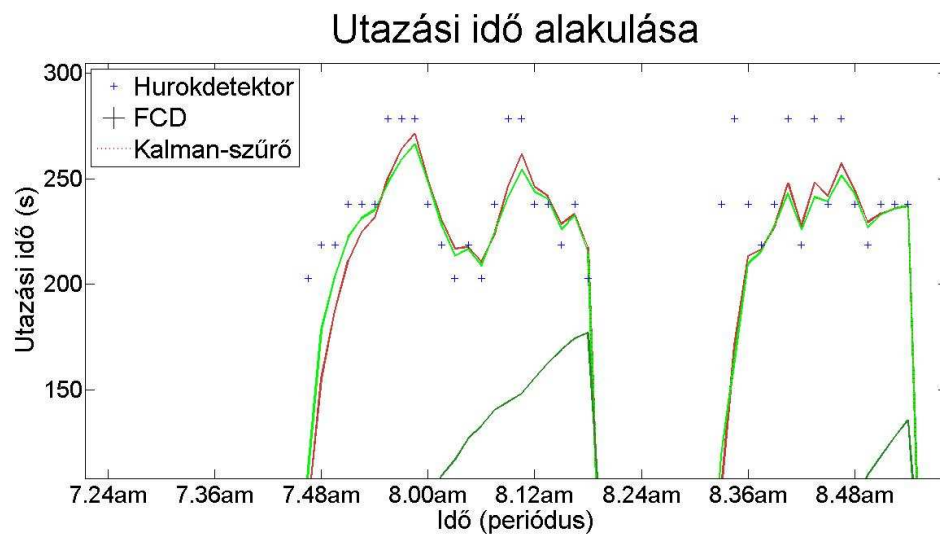
$$Q_{hurok} = 0,53 \cdot \sigma^2, \quad (6.4)$$

ahol  $\sigma^2$  a look-up-table által az adott mérési periódusban az utazási időre szolgáltatott szórásérték négyzete.

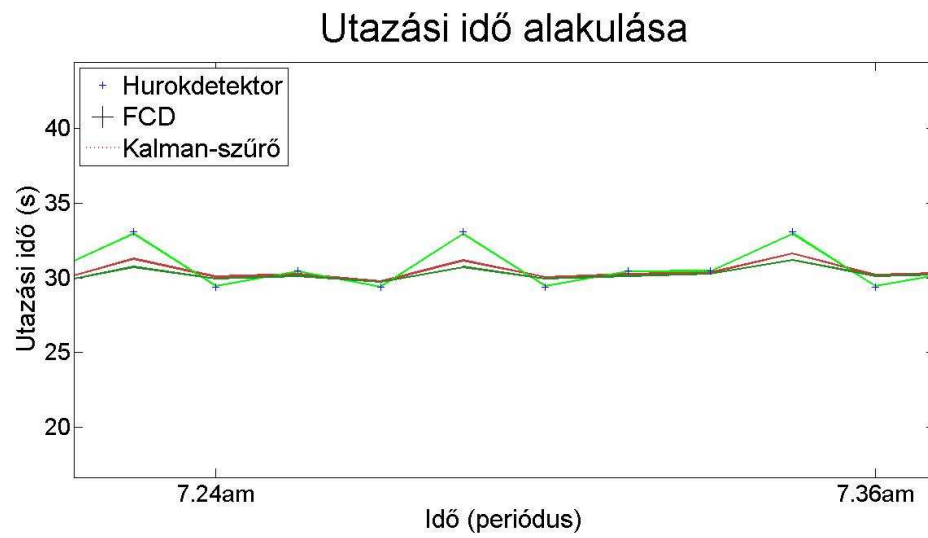
Az alábbi 6.5. és 6.6. ábrákon látható, hogy a pirossal jelölt, adaptív paraméteres Kalman-szűrő mind a stabil, mind az instabil tartományban hasonlóan viselkedik, mint az egyes helyzetekre optimális nagyságrendűnek meghatározott változatok. Sötétzölddel ábrázoltam a stabil  $Q_{hurok} = 10$ , világoszölddel pedig az instabil  $Q_{hurok} = 1000$  esetet.

A teljes tesztidőszakra vonatkozóan, ha csak hurokdetektoros beérkező mérési adat áll rendelkezésre, az adaptív paraméteres Kalman-szűrő a 6.7. ábrán látható módon viselkedik.

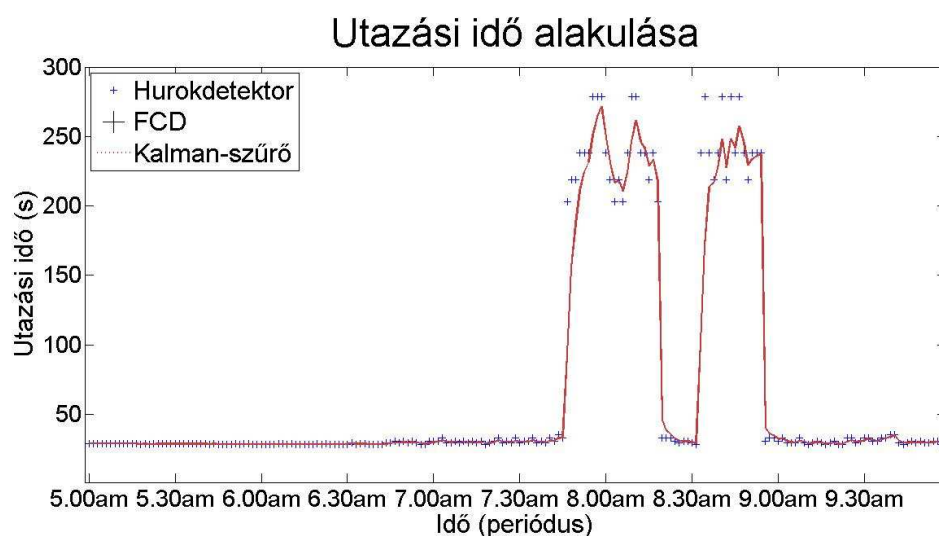




6.5. ábra. Az adaptív  $Q_{hurok}$  paraméteres Kalman-szűrő az instabil tartományban



6.6. ábra. Az adaptív  $Q_{hurok}$  paraméteres Kalman-szűrő a stabil tartományban

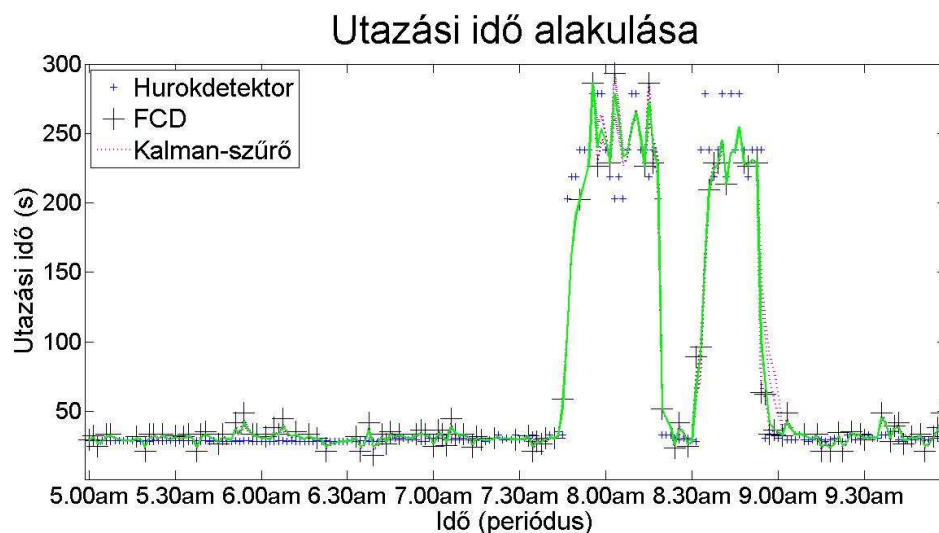


6.7. ábra. Az adaptív  $Q_{hurok}$  paraméteres Kalman-szűrő

## 6.2. Az együttes FCD és hurokdetektoros üzemi behangolása

A csak hurokdetektoros esethez képest döntő különbséget jelent, hogy az FCD-mérések szórásnégyzeteinek értéke forgalmi körülménytől függetlenül állandó, és lényegesen kisebb, mint a hurokdetektoros adatoké (főleg instabil körülmények között). Ez kedvezően befolyásolja az együttes FCD és hurokdetektoros üzemi behangolását. Tudjuk, hogy azokban a periódusokban, amikor nincs beérkező FCD-mérés, a kapcsolt Kalman-szűrő a csak hurokdetektoros üzemmódra vált. Ekkor az előző alfejezetben meghatározott optimális  $Q_{hurok}$  paraméter lép be.

A vizsgálataim célja – az előbbiekhöz hasonlóan – egy megfelelő nagyságrend meghatározása volt a  $Q_{FCD+hurok}$  értékre vonatkozóan. Végül egységesen, minden körülményre vonatkozóan a  $Q_{FCD+hurok} = 10$  változat bizonyult optimálisnak, ezt világoszölddel jelöltem. A 6.8. ábrán a teljes tesztidőszakra vonatkoztatva látható a  $Q_{FCD+hurok} = 0, 1 - 1 - 10 - 100 - 1000$  paraméterek hatása. A korábban tett megállapítások jelen esetben is érvényesek: a  $Q$  érték növelésével egyre gyorsabb reakciók és egyre csökkenő szűrő hatás tapasztalható. A tesztek során a periódusok véletlenszerűen kiválasztott 50%-ához rendelt FCD mérési értéket. Ez ugyan lényegesen meghaladja a jelenlegi valós állapotokat, de a vizsgálatokat megkönnyíti.

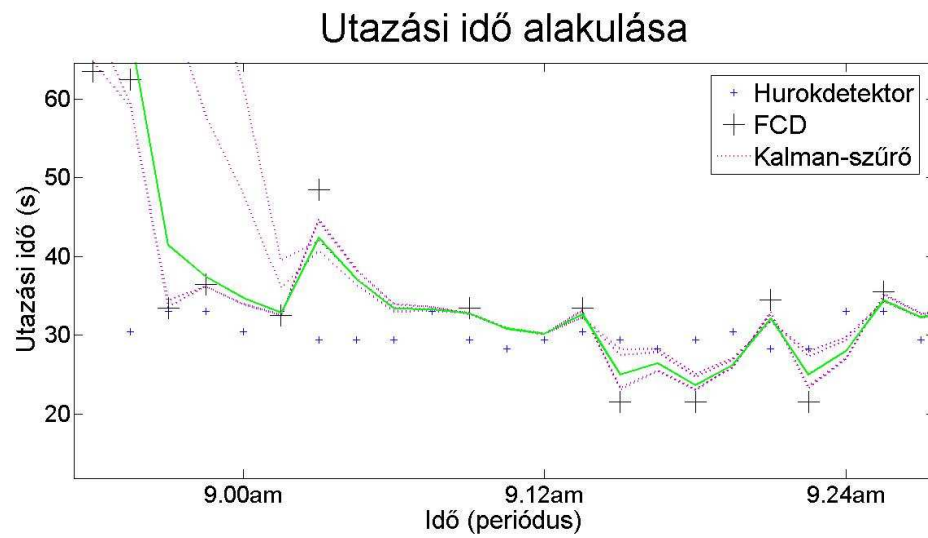


6.8. ábra. A  $Q_{FCD+hurok}$  paraméter változtatásának hatása

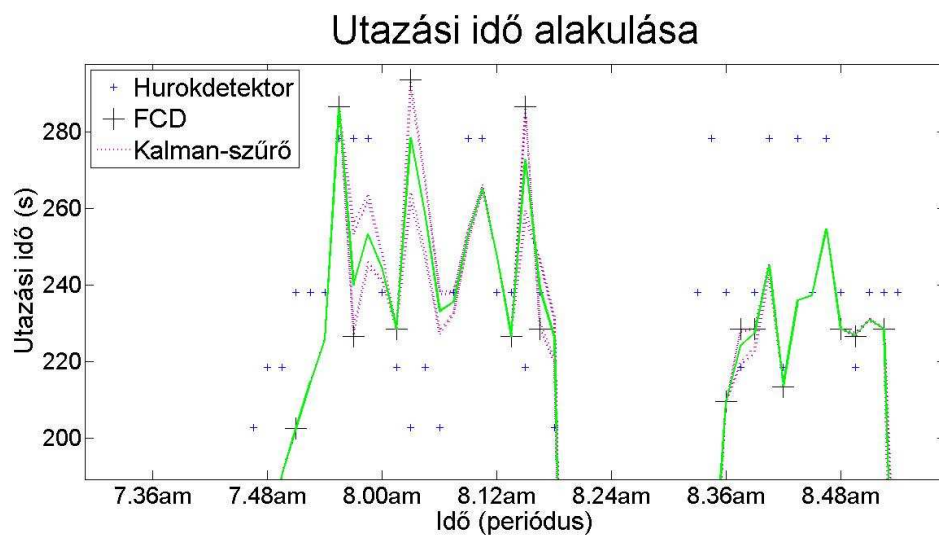
A különböző nagyságrendű paraméterek között – a csak hurokdetektoros üzemmóddal ellentétben – igazán komoly eltérés nem figyelhető meg, a döntő különbséget a 9:00 körüli instabil-stabil váltásnál vehetjük észre, itt a  $Q = 0,1$  és  $Q = 1$  szűrők reakciója túl lassú.

Azt ezt követő stabil tartományban (6.9. ábra) a  $Q = 0,1 - 1$ , illetve a  $Q = 100 - 1000$  paraméterű szűrők értékei páronként majdnem teljesen egybeesnek. Látható, hogy a magasabb értékek esetén inkább az FCD-méréseket „köti össze” az eljárás. Igazán erősen az instabil tartományban érződik ez a hatás (6.10. ábra), ahol továbbra is igaz, hogy a két-két szűrő értékei nagyon közel állnak egymáshoz. Érdekes megfigyelni, hogy kb. 8:40-8:48 között, amikor nincs FCD-mérés, a szűrő végig az FCD nélküli üzemmódban működik, így ekkor a  $Q_{hurok}$  paraméter hatása érvényesül a  $Q_{hurok+FCD}$  helyett.

Tehát  $Q = 0,1 - 1$  esetén a 9:00 körüli instabil-stabil váltás nem valósul meg kellően pontosan, míg  $Q = 100 - 1000$  paraméter használatakor az instabil tartományban a szűrő hatás nem elegendő. Ezzel szemben a  $Q = 10$  értékű szűrő minden esetben kellően pontos, így ez a megfelelő nagyságrend.



6.9. ábra. A  $Q_{FCD+hurok}$  paraméter változtatásának hatása a stabil szakaszon



6.10. ábra. A  $Q_{FCD+hurok}$  paraméter változtatásának hatása az instabil szakaszon

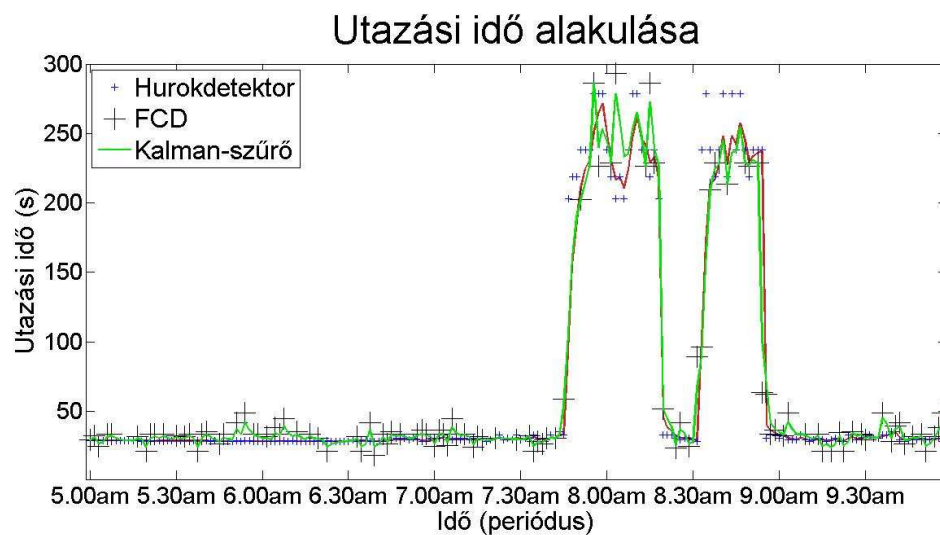
Ezzel a behangolt kapcsolt Kalman-szűrő (nagyságrendi) paraméterei:

$$Q_{hurok} = 0,53 \cdot \sigma^2 \quad (6.5)$$

$$Q_{FCD+hurok} = 10, \quad (6.6)$$

ahol  $\sigma^2$  a look-up-table által az adott mérési periódusban az utazási időre szolgáltatott szórásérték négyzete.

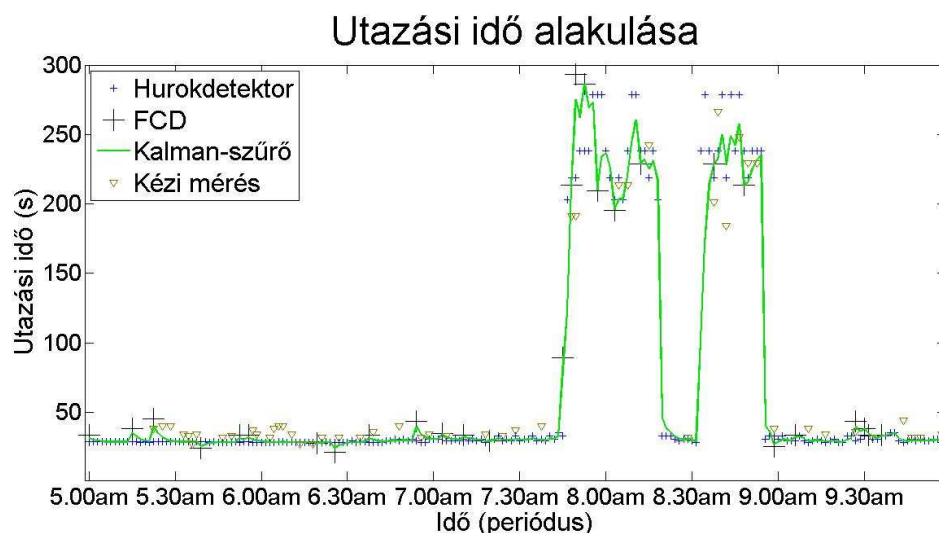
A 6.11. ábra mutatja a csak hurokdetektoros adatokat figyelembe vevő (piros), illetve a kombinált FCD-detektoros üzemmódban működő (világoszöld) Kalman-szűrők közti különbséget abban a tesztkörnyezetben, melyben a szűrők behangolása történt. Látható, hogy az FCD-adatok a nagyobb pontosságuk miatt érezhetően befolyásolják az eredményt. Fontos azonban kiemelni, hogy – a hatás jobb szemléltetése miatt – a tesztkörnyezetben szereplő 50%-os FCD-arány igen magas, így olyan – a valósághoz közel álló – esetet is vizsgálunk, ahol alacsonyabb ez a hányad.



6.11. ábra. Az egy, illetve a két üzemmódot alkalmazó szűrők közti különbség a tesztkörnyezetben

### 6.3. Adatfúzió – utazási idő becslése kapcsolt Kalman-szűrővel

Az előző fejezetben szó esett róla, hogy a dolgozat alapját adó, rendelkezésre álló valós FCD-adatok elég ritkásak, a legsűrűbb esetben óránként 5 rekord érkezett be. A mérési eljárás 90 másodperces periódusokkal dolgozik, így egy óra 40 periódusból áll. Ha azt vesszük, hogy az 5 mérés különböző periódusokban érkezik be, akkor az esetek 12,5%-ában segíti FCD-mérés az eljutási idő becslését. Egy ilyen, közel valós helyzetet szemléltet a 6.12. ábra. A tesztkörnyezet alapja most is a 2013. szeptember 3-ai valós hurokdetektoros méréssorozat, ahol a periódusok nagyjából 12,5%-ához sorsoltam valós méréseken alapuló FCD-adatokat. (Ezek a mérések a valóságban szintén megtörténtek, csak nem a fenti dátummal.)



6.12. ábra. A kapcsolt Kalman-szűrő realisztikus körülmények között - utazási idő becslésének megvalósítása

Látható, hogy egy-egy FCD-mérés hatása nagyjából 4-5 perióduson (6-8 percen) át érvényesül, utána a rendszer teljes mértékben a hurokdetektoros adatokra támaszkodik. Az ábrán feltüntettem a helyszíni megfigyeléseim alatt stabil és instabil forgalmi körülmények között mért eljutási időket, melyek alátámasztják, hogy a rekonstruált események valóban reális történéseket szemléltetnek.

A dolgozat kiinduló feltevése, miszerint a vegyes mérőrendszerek együttes al-

kalmazásával jobb és pontosabb eredményt érünk el, mint ha elszeparáltan alkalmaznánk őket, teljesül. Az FCD-mérések – melyekkel az eljutási idő közvetlenül mérhető – nagyon pontosak, viszont ritkán érkeznek be, így csak ezekre hagyatkozva a forgalom állapotáról nem kapunk folyamatos képet. A hurokdetektoros adatok ezzel szemben mindig rendelkezésre állnak, de pontosságuk – tekintve, hogy az utazási időről csak származtatott információt nyújtanak – érezhetően elmarad az FCD-mérésekétől. A legjobb természetesen az lenne, ha minden periódusban érkezne FCD-mérés, de ez messze nem teljesül. Így a két adatforrás együttes alkalmazása során – ha van – elsődlegesen az FCD-forrásra támaszkodik a rendszer, viszont olyan esetekben, amikor ilyen adat nem érkezik, akkor a hurokdetektorokból származó eredményeket használja. Ilyen módon akkor is megalapozott képet tud nyújtani a forgalom állapotáról, amikor igazán pontos beérkező adat nincs.

## 7. fejezet

# Összefoglalás

Dolgozatomban városi útszakaszokon kialakuló utazási idő becslésére mutattam be egy lehetséges adatfúziós eljárást, melyben hagyományos és alternatív mérési eszközök eredményeit kombináltam. Kapcsolt Kalman-szűrőt alkalmaztam, melynek működését valós helyszínt modellezve, valós hurokdetektoros és floating car adatok alapján vizsgáltam meg.

Az elméleti úton kidolgozott módszertanba beillesztettem a flottamenedzsment cégektől és a közútkezelőtől származó mérési adatokat, ezáltal megteremttem azok kapcsolt Kalman-szűrőben történő alkalmazhatóságának feltételét. A hurokdetektorok esetében egy a forgalomnagyság- és foglaltságadatok mérése alapján az utazási időre és annak szórására becslést adó look-up-table-t állítottam fel, nagyszámú mikroszkopikus forgalomszimuláció lefuttatása alapján. A floating car adatoknál egy a bejelentkezési időközökből kiinduló számítási folyamatot dolgoztam ki.

Ismertettem a kapcsolt Kalman-szűrő behangolási folyamatát a különböző üzemmódokban, majd a behangolt szűrő működését – ilyen módon az eljutási idő becslésének adatfúziós technikával történő megvalósítását – mutattam be, valós mérési adatokkal alátámasztva.

A bemutatott módszer távlati alkalmazási lehetősége – és egyben a kutatás további potenciálja –, hogy azt a teljes hálózatra kiterjesszük. Olyan eljárást dolgoztam ki, amely ugyan helyszínspecifikus, de bármilyen városi útszakaszon működőképes lehet, az egyes szakaszok eredményei összegezhetőek, így hálózati eljutási



idők is számíthatók. Ekkor viszont már összetettebb állapotdinamikai modellezés szükséges. A dolgozatban ennek egy lehetséges kiindulási alapját mutattam be.

## A. függelék

# A mikroszimulációs futtatások technikai részletei

Jelen összefoglaló ismerteti az utazási idő becslésére felállított look-up-table alapjául szolgáló nagyszámú szimulációs futtatás részleteinek leírását.

A valós közlekedési hálózatot a Vissim mikroszkopikus forgalomszimulátorban építettem fel. A futtatásokat automatizált módon, a szoftver ún. COM-felületén keresztül bonyolítottam le, MATLAB programnyelven megírt kód alapján. A COM (Component Object Model) a Microsoft által kifejlesztett technológia a komponens alapú fejlesztés támogatására, amely a szoftverek közti kommunikációt teszi lehetővé. Ezzel olyan környezetet hoztam létre, melyben a Vissimet MATLAB-on keresztül vezéreltem.

A futtatások között a Vissim két paraméterét változtattam két, egymásba ágyazott for-ciklussal. Az egyik változó a szimulátor egyik belső paramétere, a Random Seed, amely egy véletlenszám-generátornak felel meg. Alkalmazásának az a célja, hogy a felhasználó által meghatározott forgalomnagyságot bizonyos mértékig véletlenszerűen bocsássa a hálózatra. Azonos beállítások mellett egy-egy szimuláció alatt összességében ugyanannyi jármű fog megjelenni a hálózaton, a Random Seed érték változása kizárólag az időbeli eloszlást változtatja. Összesen 15-féle különböző beállítást alkalmaztam. A másik változtatott paraméter a hálózatra bocsátott forgalom nagysága volt. Három belépési pont található: egy a Villányi úton, egy a Karolina úton, egy pedig a Budaörsi úton (4.1. ábra). A rendelkezésre ál-

ló valós hurokdetektoros adatok szerint a Villányi:Karolina:Budaörsi belépő forgalom nagyságok aránya a reggeli csúcsidőben 1:2,4:3,7, míg a teljes időtartamra vetítve 1:2,5:3,7, tehát közel állandó. Emiatt a szimulációs futtatásokat mindvégig ezekkel az arányokkal végeztem, kizárólag a forgalom nagyságok értékeit változtattam, reggeli csúcsidőben tapasztalható arányaikat nem. A Villányi úton 50 és 550 jármű/óra közötti mennyiséget bocsátottam a hálózatra, ez a Karolina úton 120 és 1320, míg a Budaörsi úton 185 és 2035 jármű/óra értékekkel társult. A maximumokat úgy határoztam meg, hogy a Random Seed értékétől függetlenül stabilan magasabb legyen a rendszerbe bocsátott járműmennyiség, mint amennyit a hálózat elbír. Ez gyakorlati szempontból annyit jelent, hogy a Vissim a szimuláció lefutása után jelzi a felhasználónak, hogy több járművet akart a hálózatra bocsátani, mint amennyi a futás során ténylegesen megvalósult. Egy ilyen szituációt mutat az A.1. ábra.



A.1. ábra. Túlerhelt állapot forgalmi szimulációja

A mérések akkor nyújtanak valós képet, ha azokat feltöltött hálózaton végzük. Egy-egy szimuláció 4500 másodpercig tartott, a méréseket 2700 és 4500 s között végeztem, 90 másodperces periódusokban. A 0-2700 s-os időtartam alatt történt a hálózat feltöltése.

Valóságos körülményeket vizsgálva természetesen olyan szituációkat is elemezni

kell, amikor valamilyen zavar lép fel. Ilyen eset a keddenként a reggeli csúcsforgalom idején a tesztszakaszon végighaladó kukásautó, valamilyen baleset, vagy a Villányi úti villamos meghibásodása. Utóbbi esetén az utasokat pótlóbuszok szállítják, melyek megállója az egyik forgalmi sávban található, ráadásul ilyen esetekben a zsúfolt buszokon hosszú utascseredővel kell számolni. Így az ilyenkor fellépő útszűkület forgalmi zavaró hatása határozottan érezhető.

A look-up-table felállításánál a zavartalan esetek aránya 25-szörös volt az incidenses szituációkhoz viszonyítva. Összesen 3600 db 90 másodperces mérés eredményéből dolgoztam.

## B. függelék

### Az alkalmazott look-up-table

B.1. táblázat. Look-up-table – mintaszakasz

Tartomány			Utazási idő	
neve	stabilitás	forgalomnagyság (jm/periódus)	átlaga (s)	szórása (s)
S 1-7	Stabil	1-7	26.59	3.77
S 8-12	Stabil	8-12	27.47	3.19
S 13-17	Stabil	3-17	28.31	3.53
S 18-22	Stabil	8-22	29.38	4.19
S 23-26	Stabil	3-26	30.45	5.74
S 27-31	Stabil	7-31	33.08	6.85
S 32+	Stabil	32+	35.39	7.24
I 1-11	Instabil	1-11	364.23	48.17
I 12-16	Instabil	2-16	278.37	63.25
I 17-21	Instabil	7-21	238.16	36.43
I 22-26	Instabil	2-26	218.56	30.73
I 27-30	Instabil	7-30	202.76	34.54
I 31-33	Instabil	1-33	180.09	35.77
I 34-36	Instabil	4-36	159.33	29.47
I 37+	Instabil	37+	142.05	23.66

# Irodalomjegyzék

- [1] iwatchsystems. URL <http://iwatchsystems.com/>. iv, 5
- [2] *Travel Time Data Collection Handbook, Chapter 5: ITS Probe Vehicle Techniques*. U.S. Federal Highway Administration, 1998. iv, 7
- [3] C. Bachmann. Multi-sensor data fusion for traffic speed and travel time estimation. Master's thesis, Toronto, 2011. 9
- [4] G. Böker and J. Lunze. Stability and performance of switching kalman filters. *International Journal of Control*, 75 (16/17):1269–1281, 2002. 14, 39, 42
- [5] FUTÁR Budapesti Közlekedési Központ. URL <http://www.bkk.hu/>. 4
- [6] L. Chu, J. Oh, and W. Recker. Adaptive kalman filter based freeway travel time estimation. 84th TRB Annual Meeting, Washington, 2005. 9
- [7] C. G. Claudel and A. M. Bayen. Guaranteed bounds for traffic flow parameters estimation using mixed lagrangian eulerian sensing. Proceedings of the 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Allerton, IL, 2008. 9
- [8] N-E. El Faouzi, H. Leung, and A. Kurian. Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges - a survey. *Information Fusion*, 12(1):4–10, 2011. doi: 10.1016/j.inffus.2010.06.001. 9
- [9] B. D. Greenshields. A study of traffic capacity. *In Proceedings of the Highway Research Board*, 14:448–477, 1935. 23

- [10] F. Guo, Krishnan R., and J. Polak. A computationally efficient two-stage method for short-term traffic prediction on urban roads. *Transportation Planning and Technology*, 36(1):62–75, 2013. doi: 10.1080/03081060.2012.745721. [10](#)
- [11] M. T. Horváth, T. Tettamanti, and I. Varga. Utazási idő becslésének lehetősége adatfúziós technikával városi úthálózaton. *Jövő Járműve*, bírálás alatt, 2014. [iv](#), [1](#), [3](#), [7](#), [11](#), [17](#), [18](#), [19](#)
- [12] R.E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction. *Journal of Basic Engineering (ASME)*, 82(D):35–45, 1960. [11](#)
- [13] G Leduc. Road traffic data: Collection methods and applications. *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change N.1, JRC 47967*, 2008. [4](#), [7](#)
- [14] L.A. Klein et al. *Traffic Detector Handbook: Third Edition - Volume 1*. U.S. Department of Transportation FHWA, 2006. [6](#)
- [15] M. Takács et al. *Forgalomszimulációs elemzések egységes vizsgálati módszertanának kidolgozása - tervezési útmutató*. Útgazdálkodási és Koordinációs Igazgatóság, Fővárosi Mérnök Tervező Részvénytársaság, 2005. [23](#)
- [16] P.E. Chi Mai et al. *Protocol for Vissim simulation*. Oregon Department of Transportation, 2011. [23](#)
- [17] R-M. Hage et al. Unscented kalman filter for urban network travel time estimation. In *15th meeting of the EURO Working Group on Transportation*, 2012. [9](#)
- [18] L. E. Y. Mimbela and L. A. Klein. *A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*. U.S. Department of Transportation FHWA, 2000. [6](#)
- [19] H. B. Mitchell. *Multi-sensor data fusion: An introduction*. New York, Springer, 2007. [9](#)

- [20] Zs. Pocsai, J. Cserteg, Zs. Szalay, and Sz. Aradi. A magyar közút flottamenedzsment rendszerének közbeszerzési módszertana. volume Paper 08, Budapest, 2012. Innováció és Fenntartható Fejlődés Konferencia. [4](#), [7](#)
- [21] J. Smith and R. Blewitt, editors. *Traffic Modelling Guidelines*. Transport for London, 2010. [23](#)
- [22] T. Tettamanti, M. T. Horváth, and I. Varga. Road traffic measurement and related data fusion methodology for traffic estimation. *Transport and Telecommunication*, in press, 2014. [iv](#), [vi](#), [6](#), [8](#), [9](#), [11](#), [15](#), [17](#)
- [23] E. Vlahogianni, M. G. Karlaftis, and J. C. Golias. Short-term traffic forecasting: Where we are and where we are going. *Transportation Research Part C*, in press, 2014. doi: 10.1016/j.trc.2014.01.005. [9](#)
- [24] G. Welch and G. Bishop. An introduction to the Kalman Filter. *University of North Carolina at Chapel Hill, TR95-041*, 1995. [iv](#), [11](#), [13](#), [39](#), [42](#)