



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki Kar
Közlekedésautomatikai Tanszék**

**A keresztezésekben kialakuló torlódások
csökkentésének lehetőségei dinamikus
szabályozással**

Kiss Olivér

Budapest, 2009

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	Torlódás elmélet	5
2.1.	Torlódások kialakulása	7
2.2.	Csomóponti torlódás	8
2.3.	Torlódások öngerjesztő hatása.....	9
2.4.	Csomóponti torlódások elleni intézkedések	10
3.	Jelenlegi forgalomszabályozási módszerek	13
3.1.	Állandó időtervű	13
3.2.	Forgalomtól függő	14
3.2.1.	Programválasztás	14
3.2.2.	Rugalmas szabályozás	15
3.2.3.	Programmódosítás	16
3.2.4.	Programalkotás	17
3.3.	Összehangolás.....	17
4.	Mérési eszközök, detektorok	19
4.1.	Induktív hurokdetektor	19
4.2.	Mágneses leképezésen alapuló detektor	20
4.3.	Kamerás járműérzékelő	21
4.4.	PIEZO elvű detektor	21
4.5.	Ultrahangos detektor.....	22
4.6.	Egyéb detektálási módszerek.....	22
5.	Torlódásdetektálási módszerek.....	24
5.1.	Területfoglaltság módszer.....	24
5.2.	Sebesség alapú módszer.....	27
5.3.	Beavatkozási szintek.....	35
5.3.1.	Kiegészítő, figyelmeztető jelzés	35
5.3.2.	Kritikus iránynak tilos jelzés	35
5.3.3.	Programmódosítás, alkotás	35
6.	Torlódásdetektáló algoritmus szimulációja	36
6.1.	Szoftver háttér	36
6.2.	Szimuláció célja.....	37
6.3.	Előkészületek	37
6.3.1.	Csomópont felvétele	38
6.3.2.	Vizsgálati adatok.....	39
6.3.3.	Jelzőcsoportok felvétele.....	39
6.3.4.	Tiltásmátrix megadása	40

6.3.5.	Közbenső idők számítása.....	40
6.3.6.	Késleltetési feltételek.....	40
6.3.7.	Jelzésterv készítése.....	40
6.3.8.	Fázisátmenetek meghatározása.....	41
6.4.	Detektáló logika megvalósítása és vizsgálata.....	41
6.4.1.	Szimuláció előkészítése.....	41
6.4.2.	Szimuláció lefuttatása.....	42
6.4.3.	Detektor elhelyezése.....	44
6.4.4.	Torlódási logika létrehozása.....	45
6.4.5.	Torlódásdetektáló szimuláció.....	47
6.5.	Mérési eredmények kiértékelése.....	49
6.5.1.	Forgalomnagyságok elemzése.....	49
6.5.2.	Utazási idők elemzése.....	51
6.5.3.	Veszteségidők elemzése.....	52
6.5.4.	Ideális utazási idők elemzése.....	54
7.	Eredmények összegzése, gazdasági előnyök.....	55
7.1.	Csomópont áteresztőképessége.....	55
7.2.	Utazási idő.....	56
7.3.	Veszteségidő.....	57
7.4.	Gazdasági előnyök.....	57
8.	Fejlesztési lehetőségek a szimulációs eljárásban.....	59
8.1.	Harmadik fázis létrehozása.....	59
8.2.	Jobbra kanyarodás engedélyezése.....	60
8.3.	Többsávós utak.....	61
8.4.	Balra kanyarodás.....	62
8.5.	Torlódás vizsgálata több irányban.....	62
9.	Összefoglalás.....	64
10.	Köszönetnyilvánítás.....	66
11.	Irodalomjegyzék.....	67
12.	Ábrajegyzék.....	68
13.	Táblajegyzék.....	68
14.	Mellékletek.....	69
14.1.	Torlódási logika blokkdiagramja.....	69
14.2.	Torlódási logika forráskódja.....	70

1. Bevezetés

A közúti közlekedés, irányítási szempontból legkényesebb területe a torlódások kezelése, megelőzése. Különösen a nagy történelmi hagyományokkal rendelkező nagyvárosokban, többek között Budapesten okoz fejtörést a forgalomszabályozás. Jellemzően a 19. században indultak fejlődésnek az említett városok, ám akkor még senki sem számított arra, hogy ekkora mértékű forgalmat kell majd kiszolgálnia a közlekedési hálózatnak, így nem ennek a szemléletnek megfelelően épültek ki. Ma már nyilvánvaló, hogy nem elég szélesek az utcák, kapacitásuk nem tudja magas színvonalon kiszolgálni a járművel közlekedőket. Értelemszerűen a belvárosi rész okozza a legnagyobb fejtörést, mivel azok épültek a legrégebben. A forgalom növekedése már elég régen szükségessé tette a jelzőlámpás irányítást. Mivel az utak kapacitása a városokban már nem növelhető fizikai módon, ezért a szabályozások finomodása jelenti az egyetlen lehetőséget a fejlődésre.

Jelenkori civilizációnk a gazdasági növekedésre és a technikai fejlődésre, végső soron a fogyasztás növelésére épül, aminek egyik következménye a motorizáció fokozódása. Bár tudható, hogy az exponenciális folyamatok szükségszerűen végesek, a mai viszonyok mégsem teszik lehetővé az átállást más gazdasági berendezkedésre. Addig is minden erőnkkel azon kell munkálkodnunk, hogy a jelenlegi rendszert próbáljuk meg tökéletesíteni, annak minden alrendszerével együtt, így a városi közlekedést is. Ennek egyik legjobb eszköze a torlódások, köznapi szóhasználatnál a dugók és azok hatásainak a mérséklése.

A városi torlódások kialakulásának több oka is lehet, egyik ilyen ok a csomóponton belül megálló járművek által, a keresztirányú forgalomnak okozott torlasz jelenti. E dolgozat ezt a problémát kívánja körbejárni, végső soron megoldási javaslatokkal kíván gyógyírt nyújtani rá. Eltökélt szándék volt, hogy a jelenséget a gyökerénél, kialakulásánál kell megfogni, nem meglegedve az utólagos „tűzoltással”.

Először a torlódást, mint jelenséget vizsgáljuk meg, különös tekintettel a csomóponti torlódásra. Megnézzük a hatásait, kialakulásának körülményeit, valamint az emberek szerepét a folyamatban. Külön kitérünk a jelenlegi intézkedésekre, a törvényi háttérre és javaslatot is adunk a lehetséges egyéb, adminisztratív jellegű megoldásokra.

Áttekintjük a jelenlegi forgalomirányítási módszereket, rávilágítva az előnyeikre, de a gyengeségeiket is megmutatjuk. Ezt követően a jelenleg legelterjedtebb mérési eljárásokat, eszközöket vesszük sorra. Ismertetjük a felépítésüket, valamint tulajdonságaikat.

Ezután térünk rá a lehetséges csomóponton belüli torlódások detektálási módszereinek bemutatására, és a szabályozási eljárások beavatkozási szintjeit is sorra vesszük.

Az egyik ismertett módszert a LISA+ szoftver segítségével megvalósítjuk egy minta csomópont segítségével, majd kiértékeljük az eredményeket, összevetjük az előzetes várakozásainkkal, valamint a várható gazdasági előnyöket is megvizsgáljuk.

A dolgozatban következetesen többes számú ragozás szerepel, az olvasóval való közös gondolkodás megkönnyítésére.



2. Torlódás elmélet

A városi közlekedés egyik sarkalatos kérdése a torlódás. Nézzük meg, hogy kiket (miket) érint a torlódás:

Járművezető: A torlódás rendkívüli módon igénybe veszi a járművezetőket, különös tekintettel az idegrendszerre. Egyrészt folyamatos odafigyelést igényel a lassú, „döcögve” haladás, másrészt ingerültséget okozhat a folyamatos „késésben vagyok, jobb dolgom is lenne” érzés. A 21. századi ember mindig siet, ezért még rosszabbul tűri a városi dugókat, mint korábban. Az elvárások viszont folyamatosan növekszenek, mindenki szeretné, ha az egyre nagyobb járműállományt, egyre gyorsabban lehetne átvezetni a már hosszú idő óta állandó méretű útfelületen. Sajnos ez csak bizonyos korlátok között teljesíthető. Ezért is kerültek manapság előtérbe a forgalomszervezési eljárások, mert segítségükkel jobban ki lehet használni a kapacitási határokat. Visszatérve a jármű vezetőik idegrendszerére, alapvetően két fajta szemléletű, vérmérsékletű embertípust különböztethetünk meg. Az egyik „beletörődik” a kialakult helyzetbe, szépen araszolva halad a hosszú kocsisorban. A másik típus folyamatosan felfokozott szellemi és fizikai állapotban van, minden adandó alkalmat megragad, hogy előrébb kerüljön a sorban. Kijelenthetjük, hogy az első típus a gyakoribb, viszont a második típus megkeserítheti a közlekedésben résztvevők életét, ráadásul a többieket is hasonló magatartásra buzdíthatja. Könnyen érvényesülhet az „egy bolond százat csinál” elve. Ennek talán a legkézzelfoghatóbb megnyilvánulása a buszsávban való haladás. Elég egy ember szabálytalankodása, rövid időn belül többen is feljogosítva érzik magukat, hogy ugyanazt a szabálytalanságot elkövessék. A jelenséget a fokozott rendőri jelenlétel csökkenteni lehetne.

Jármű: Nem csak a járművezetőt veszi igénybe a torlódás, hanem magát a járművet is. Az araszolgatás talán a legkevésbé kívánt üzemmódja egy gépkocsinak. Leginkább a kézi nyomatékvaltóval rendelkező járművek (ez a gyakoribb) kuplungszerkezete érintett. Ezen szerkezetek „halála” a lassú haladás, hiszen gyakran kell csúsztatni a tengelykapcsolót, ami ennek következtében nagyon hamar elkopik. Ezt a folyamatot csak rontja, ha valaki hosszú időn keresztül használja „csúsztató üzemmódban” a szerkezetet, ekkor túlmelegszik, „megég” a tárcsa felülete, még jobban fokozva a kopást. Emelkedően éppen ezért a fékkel célszerű álló helyzetben tartani járművet, a tengelykapcsoló folyamatos csúsztatásával szemben. A másik alkatrész a nyomatékvaltó, ami megsínyli a lassú haladást. Üresből 1-es fokozatba és vissza üresbe, időnként 2-es fokozatba való kapcsolások ismétlődnek.

Ha nem kívánjuk állandóan üresbe helyezni a váltót, és a tengelykapcsolót kinyomott állapotban tartjuk, akkor pedig a kinyomó szerkezet fáradhat el. Látszik, hogy nincsen ideális vezetéstechnika, csak kevésbé káros. A járművek tervezőit is meg kell említeni, megfelelő tervezéssel elkerülhetők a nagyobb károk, jobban elviselhetik a járművek a nagyobb igénybevételt.

Útfelület: A forgalmi sáv kapacitása közel teljes mértékben kihasznált a torlódások alatt, további járművek az adott útszakaszon már fizikailag nem férnek el. A csúcsforgalomra jellemző gyorsítás-lassítás ciklikus ismétlődése miatt az arra hajlamos útfelület hullámosodhat. Ezt főleg a nagyobb járművek erőteljesebb lassítása idézheti elő melegebb időben, amikor az aszfalt, magas hőmérséklete következtében meglágyul, ekkor nyomvályú is kialakulhat. E hátrányokat már az út tervezési fázisában figyelembe kell venni, ennek megfelelően kell kialakítani az útfelületet. Pontos technológiai előírások léteznek erre, az alapozáson keresztül a felhasznált anyagminőségen át, a tömörítési eljárásokig. A beton alapú technológiával kétségkívül a legtartósabb, legellenállóbb megoldások hozhatóak létre, viszont nagyobb anyagi ráfordítást jelent rövidtávon. Ezen kívül rendkívül érzékeny az építési technológia precíz betartására.

Környezet: A belsőégésű motorok működése közben keletkező égéstermékek a légkörbe kerülnek, így szennyezik a levegőt. Torlódásnál fokozott kibocsátás tapasztalható. Lényegében a kipufogó gázok minden összetevője bizonyos szempontból káros. A legalapvetőbb égéstermék a széndioxid (CO_2), ennek a gáznak legismertebb hatása az üvegházhatás fokozódásában nyilvánul meg. A globális felmelegedés fő „bűnösének” tartják. Közvetlenül is káros a szénmonoxid (CO), ami belélegezve mérgezést okoz, mert megköti a vér hemoglobinját, csökkentve a vér oxigén felvevő képességét, ezzel rontva a sejtek oxigénhez való hozzájutását. Jelen vannak még a nitrogénoxidok (NO_x), ezek a molekulák a savas esőkért felelősek. Korábban jellemző volt még a kénoxidok (SO_x) jelenléte, de ma már csak kénmentesnek (max. 10 ppm) tekinthető üzemanyagot lehet kapni, így ennek káros hatásai minimális szintre csökkentek.

Forgalomirányítás: Őket közvetlenül nem érinti hátrányosan a torlódás, viszont az ő feladatuk a megakadályozása, forgalomszervezési módszerekkel való enyhítése. Ideális esetben el tudják kerülni a kialakulását is. Ahhoz, hogy látványos eredményeket érjenek el, sok módszert kell bevetniük, összetett stratégiát kell kialakítaniuk. Jelen dolgozat a csomópontokban található forgalomirányító berendezések

által használható módszerekkel foglalkozik. A jelenleg alkalmazott módszerekről egy külön fejezetben lesz szó.

Nézzük meg, hogy milyen előnyökkel számolhatunk, ha csökkenteni tudjuk a torlódások mennyiségét, vagy akár meg is tudjuk szüntetni azt. A fentebb ismertetett kategóriákat vesszük sorra:

Járművezető: A torlódások csökkenésével rövidebb utazási idővel, simább haladással és a járművezetők szempontjából kevesebb stresszel számolhatunk, ami kevesebb idegeskedést jelent, ennek folyományaként vidámabb, boldogabb emberek vesznek részt a közlekedésben. Ez egy közös, mindenki által észlelhető előny. Nem utolsó sorban a közlekedési morál is javul.

Jármű: Csökken az igénybevétel, kevesebb alkatrésze megy tönkre a járműnek. Ennek a jármű tulajdonosok is örülnek. A gépjárműjavítók már kevésbé.

Útfelület: Kisebb lesz az útterhelés, kevesebb hullámosodás várható, ritkább karbantartás szükséges.

Környezet: Csökken a járművek kibocsátása, ezáltal a környezeti terhelés is kisebb lesz. A üvegházhatásért felelős gázokból is természetesen kevesebb jut a légtérbe, lassítva a globális felmelegedés folyamatát. A szénmonoxid mérgezés és a savas esők mértéke is csökken.

Forgalomirányítás: Megelégedettséggel tölti el őket, hogy az általuk kitalált módszerek sikeresek, lendületet kapnak, hogy újabb módszereket dolgozzanak ki, további eredmények elérésének reményében.

Ezekon kívül nemzetgazdasági szintű, pénzügyi előnyökkel is számolhatunk. Ezzel a témával külön is foglalkozni fogunk.

2.1. Torlódások kialakulása

Ahhoz, hogy kezelni tudjuk, vagy jobb esetben akár elkerülni a torlódást, tisztában kell lennünk kialakulásának okaival. Először definiáljuk a torlódást. Akkor alakul ki torlódás egy adott útszakaszon, ha annak kapacitásánál nagyobb számú jármű szeretne áthaladni rajta egy adott időintervallumban. Meg kell említenünk, hogy ez a kapacitás nem mindig ugyanannyi, dinamikusan változó érték lehet. Ugyanis egy csomópont áteresztő

képességét (kapacitását), a szabad jelzések ideje határozza meg. Ha megváltoztatjuk ezt a szabad időt, akkor változik a kapacitás is.

De ennél egyszerűbb oka is lehet az áteresztő képesség csökkenésének. Például, ha egy jármű lerobban egy forgalmi sávban, akkor annak a sávnak az áteresztő képessége nulla csökken, a szomszédos sávra kétszer akkora forgalmat terelve. Egyből feleakkora lett egy kétsávos út kapacitása, míg a járművek száma egy cseppet sem csökkent. Ráadásul nem feltétlenül kell műszaki hibának lennie, elég, ha valaki vészvillogóval „leparkolja” járművét például egy bolt előtt, nehogy pár méterrel többet kelljen gyalogolnia. Ehhez még járulékos hatásként vehetjük, ha nem a jól bevált zipzár elvet követik a vezetők (egy jobbról, egy balról), hanem kicsinyes módon, nem engedik el a fennakadást okozó járművet kikerülni igyekvőket. Ennek hatása, hogy csak az egyik sáv fog haladni, a másikban csak nő a sor hossza.

2.2. Csomóponti torlódás

Előfordulhat az az eset is, hogy a gyalogosok miatt, a járművek nem tudnak bekanyarodni, vagy legfeljebb 1-2 kocsi. Ezen értelmes fázistervezéssel lehet segíteni, vagy aluljáró kialakításával a járókelőknek.

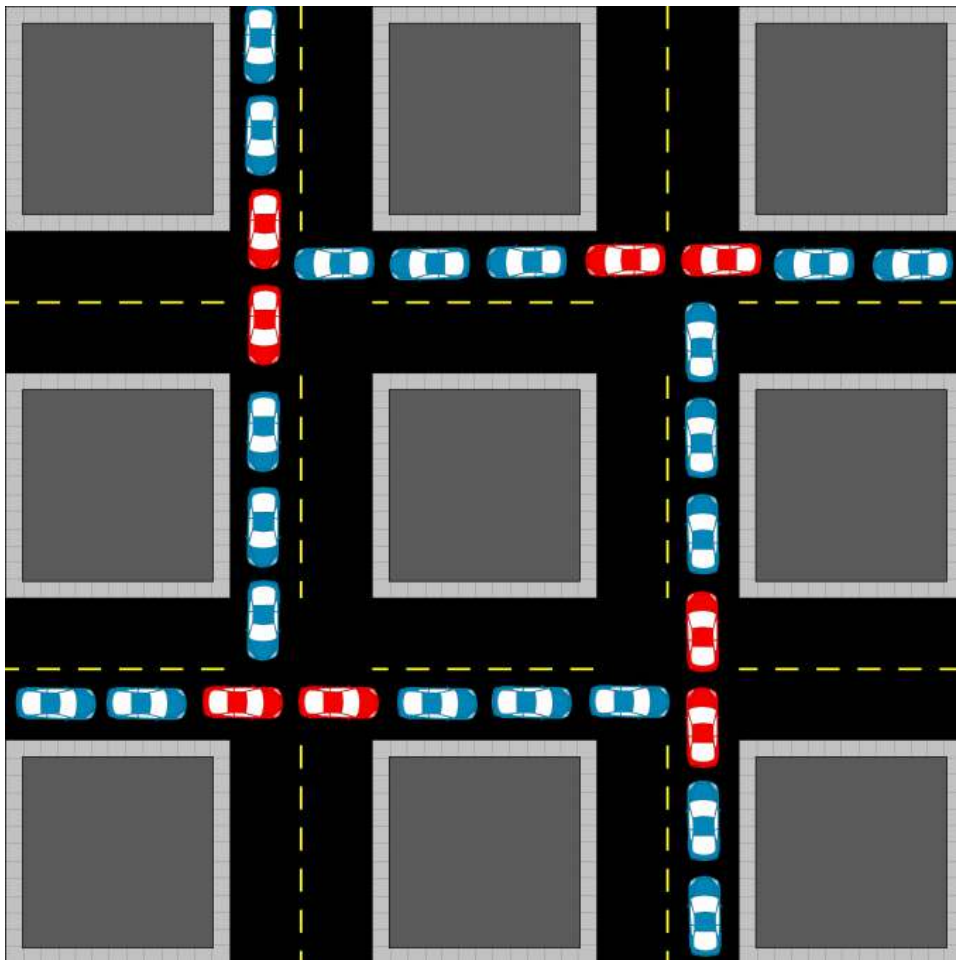
Ehhez hasonló, amikor már amúgy is torlódás közeli állapot alakult ki, a kanyarodó járművek „feltöltik” a rendelkezésre álló teret, amikor az egyenesen haladók szabad jelzést kapnak, már nem tudnak áthaladni. Megeshet az is, hogy mindig csak a kanyarodóknak jut szabad hely, az ugyanabba az irányba igyekvő, csak egyenesen haladóknak már nem. És már kész is a torlódás. Ehhez kapcsolódik az a helyzet, amikor az egyenes haladni vágyók megunják a várakozást, és szabálytalanul a kereszteződés közepén megállnak, biztosítva maguknak az áthaladást a kanyarodókkal szemben. Viszont ebben az esetben a keresztben haladókat akadályozzák, ahol emiatt szintén torlódás alakulhat ki. Látható, hogy nagyon könnyen kialakulhat egy öngerjesztő torlódási folyamat.

Számolnunk kell azzal az esettel is, amikor nem szándékosan állnak meg a járművek a kereszteződés közepén, hanem figyelmetlenségéből. Ekkor nem figyelik előre, hogy még átférnek-e a kereszteződésen, hanem csak mennek az előttük haladókkal együtt. Egy másik eshetőség, amikor egész egyszerűen nem lehet előre felmérni, hogy hol fog megállni a kocsisor, a csomópont előtt, vagy az után. Ennek oka lehet, hogy egy magasépítésű jármű mögött haladunk, vagy egy széles kereszteződésen akarunk áthaladni, ahol nem lehet ellátni olyan messze, hogy rendszeren fölmérhetnénk a helyzetet. A végeredmény szempontjából lényegtelen, hogy miért áll meg egy jármű a kereszteződés köze-

pén, az számít, hogy ez megtörténik. És mint ezt most láthattuk, nem feltétlenül a közlekedési morál okozza a jelenséget, pontosabban nem kizárólagosan az okozza.

2.3. Torlódások öngerjesztő hatása

Az 1. ábrán látható módon a kereszteződésben „ragadt” járművek megakadályozzák a keresztirányú forgalomáramlást. Emiatt ott is feltorlódnak a járművek, egészen a következő csomópontig, ahol szintén beragadnak a járművek a kereszteződés közepén, és ez így megy egészen addig, amíg lényegében visszaérünk a kiindulási csomópontig. Hasonlással élve, olyan ez, mint amikor „a kígyó a saját farkába harap”.



1. ábra: Önzáró torlódás (Gridlock)^[1]

2.4. Csomóponti torlódások elleni intézkedések

A KRESZ (Közúti Rendelkezesek Egyesites Szabalyozasa) szabalyozza a keresztezodesekben elvarhato vezetoi viselkedest, a kovetkezőképpen (1/1975. (II. 5.) KPM-BM egyutttes rendelet a közúti közlekedes szabalyairól^[2]):

„9.§

(7) Zöld fényjelzésnél sem szabad az útkereszteződésbe behajtani, ha azt - forgalmi torlódás miatt - a zöld fényjelzés tartama alatt előreláthatólag nem lehet elhagyni.”

Itt némi kibúvót jelent közlekedők részére (ez szükséges is), hogy csak „előreláthatólag nem lehet elhagyni”, mert előfordulhat az is, hogy előreláthatólag úgy nézett ki, hogy el lehetett volna hagyni, de nem úgy alakult. És ez életszerű is.

Egy másik pontban olvasható, hogy:

„40.§

(5) Tilos megállni:

...

d) körforgalmú úton, **útkereszteződésben** és az úttestek széleinek metszéspontjától számított 5 méter távolságon belül, ha a közúti jelzésből más nem következik; az **útkereszteződésben** az úttorkolattal vagy útelágazással szemben megálló járműre - ha ez a többi jármű bekanyarodását nem akadályozza - a tilalom nem vonatkozik;”

Ez teljesen világos: nem szabad megállni a kereszteződésben.

Szintén a KRESZ lehetőséget ad figyelemfelkeltésre is:

„18.§

(3) Különösen veszélyes helyekre - elsősorban a vasúti átjáró és az útkereszteződés területére - szaggatott vonallal körülhatárolt sárga színű útburkolati jel (158/e. ábra) hívhatja fel a járművezetők figyelmét.



158/e. ábra”

Gyakran alkalmazzák, figyelmeztetésként, hogy a járművezetők figyeljenek oda a szabályokra.

Mindezektől függetlenül fentebb már megemlítettük, hogy még a minden szabályt ismerő, és azt betartani vágyó, szabálykövető vezetők is könnyen szabálytalanságot követhetnek el, önhibájukon kívül. Ellenérvként fel lehetne hozni, hogy mindenki várja meg, amíg az előtte haladó jármű átért a csomóponton, és csak akkor induljon el, ha már ő is át tud jutni a kereszteződésen. Valóban ez egy lehetőség, de nem életszerű, és talán még nagyobb torlódást okoznának vele a járművek, mintha egy-egy jármű megállna a kereszteződésben.

Most áttekintettük, hogy milyen szabályozási háttér található a keresztezésekben kialakuló torlódások elkerülésére. Már csak az a kérdés, hogy hogyan lehet érvényt szerezni e szabályoknak. Több lehetőség is rendelkezésünkre áll.

Talán a legkézenfekvőbb, hogy rendőri erővel, bírsággal „jobb belátásra” bírni a járművezetőket. Az államkasszába is nagyobb összeg jut, és vélhetően egyre kevesebben fognak ilyen jellegű szabálytalanságot elkövetni. Annyit bizonyosan tudhatunk, hogy akit egyszer megbüntettek kereszteződésben való megállásért, legközelebb jobban meggondolja, hogy hogyan cselekszik. De vajon az is másképpen fog reagálni az adott helyzetben, akit eddig nem büntettek meg? Ennek már jóval kisebb az esélye. Ha nem „verik nagydobra” az intézkedést, akkor hosszútávon nem érhető el eredmény, de talán még rövidtávon sem. A rendőri jelenlét önmagában is célravezető lehet, bírságolás nélkül is, de minden csomópontban nem állhat egy járőr, jelenleg jobb dolguk is akad ennél a feladatnál. Egy előre meghirdetett bírságolási kampánnyal vélhetően átmeneti eredményeket el lehet érni. Ez a fajta intézkedés a félelemre alapozza a hatását, ami működhet, de az emberek frusztrálttá válhatnak, ha mindentől félnek. Amíg nem belső készletéből cselekszünk valamit, addig fölösleges energiát emésztünk fel. Ez nem kívánatos folyamat.

A fentiek figyelembe vételével kézenfekvőnek tűnik, hogy az emberek figyelmét felhívjuk a kereszteződésben kialakuló torlódás jelenségre, elmagyarázzuk nekik, hogy ez miért rossz, miért kerülendő, mik a hatásai. Azt is elmondhatnánk, hogy mitől alakul ki, és mi a legjobb módszer annak elkerülésére. Ha elég sokat hallják a járművezetők az érveket, módszereket, könnyen magukévá tehetik a gondolatot. Ekkor nincsen stressz, nincsen büntetés, nincsen félelem, viszont van meggyőződés és belső készlet. Ez viszont anyagi erőforrásokat igényel, a másik módszerrel szemben, ahol bevétellel szá-

molhat az állam, kiadás helyett. A hatásossága akár felül is múlhatja a megfélemlítésre alapozó intézkedéseket. Érdemes lenne összehasonlítani a két módszer hatékonyságát.

Manapság rengeteg csatorna áll rendelkezésre az emberek megszólítására: televízió, rádió, nyomtatott sajtó, internet, szórólapok. Két mosópor reklám között elférne egy közlekedési kultúrát bemutató anyag is. Nem jelenthetjük ki, hogy nem léteznek ilyen akciók, de ezek főleg az ittas vezetésre, gyorsajtásra, biztonsági öv bekötésére vonatkoznak, amik - lássuk be - tényleg fontosabb kérdések a torlódásoknál, viszont lenne még néhány téma, amiről érdemes lenne tájékoztatást adni a lakosságnak. Ráadásul a kevésbé fontosnak tartott jelenségek megszüntetése közvetlenül javítaná a közlekedési morált, jobban észlelhető eredményei lennének. Ha valaki meghal, mert nem csatolta be a biztonsági övét, az egy tragédia a családnak, rossz a nemzetgazdaságnak, de közvetlenül senki sem érzékeli ennek a jelentőségét. Viszont ha sokan megállnak a kereszteződés közepén, azt azonnal észreveszik a közlekedők is. Tehát ezzel is érdemes lenne időnként foglalkozni, hogy a járművezetők szembesüljenek a problémával, ezen keresztül „mélytudati” szintre vihessék azt. Ha ezt elérnék, már sokat javíthatnánk a közlekedés hatékonyságán, viszont még mindig nem oldanánk meg az önhibán kívüli szabálytalankodást. Ehhez más eszközöket kell bevetnünk.

Ugyanakkor nem vethetjük el a több oldalról megtámogatott intézkedéseket sem. Lehet egyszerre népszerűsíteni az elveket, rendőri jelenléttel biztosítani a szabályok betartását, és végül büntetéssel elrettenteni az embereket a szabálytalankodástól. Így nem érheti „derült égből villámcsapásként” a közlekedőket a rendőri intézkedés. Megoldás lehet, hogy a kritikus csomópontokba rendőri irányítást helyezünk ki a csúcsforgalom idején. Ők képesek arra, hogy az átbocsátó mennyiségnek megfelelő járművet engedjenek át egyszerre, megakadályozva kereszteződésben való megállást. Ezzel az egyetlen gond, hogy minden kritikus helyre nem lehet rendőrt állítani, arról nem is beszélve, hogy a forgalomtechnikai szakemberek által finoman összehangolt lámpavezérlésekbe nem tudnak beilleszkedni, így egy adott szakasz átbocsátó képessége romolhat. Viszont lehetőség van arra is, hogy detektorok segítségével érzékeljük, ha már nincsen elegendő hely a kereszteződésből való kihaladásra, és piros jelzést adjunk a járműveknek. Amennyiben így meg tudjuk akadályozni a kereszteződésben való megállást, akkor minden egyéb intézkedés fölöslegessé válik. Ez ideális megoldás lenne, éppen ezért ezt a módszert kívánja bemutatni a dolgozat.

3. Jelenlegi forgalomszabályozási módszerek

3.1. Állandó időtervű

A legegyszerűbb jelzőlámpás irányítási módszer. Legalább három indoka lehet alkalmazásának. Abban az esetben indokolt a jelzőlámpás szabályozás bevezetése, ha a balesetek számának növekedése ezt szükségessé teszi. Létezik egy képlet, ahol kiszámolhatjuk, hogy mennyi a várható balesetek száma az adott csomópontban. Ezt az értéket még eltűrjük, de ha az előzetes várakozásoknál nagyobb számú baleset következik be, akkor szükséges bevezetnünk a jelzőlámpás irányítást.

$$B = \frac{125F}{(5 \cdot F + 1)^2} - \frac{F}{2 \cdot F^2 + 0,008} + \frac{F^2}{10} \quad (1)$$

ahol

B =Az útkereszteződésben várható baleseti szám (baleset/év),

F =Az útkereszteződésbe a csúcsórában belépő forgalom ezredrésze (E/h)

Másik ok lehet az, amikor elér egy bizonyos forgalomnagyságot egy adott csomópont forgalma. Aminek az lehet a következménye, hogy valamelyik alárendelt mozgás a főirányú mozgások miatt nem tud megfelelően lebonyolódni. Ennek további következménye lehet, hogy a felállási szakaszok hosszát meghaladó torlódás alakul ki, ami a további mozgásokat is akadályozni fogja.

Más megközelítéssel is létezik, vizsgálhatjuk az alárendelt irányok várakozási idejét is, ha ez 2-3 percnél hosszabb, akkor jelzőlámpás szabályozás indokolt. Hasonló ok lehet, ha a gyalogos és kerékpáros forgalomnak 1 percnél többet kell várakoznia a csomóponton való áthaladásra. Léteznek tapasztalati számok a járműforgalom oldaláról arra vonatkozóan, hogy mekkora 2x2 órán át fennálló mértékadó órai forgalomnagyságoknál indokolt a jelzőlámpás vezérlés bevezetése. Ugyanígy a gyalogosforgalom mértékéhez is köthető az intézkedés.

Harmadik ok a jelzőlámpás szabályozás bevezetésére, ha segítségével jelentősen javíthatók a forgalom egyéb jellemzői. Ilyen jellemző lehet a káros anyag kibocsátás, a gépjárművek üzemanyag fogyasztása. Az optimális jelzésidők csökkentik a várakozási időket, egységesítik a sebességszinteket, amik hozzájárulnak az előbbi jellemzők kedvező

alakulásához. Az egyes csomópontok szabályozásának összehangolása ugyanebbe a kedvező irányba hatnak.

Az állandó időtervű jelzőlámpás forgalomirányításnál alapvető követelmény, hogy egy napra, napszakonként különböző, a forgalomnagyságnak megfelelő jelzésterveket készítsünk. A forgalomirányító berendezések a megfelelő időpontban automatikusan átváltanak a megfelelő programra. Így sokkal kedvezőbb irányítást valósíthatunk meg, mintha egész nap a csúcsforgalomnak megfelelő jelzéstervet alkalmaznánk.

3.2. Forgalomtól függő

Az állandó időtervű szabályozásnál kedvezőbb irányítást valósíthatunk meg, amennyiben figyelembe vesszük a pillanatnyi forgalmi igényeket. A legkülönbözőbb forgalmi paramétereket is mérhetjük, amennyiben azokból előreutató következtetéseket tudunk levonni a forgalom alakulásával kapcsolatban. A paraméterek figyelésére detektorokat alkalmazunk. Most nézzük meg, hogy milyen módszerek léteznek a forgalomfüggő szabályozásra.

3.2.1. Programválasztás

A forgalom időbeni változásának vizsgálata alapján létrehozunk különböző, a forgalomnagyságokhoz igazodó programokat. Ezek a programok rögzített idejű jelzéstervek, jellemzően 2-8 darab tervet készítünk. Detektorokat helyezünk el a csomópont bevezető szakaszain, lehetőleg a várható maximális felállási sorhosszknál távolabb. Ezek segítségével számoljuk az aktuális forgalomnagyságokat, és ezek alapján döntjük el, hogy melyik programot fogjuk alkalmazni. 2-15 percenként számoljuk ki a várható órás forgalmat, ez alapján döntünk. Célszerű kiszűrni a pillanatnyi csúcsokat a forgalomlebonnyolódásnál, azért, hogy elkerüljük a túlzottan gyakori programváltásokat, így csak a tartós változásoknál következik be a programváltás. A váltások fix időterv alapúak, ezért nincsen értelme a gyalogosok és kerékpárosok nyomógombos bejelentkezésének.

Mivel csak a tartós változásokat követi le a rendszer, ezért csak késleltetve tud reagálni a megváltozott forgalmi igényekre. Ezen kívül csak a programkészletben feltételezett forgalomnagyságoknak és forgalmi helyzeteknek megfelelő esetekben képes a tényleges forgalmat optimálisan szabályozni. Ezért elsősorban az összehangolt jelzőlámpás forgalomirányítás szabályozására alkalmazható eredményesen. Egyedi csomópontoknál, csak

akkor jöhet szóba, ha a forgalom időbeni változása jól előre jelezhető, és ezen esetekre készíthető rögzített idejű jelzésterv.

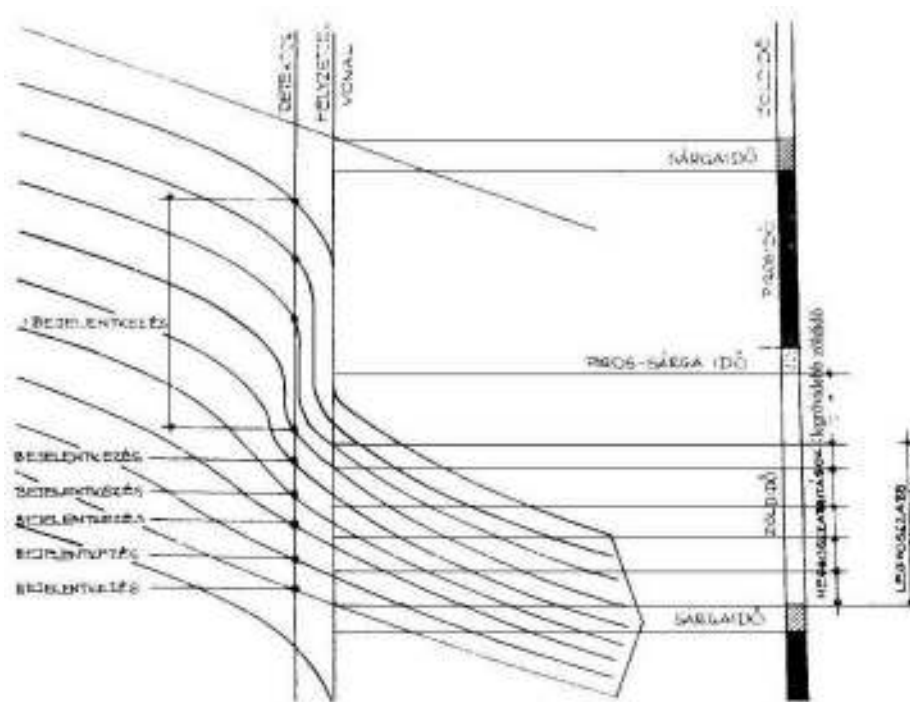
3.2.2. Rugalmas szabályozás

A pillanatnyi forgalmi igényeket a programválasztásnál jobban kiszolgálja a rugalmas szabályozás. Ehhez a fázisok számát, sorrendjét és a szabad jelzések időtartamát változtatjuk meg a forgalimirányító berendezés működése közben. A járművek érzékelését detektorok végzik, a gyalogosok és kerékpárosok nyomógomb segítségével jelezhetik áthaladási szándékukat. A detektorokat egy-, vagy kétsoros elrendezésben valósíthatjuk meg. Az egysoros megoldásnál 10-12 méterre kell elhelyezni a csomóponttól a detektorokat, míg a kétsorosnál, az első sort 4 méterre, a másodikat 40 méterre célszerű telepíteni. Ez utóbbi elrendezés megbízhatóbb, kisebb a jármű bennmaradásának esélye, valamint a kisforgalmú időszakokban szinte megállás nélkül átvezethetők a járművek a kereszteződésen.

A detektoroknak kettős funkciójuk van. Az első a bejelentkezés, amivel a jármű jelzi az áthaladási szándékát. A második, folyamatos járműérkezéskor a szabad jelzés idejét nyújthatja meg.

A járműmozgásokat továbbra is kötött módon fázisba kell rendeznünk, ám a sorrendjüket szabadon változtathatjuk, a forgalmi igényeknek megfelelően. Ha valamelyik fázisra nincsen igény, azt a berendezés kihagyja. Ennek következménye, hogy a fázisok száma és sorrendje állandóan változhat. A későbbi ellenőrizhetőség miatt 1 órára visszamenően tárolni kell a vezérlés fő paramétereit, különben nem lehetne tudni, hogy például egy balesetnél milyen jelzéseképek voltak.

A rugalmas szabályozás fázisidő-tervében a minimális zöldidők szerepelnek. Ezeket szabadon lehet nyújtani. A nyújtás feltétele, hogy egy megadott időn belül újabb jármű jelentkezzen be a detektorokon. Ez az idő tipikusan 2-5 másodperc lehet. Korszerű berendezések a tilos irány várakozási idejének növekedésével egyre kisebb időköznel hosszabbítja meg az aktuális fázist. A 2. ábrán látható az áthaladások elvi folyamata.



2. ábra: Jelzőlámpás kereszteződésen való áthaladás út-idő diagramja

Ugyanakkor maximalizálni kell a fázisnyújtások idejét. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy ha az összes fázist megnyújtjuk, akkor sem lehet több az összegük a megszokott periódusidőknél. Ez módosulhat, amennyiben csak egy fázisra van igény. Ebben az esetben addig lehet nyújtani, amíg bejelentkezés nem történik egy másik irányból.

A rugalmas szabályozás előnyei a kisforgalmú időszakokban jelentkeznek. Csúcsforgalomban fixidejű jelzéstervként működnek. Éjszakai üzemmódban is kedvező az alkalmazása, hiszen annak az iránynak ad szabad jelzést, ahonnan a bejelentkezés történik, a másik iránynak tilos jelzést mutat. Biztonság szempontjából sokkal kedvezőbb a sárga villogó üzemmódnál, mert ott a jármű vezetőinek kell az elsőbbségadási szabályokra odafigyelniük, és alkalmazniuk.

3.2.3. Programmódosítás

Hasonló a rugalmas szabályozáshoz, annyival korszerűbb, hogy igényesebb algoritmust is alkalmazhatunk. Alapvetően a forgalomirányító központok veszik igénybe ezt a funkciót, hozzá tudják illeszteni a szomszédos csomópontok forgalmi helyzetéhez az adott kereszteződés szabályozását. De csomópont szintű szabályozás is lehetséges, a detektorok által szolgáltatott adatok feldolgozásával avatkozhatunk be a már ismertetett eszközök segítségével: fázisnyújtás, fáziscsere. A szabályozás előnye, hogy még jobban képes lefedni a pillanatnyi forgalmi igényeket.

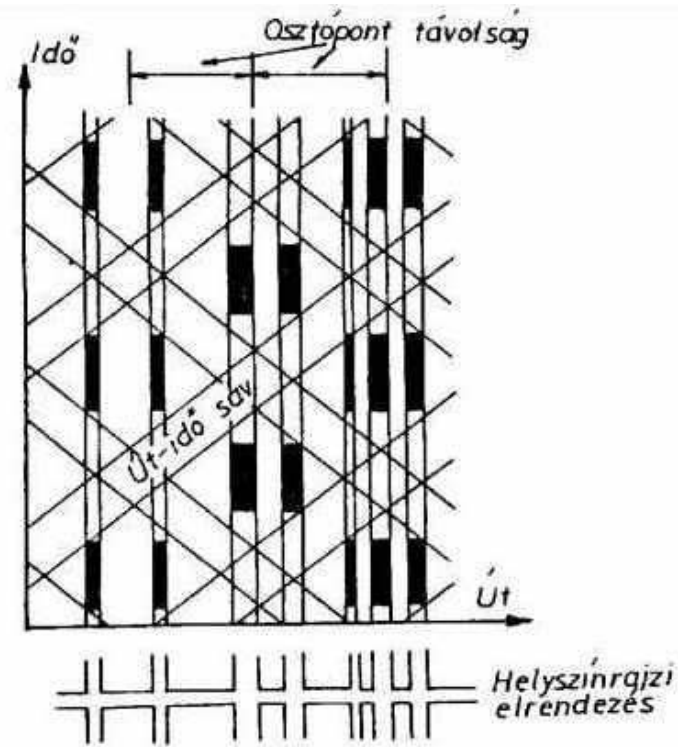
3.2.4. Programalkotás

Teljes forgalomtól függő szabályozás hozható létre a programalkotással. Ebben az esetben semmilyen megkötés nincsen a fázisidő-terv létrehozásánál. A forgalmi adatokat mérhetjük, ezekből becsléseket végezhetünk, és a pillanatnyi igényeknek megfelelően hozhatjuk létre a jelzéstervet. Akár folyamatos tervezés is lehetséges, nem szükséges előre egy ciklust megtervezni. A forgalomirányító központok is alkalmazhatnak programalkotást, de a csomópontnál telepített forgalomirányító berendezések is. A programalkotó szabályozási mód, megfelelő algoritmus esetén képes kihozni az elméleti áteresztőképességből a lehető legmagasabb kihasználtságot. A beavatkozás sikere nagyban függ attól, hogy milyen szabályozót tervezünk a rendszerhez. Ezen a területen szinte határtalan lehetőségek állnak rendelkezésre, de tegyük hozzá, hogy a végtelenségig nem növelhető az átbocsátóképesség. Az optimális szabályozás azonban megközelíthető vele.

3.3. Összehangolás

Az egymással szomszédos csomópontok jelzésterveinek összehangolása számos előnyös következményekkel járhat, többek között a forgalombiztonság és kapacitás növelésével, a várakozási idők és megállások számának csökkenésével, közlekedésüzemi költségek és környezetkárosító hatások mérséklődésével és az utazási sebesség növelésével.

Több paraméter figyelembevétele szükséges az optimális összehangolás megvalósításához. A hálózati szintű összehangolásnál előtérbe kerülnek a hálózati előnyök, szemben a csomópont szintű előnyökkel. Ennek egyik oka, hogy a periódusidőket is egyeztetni kell, aminek az alapja a mértékadó csomópont periódusideje lesz. Rendkívül körültekintően kell eljárunk a tervezésnél, mert nehéz úgy összehangolni egy útszakaszt, hogy a keresztforgalomnak is kielégítő legyen a jelzésterv. Gondot okoz még, hogy az egymással szemben haladó irányok is élvezhessék az összehangolás eredményeit. A következő képen egy összehangolási rajzot láthatunk, ahol a jármű út-idő diagramja, és a jelzésterv is szerepel.



3. ábra: Csomópontok összehangolásának elvi vázlata

A számítástechnika fejlődésével ma már lehetőség van komolyabb számítások elvégzésére, és szimulációk lefolytatására is. Valamint sokkal összetettebb, kifinomultabb logikát hozhatunk létre, a legújabb tudományos eredmények felhasználásával.

4. Mérési eszközök, detektorok

Ebben a fejezetben ismertetjük a leggyakrabban alkalmazott detektorokat. Rendszerint a rendelkezésre álló eszközöket a működésük fizikai elve szerint csoportosítjuk, most is így teszünk. Bemutatjuk az egyes eszközfajták működési alapelvét, előnyeit és hátrányait.

4.1. Induktív hurokdetektor

A detektor készülék három fő részből áll: egy hurokból, egy feldolgozóegységből, és a két részt összekötő kábelből. Az összekötő kábel anyaga a hurokéval azonos. Működése az elektromágneses jelenségre épít. A hurkot az útfelületbe építjük be, mérete általában 2x1,5 méter. Ebbe a hurokba váltakozó feszültséget vezetünk, aminek hatására mágneses mezőt hoz létre maga körül. Egy jármű detektor feletti elhaladásakor a mágneses mező megváltozik, mivel a jármű fém tartalma hatással van a mágneses térre. Így megváltozik az áramkör ellenállása, induktivitása. Ennek következménye lesz, hogy az induktivitással összefüggő fáziseltolás mértéke is meg fog változni. A feldolgozó egység ezt figyeli, segítségével következtetést tud levonni az áramkör induktivitására vonatkozóan, ezen keresztül képes érzékelni a detektor felett elhaladó járművet. Eddig az analóg hurokdetektor működését vázoltuk.

A digitális hurokdetektor felépítése jelentősen nem tér el az analógétól, alapvetően anynyi a különbség, hogy a feldolgozó egység nem a fáziseltolást figyeli, hanem a frekvencia megváltozását. A jelfeldolgozó egység még más funkciókkal is rendelkezik, így például a környezeti hatásokhoz képes hozzáigazítani a jelfeldolgozást. Ez hosszabb, több órás foglaltság érzékelése esetén elengedhetetlen. Az analóg rendszer megbízhatatlanná válik ilyen hosszú foglaltság esetén.

Az alábbi paramétereket mérhetjük egy hurokdetektorral:

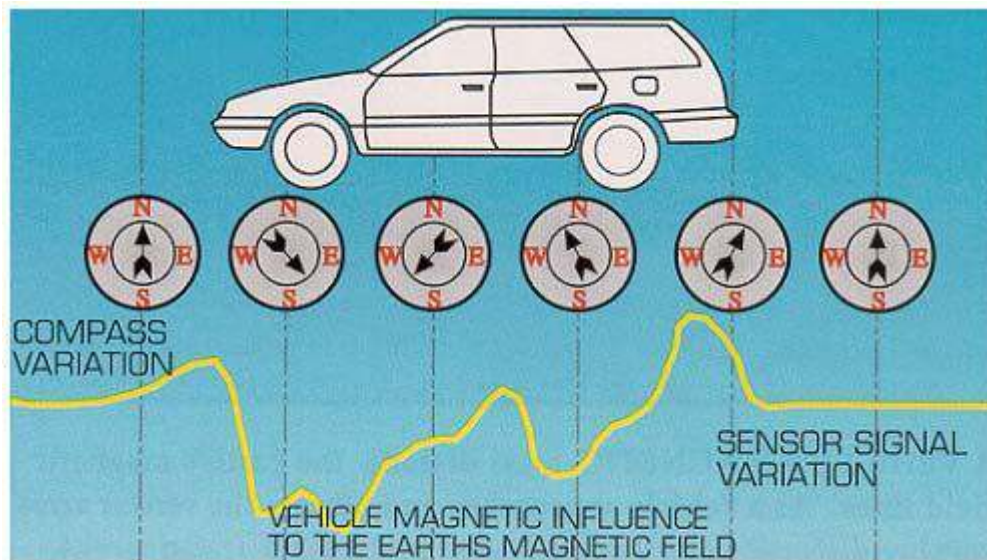
- Foglaltság (%)
- Foglaltsági idő (s)
- Követési időköz (s)
- Sebesség (m/s)

Újabb fajta detektorok az elhangolódás lefolyásából képesek az egyes járműkategóriákat megkülönböztetni egymástól, így a forgalomfelvételeknél pontosabb, árnyaltabb képet kaphatunk az adott útszakasz forgalmi helyzetéről.

4.2. Mágneses leképezésen alapuló detektor

A föld viszonylag gyenge mágneses erőterrel rendelkezik. Ennek ellenére ezt az erőteret a járművek saját maguk körül eltorzítják, a bennük található fémek (főleg acél) következtében. Bár a jelenség ismert volt már régebben is, mégis sokáig gondot okozott a jelenség megbízható mérése. Ma már nagy pontosságú műszer létezik erre a feladatra. Az eljárást VMI¹-nek nevezik.

A VMI lényege, hogy a szenzor fölött elhaladó jármű, időben változó jelet hoz létre a detektorban. Lényegében az erővonalak irányát tudja meghatározni egy adott pillanatban.



4. ábra: Jármű hatása a föld mágneses erőterére

A rendszernek rengeteg előnye van a többi mérési eszközzel szemben. Nagy pontosságú és nagy megbízhatóságú adatokat szolgáltat. Ezen kívül kis helyigényű, aminek következményeként egy mérő egységbe két érzékelő is beépíthető, hogy sebességet is tudjon mérni. Ennek segítségével a követési távolságot is ki tudja számítani a rendszer, a követési időt is felhasználva, amire más detektorok nem képesek megbízhatóan. Így az egyik legfontosabb forgalmi paraméter a járműsűrűség meghatározható. Jól jellemzi a rendszer hatékonyságát, hogy folyamatos forgalom esetén 99 %-nál is magasabb mérési pontossággal bír, míg városi forgalomnál, ahol sok a megállás, elindulás, sem esik 97% alá ez az érték. Ez kiemelkedő eredmény a detektorok között. A pontosság oka a másodpercenkénti 4000 mérésszám (250 μ s egy mérés). Sebesség számításhoz 100 ms sem szükséges a mérőeszköznek.

¹ Vehicle Magnetic Imaging

Rendkívül ellenálló konstrukció hozható létre a VMI-vel, amire sem az időjárás, sem a járművek fizikai megterhelése nem hat károsan. Emellett a karbantartási igénye is alacsony.

Olyannyira precíz mérést végezhetünk az eljárással, hogy még az egyes járműtípusokat, egészen járműmodell szintjéig meg tudjuk határozni. Ennek oka, hogy minden modell egyedi módon változtatja meg a föld mágneses erőterét.

4.3. Kamerás járműérzékelő

A rendszer alapját a kamera adja, az innen érkező információt (analóg jel) egy képfeldolgozó egység képezi le (digitalizálja), amit egy kiértékelő egység dolgoz fel. A képfeldolgozó egység a kamera lencséin keresztül látható képet képmárixra képezi le. A leképezés minősége határozza meg a felbontást. Minden képponthoz tartozik egy fényintenzitás érték, amit ha alapszínre bontunk, színes képet kapunk. Ha csak a fényerősséget tároljuk, fekete-fehér képet kapunk. A hozzárendelés eredményeként kapjuk meg a képmárixot.

A járműveket a képmárixból kell felismernünk, ehhez számos matematikai eljárás áll a rendelkezésünkre. A kép időbeli változását kell csak figyelni, tulajdonképpen a mozgást tudjuk érzékelni, ebből következtetünk egy jármű jelenlétére.

Előnyeit leginkább autópályán és elővárosi szakaszokon tudja kidomborítani. Városban hurokdetektor helyett nem alkalmazható eredményesen. Globális forgalmi paraméterek meghatározására nagyon alkalmas. Gyakori alkalmazási területe az esemény (incidens) detektálás.

A kamerás rendszereket CCTV² rövidítéssel szokás megnevezni, ez a zárt (nem nyilvános) adásra utal.

4.4. PIEZO elvű detektor

A PIEZO kristályok jellegzetes tulajdonsága, hogy nyomás hatására feszültséget keltenek. Ezt az elvet felhasználva hoztak létre egy detektor fajtát. A feszültség arányos a nyomás nagyságával. Így nem csak egy jármű elhaladását, hanem annak tengelyterhelé-

² Closed-Circuit TV

sét is képes meghatározni a mérőeszköz. Értelemszerűen sebesség mérésére is alkalmas, egymástól adott távolságra elhelyezett detektorok segítségével. Maga az érzékelő olcsón előállítható, viszont a telepítés költségei magasak. Nem mellékes szempont, hogy az időjárás változásokra megbízhatatlansággal válaszol, ezzel jelentősen leszűkíti felhasználhatóságának területét.

4.5. Ultrahangos detektor

A méréshez felhasznált jelenséget a természetben is megtaláljuk, még hozzá a denevérek tájékozódnak így. A kibocsátott ultrahang visszaverődési idejéből ki tudjuk számítani, hogy milyen messze helyezkedik el a mérőeszközhöz legközelebbi tárgy. Lehetséges, hogy csak egy irányba sugározzuk a „hangot”, így csak egy adott területen elhelyezkedő akadályt figyelhetünk. A mérő eszközt az útfelület fölé helyezzük egy meghatározott távolságra, majd erre a távolságra kalibráljuk be, mint alaphelyzetre.

A hangot egy PIEZO kristály segítségével hozzuk létre, ami feszültség hatására megváltoztatja a vastagságát, így változó feszültség esetén hangot képes kibocsátani, a feszültségváltozásnak megfelelően. Segítségével a visszaverődő hangokat is fel tudjuk fogni, mert a folyamat megfordítható, hangnyomás hatására feszültséget hoz létre, ebben az esetben mikrofonként működik. Egymást követik az adó és vevő periódusok, tipikusan 5 ms ideig kibocsátjuk a hangot, majd 45 ms vesszük a visszaverődő hangokat. Aztán újra adás következik, majd ismét vétel. Közben folyamatosan kiértékeljük, hogy mennyi idő telt el az adott jel adásának és vételének ideje között, ebből számítjuk a távolságot. A távolságokat az idő függvényében vizsgáljuk, amiből tisztán látszódni fog, ha a mérő eszköz alatt elhaladt egy jármű.

Elég érzékeny a környezeti hatásokra, a hőmérséklet és páratartalom erősen befolyásolja mérés pontosságát. Legnagyobb „ellensége” a szél, mert a hangot a szél „elviszi”, amit egy idő után már nem képes az eszköz kezelni (kb. 120 km/h a határ). Előnye, hogy olcsó és tartós megoldás. Éppen ezért ott használják, ahol a hagyományos eszközök nem alkalmazhatóak, mert gyorsan tönkremennek a környezeti hatások miatt (pl. hurorketektor szakadás).

4.6. Egyéb detektálási módszerek

Ezeket ismertetésétől eltekintünk, mert vagy nem kapcsolódik közvetlenül a csomóponti forgalomszabályozáshoz, vagy nem elterjedt eljárásokról van szó.

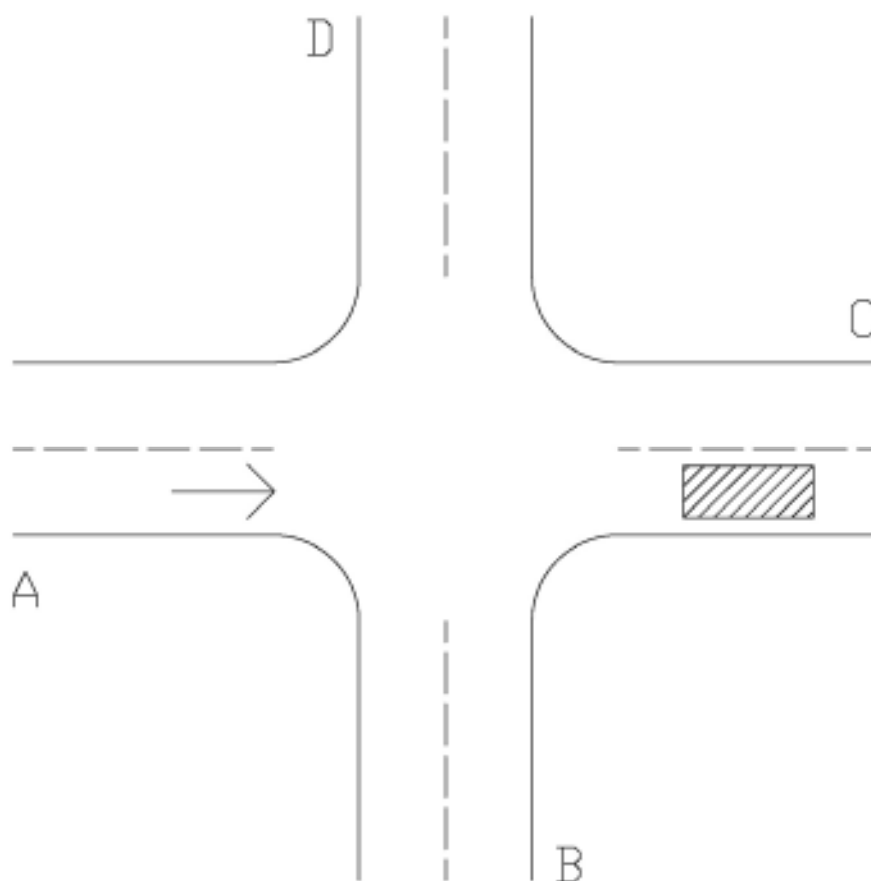
A következő fizikai elvek szerint működő detektorok léteznek még:

- Elektromos kontaktus
- Fénysugár
- Infravörös
- Radar és lézer
- Mikrohullámú
- Műholdas

5. Torlódásdetektálási módszerek

5.1. Területfoglaltság módszer

Az 5. ábrán látható egy csomóponti elrendezés. A sraffozott terület jelöli a detektor által vizsgált területet. A járművek „A-C” irányban haladnak, a menetirány szerinti jobb oldalon. A szabályozást arra alapozzuk, hogy a detektor által vizsgált területen milyen foglaltság észlelhető. Amikor a jelölt terület foglaltsága elér egy bizonyos szintet, akkor avatkozunk be a vezérlésbe. Feltételezzük, hogy amikor ezen a területen a járműsűrűség megnő, akkor torlódással állunk szemben, hiszen abban az esetben nő a járműsűrűség, amikor a sebességük lecsökken.



5. ábra: Területfoglaltság módszer, detektor elhelyezkedése a helyszínrajzon

Alapösszefüggés:

$$S = \frac{N}{v} \quad (1)$$

ahol

S : forgalom sűrűség (jármű/km),

N : forgalom nagyság (jármű/óra),

v : forgalom sebesség (km/óra).

Tehát adott forgalommagysághoz, adott sebesség mellett meghatározható a járműsűrűség. Torlódás esetén rendkívül lecsökken a járművek haladási sebessége. Ebből következik, hogy ekkor a járműsűrűség megnő. Viszont a járműsűrűségnek van egy határértéke, aminél magasabb értéket nem tud fölvenni, hiszen fizikai korlátai vannak a gépkocsi útfelületen való elhelyezkedésének. Ez a határérték megközelítőleg a következő:

$$S = \frac{L}{l + l_{köv}} = \frac{1000}{4,5 + 1,5} = 166,67 \frac{\text{jármű}}{\text{km}} \quad (2)$$

ahol

L : vizsgált távolság (m),

l : jármű hossz (m),

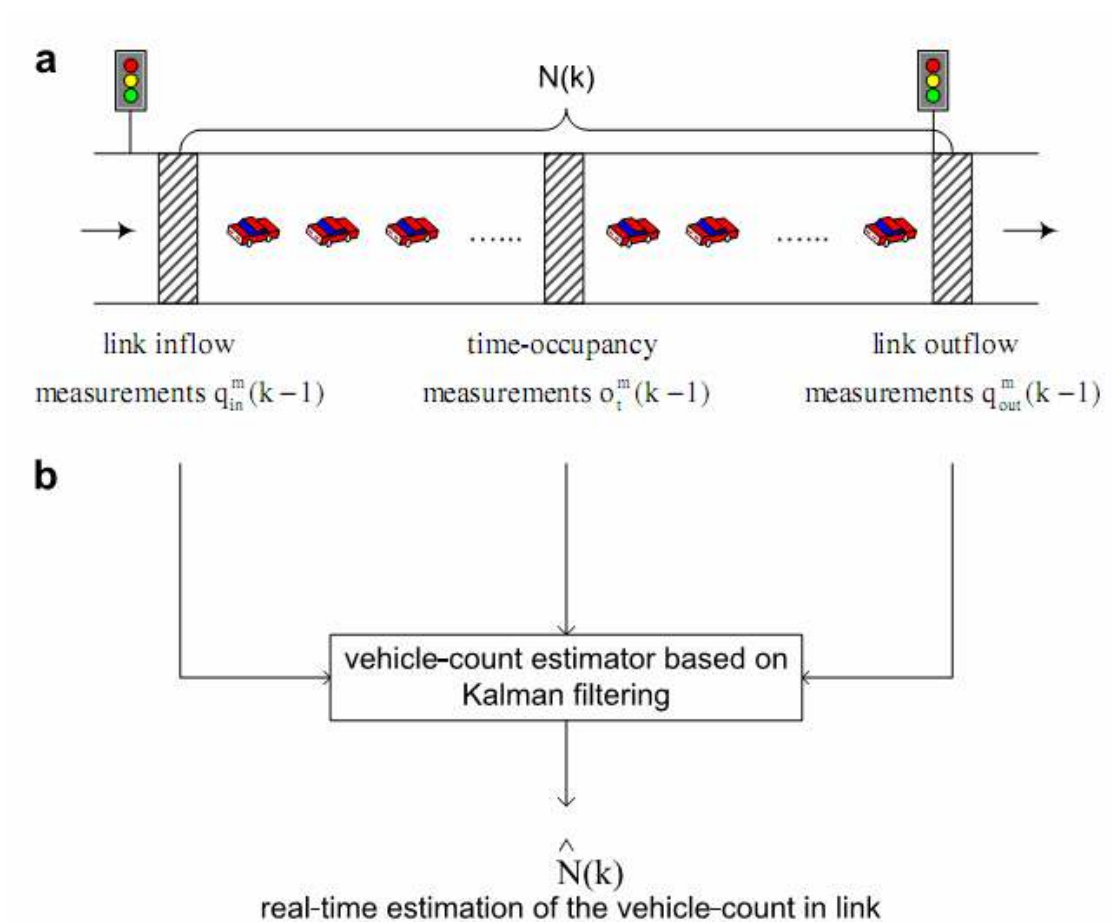
$l_{köv}$: követési távolság, álló helyzetben (m).

Jármű hosszának átlagban 4,5 métert vettünk, álló helyzetben követési távolságnak 1,5 métert. Így jött ki a 166,67-es érték. A valóságban 150 és 200 közötti sűrűség is megvalósulhat, a járművek átlagos hosszától és a követési távolságtól függően. Amennyiben elérjük ezt a határértéket, akkor a sebesség csökkenése már a forgalommagyságot fogja lecsökkenteni. Minket most az érdekel, hogy ha megközelítjük, vagy akár el is érjük ezt a kritikus forgalomsűrűséget, akkor egészen biztosan torlódással állunk szemben. Ezt a jelenséget használjuk ki a szabályozás kialakításához. Amennyiben a jelzett, sraffozott (1. ábra) területen kialakul egy adott járműsűrűség, akkor ott torlódás feltételezhető, aminek következménye az, hogy több jármű már nem fér el az adott területen. Az már a szabályozás feladata lesz, hogy mit kezdünk ezzel az információval. A detektort a szabályozási igények tudatában kell elhelyezni.

Jelenleg, méréssel nem könnyű meghatározni egy adott terület foglaltságának mértékét. Hurokdetektorral annyit tudunk bizonyosan vizsgálni, hogy az adott területen van-e foglaltság, azonban azt már kevésbé, hogy mekkora is ez a foglaltság. Létezik egy mód-

szer^[7], aminek segítségével már biztosabban meghatározható, hogy mennyi jármű tartózkodik egy adott területen. A módszer célja, hogy pontosan meg lehessen határozni, hogy mennyi jármű tartózkodik egy adott útszakaszon, jellemzően két szabályozási pont között.

Vizsgáljuk meg a módszert kicsit részletesebben! A 6. ábrán látható a mérés alapelve.



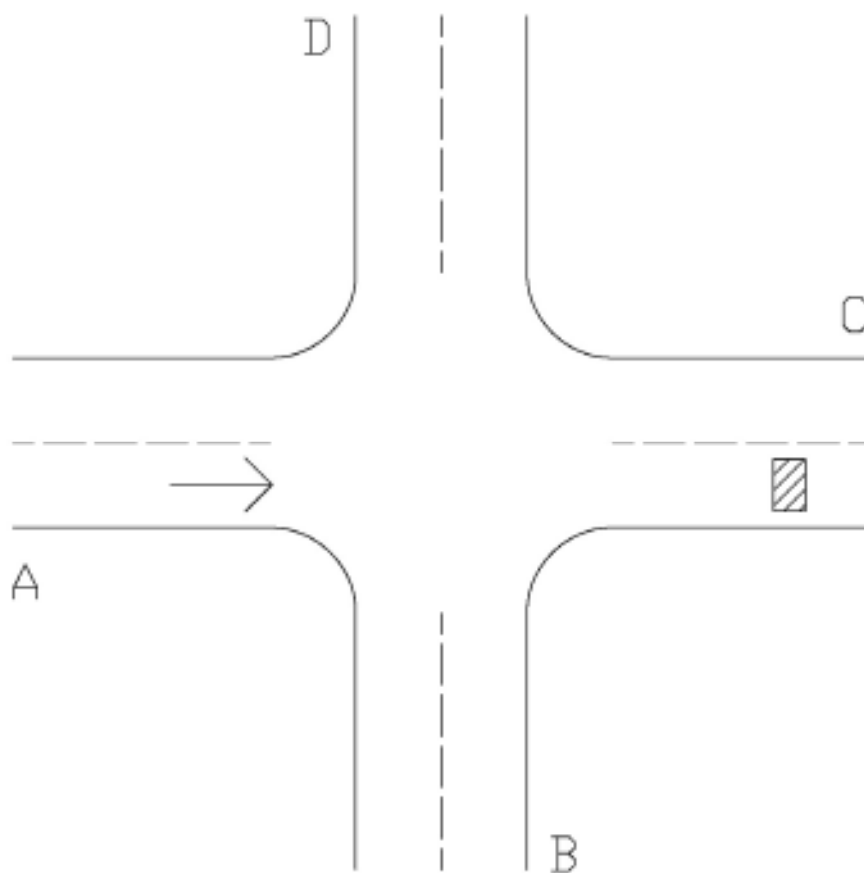
6. ábra: Valósídejű járműszám becslő elvi elrendezése

Mérjük az adott szakaszba belépő és az onnan kihaladó járművek számát. A kettő különbsége adja meg a járműszám változást. Ez alapján hajszálpontosan tudhatnánk, hogy mennyi jármű tartózkodik az adott területen. Ami miatt nem elégséges csak e jellemzőket mérni, az a mérési hibából adódik. Ugyanis előfordulhat, hogy nem érzékeli az áthaladó járművet a detektor, vagy egy gépkocsinak érzékel kettőt. A hibák felhalmozódnak, mivel nem lehet „kinullázni” a rendszert, mert akkor a területen már meglévő járműveket nem tudjuk számításba venni. Így viszont egy idő után téves adatokat fogunk kinyerni a rendszerből.

Ezt a hibát hivatott kijavítani egy, vagy több közbenső mérési pont, ahol nem csak az áthaladó járművek számát, hanem a detektor foglaltságát mérjük. A foglaltságból következtetünk a járművek által elfoglalt területre. Végül Kálmán-szűrő segítségével tudjuk pontosítani a mérés adatait. A módszer hátránya a mi szempontunkból, hogy csak lassan változó folyamatokra lehet megbízhatóan alkalmazni, például autópályán történő méréshez. Autópályán nem lassítják jelzőlámpák a forgalmat, a járművek sem változtatják hirtelen meg a sebességüket. A mérés másik előfeltétele, hogy viszonylag magas sebességgel haladjanak át a detektoron a gépkocsik, mert akkor pontosabb a mérés. A mérést tovább pontosítja, ha egymástól távolabb haladnak a járművek. Így, sajnos a városi forgalmi torlódások detektálására nem tudjuk használni a módszert. Ebben az esetben a járművek haladási sebessége nagyon alacsony, a követési távolság rövid, és a detektorokat sem lehet egymástól távol elhelyezni. Másképpen kell tehát a gyakorlatban megoldani a terület foglaltságának mérését!

5.2. Sebesség alapú módszer

A 7. ábrán látható a következő módszert megvalósító detektor elrendezés (sraffozott terület). Ezzel a detektorral több paramétert is figyelhetünk, foglaltság, követési időköz, de számunkra most a járművek haladási sebessége a fontos. A mért sebességből következtethetünk a torlódás kialakulására. Az előző módszernél ismertetett összefüggés (1) alapján megállapítható, hogy a torlódásra jellemző alacsony forgalomnagyság, és magas forgalomsűrűség következtében a sebesség rendkívüli módon lecsökken. Megfelelően megválasztott küszöbérték esetén meg tudjuk állapítani, hogy torlódás alakult-e ki az adott szakaszon. A torlódás következménye az lesz, hogy a csomópont belsejében maradhatnak a járművek, éppen ezt szeretnénk elkerülni. Ha megállapítottuk, hogy torlódás alakult ki, intézkedhetünk a beavatkozásról. Ennek célja, hogy semmiképpen se akadályozza a következő fázisban haladó járművek szabad áramlását egy, a konfliktusponton kényszerből tartózkodó jármű.



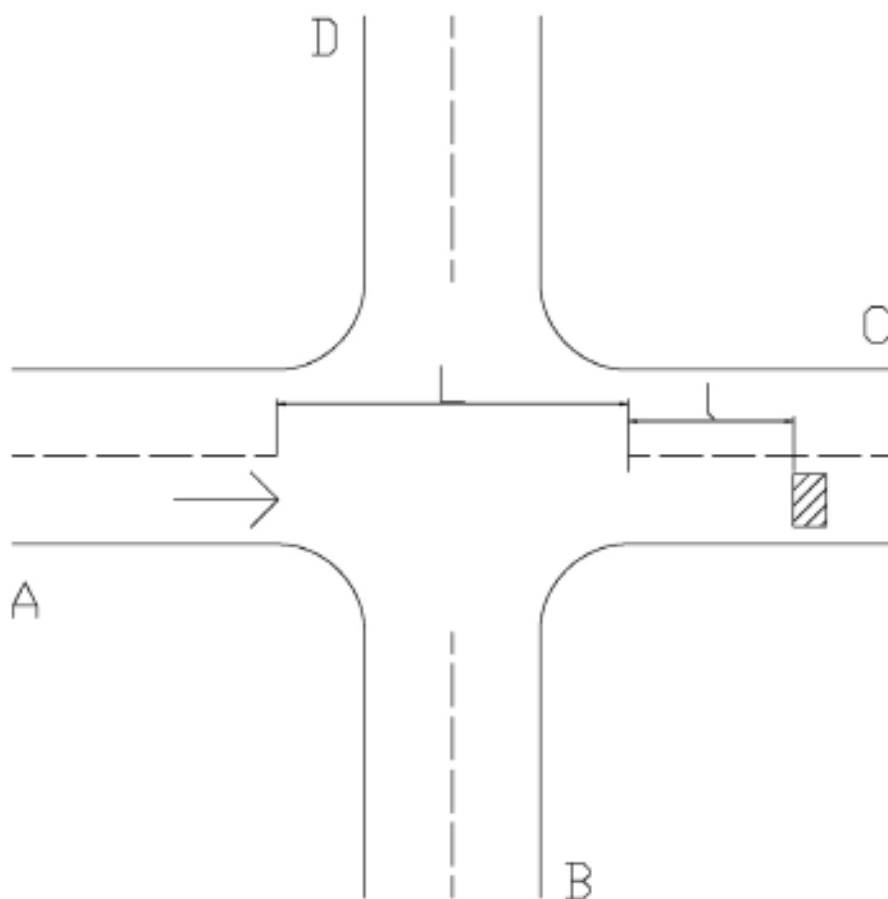
7. ábra: Sebesség alapú módszer, detektor elhelyezkedése a helyszínrajzon

Több lépcsőben érzékelhetjük a torlódás kialakulását. A detektor foglaltságának növekedését, és a sebességet figyeljük első körben. Ha nő a foglaltság, és csökken a sebesség, fölkészülhetünk a torlódás közeli kialakulására. Ezt követően elképzelhető, hogy hosszabb foglaltság, vagy éppen a foglaltság hiánya lép fel. Ez arra utalhat, hogy a járművek megálltak. Ha a detektoron állnak meg, akkor hosszú foglaltságot érzékelünk. Amennyiben két álló jármű között helyezkedik el a detektor, akkor pedig nem mérünk foglaltságot. Azért szükséges előre fölkészülnünk a torlódásra, hogy biztosan el tudjuk dönteni, hogy a foglaltság hiánya nem a járművek hiányát jelzi, hanem a megállásukat. A foglaltság hosszának kell egy küszöbértéket adnunk, amennyi idő után a torlódást kialakulnak tekintjük, detektáltuk.

A detektor csomóponttól mért elhelyezési távolságát pontosan meg kell határoznunk ahhoz, hogy hatékony beavatkozást végezhessünk a kereszteződésen belüli torlódások kialakulása ellen.

A következő paramétereket vizsgáljuk:

- Csomópont szélesség (L)
- Detektor csomóponttól való távolság (l)
- Gépkocsik hossza, plusz megálláskor az előző jármű mögött hagyott távolság (l_g)
- Gépkocsik követési távolsága ($l_{köv}$)
- Detektor detektálási ideje (t_{det})



8. ábra: Detektor elhelyezkedésének távolsága a helyszínrajzon

Kereszteződésen belül abban az esetben alakul ki torlódás, amikor a következő csomópontból felépülő sor eléri a vizsgált csomópontunkat. A figyelmetlen járművezető könnyen egy konfliktusponton állhat meg, akadályozva a keresztirányú forgalmat. Amennyiben ezt el szeretnénk kerülni, úgy kell érzékelnünk a torlódást, hogy a reakcióidőt is beleszámolva, a járművek időben kapjanak jelzést a megállásra, hogy semmi esetre se álljanak meg a kereszteződésen belül. A jelzés kiadásakor feltételezhetően már tartózkodnak járművek a csomópontban, valamint a csomópont és a detektor közötti területen is. Ezt mind figyelembe kell vennünk a detektor elhelyezési távolságának számításakor. A fizikailag telepített detektort nem tudjuk dinamikus módon áthelyezni, ezért átlagos, vagy csúcserővel kell számolnunk, hogy biztosan ne alakulhasson ki torlódás.

A kamerás rendszerű detektoroknál (CCTV) már jobb lehetőségek állnak rendelkezésre a mérési területek megváltoztatására.

A csomópont szélessége (L) adottság, az aktuális kereszteződés szélességét kell figyelembe vennünk. Célszerű az útfelületre felfestett megállási vonaltól a csomópont kivezető oldalán esetlegesen elhelyezkedő gyalogos átkelő végéig számolni ezt a távolságot. A lényeg, hogy azt a távolságot kell figyelembe vennünk, ahol nem állhatnak meg a járművek, fordítva vizsgálva, ahol már megállhatnak.

Belépésnél a jármű eleje, kilépésnél a hátulja számít. Ezzel kerül képbe a jármű hossz. Nyilván csak átlagos értékkel célszerű számolni, nincsen értelme másképpen, 4,5 m-t szoktak megadni. Ehhez jön még a megálláskor az előző jármű mögött hagyott távolság, ami tipikusan 2 m. Ebben az esetben nem baj, ha a valóságosnál nagyobb távolsággal számolunk, hiszen így kevesebb jármű elféréseivel számolunk. A követési távolság ($l_{k\ddot{o}v}$) a sebesség (v), és a követési időközéből ($t_{k\ddot{o}v}$) származtatható.

$$l_{k\ddot{o}v} = v \cdot t_{k\ddot{o}v} \quad (3)$$

Jármű sebességnek jelzésterv készítéskor a biztonság miatt kilépésnél 7 m/s-ot, belépésnél 11,1 m/s-ot szoktunk megadni. Erre azért van szükség, hogy a legrosszabb esetre („worst case”) készüljünk fel. Feltételezve, hogy a tilos jelzés előtt áthaladó jármű lassan éri el a konfliktuspontot, az éppen szabad jelzést kapó, keresztirányból jövő jármű pedig lendületből halad át, gyorsan éri el a konfliktuspontot. A közbenső idők kiszámításánál szükséges ez a számítási mód. A mi esetünkben életszerű sebességértékekre van szükség, mert más a célunk. Ahhoz, hogy a számunkra leginkább megfelelő sebességgel számoljunk, további vizsgálatra van szükség. Nekünk a járművek követési távolsága az érdekes.

Követési időköznek rendszerint 2 másodpercet szokás venni, ez egy jó kiindulási alap, ezen nem változtatunk. Méretezésünkhöz a lehető legrövidebb követési távolsággal kell számolnunk, hiszen ekkor tartózkodik a legtöbb jármű egy adott területen, ekkor a legmagasabb a járműsűrűség. Ez biztosíthatja számunkra, hogy torlódásdetektáláskor a beavatkozásunk elérje célját, ne álljanak meg járművek a kereszteződésben. Túl alacsony sebességgel sem érdemes számolnunk, mert téves eredményre juthatunk. Ha nagy sűrűséget veszünk alapul, akkor már nem lenne beavatkozási lehetőségünk, értelmét vesztené a szabályozás. Első körben vegyük a kilépésnél megszokott sebességet, 7 m/s-ot, később ezen finomíthatunk a tapasztalatok birtokában.

Összegezve, követési időköznek 2 másodpercet, sebességnek pedig 7 m/s-ot adunk meg. Így már könnyedén ki tudjuk számolni a követési távolságot.

$$l_{köv} = v \cdot t_{köv} = 7 \cdot 2 = 14\text{m} \quad (4)$$

Figyelembe kell még vennünk a detektor detektálási idejét is. Ez alatt az idő alatt is nő a kocsisor. Mivel távolságot szeretnénk meghatározni, ezért hosszértéket kell képeznünk belőle.

$$l_{det} = v \cdot t_{det} \quad (5)$$

ahol

l_{det} : a detektálási idő alatt megtett távolság.

Még egy szempontot nem vettünk figyelembe, ez pedig a jelzéstervben szereplő átmeneti idő. Ami a maximálisan megengedett sebesség alapján van meghatározva. Városban tipikusan 2 másodperc. Abban az esetben is célszerű ezzel számolni, amikor csak kiegészítő jelzővel jelezzük a csomópont telítettségét. Ekkor a járművezetők reakcióidejét hivatott számba venni. Ebből az időadatból is távolságot kell képeznünk.

$$l_{ám} = v \cdot t_{ám} \quad (6)$$

ahol

$t_{ám}$: átmeneti idő,

$l_{ám}$: átmeneti idő alatt futott távolság.

Következő lépésünk, hogy kiszámoljuk, mennyi jármű tartózkodik az „ $L+l$ ” távolságon, megnövelve a detektor detektálási ideje alatt megtett úttal, és az átmeneti idő alatt megtett távolsággal. Ha egy adott pillanatban tilos jelzést adunk, akkor az ezen a szakaszon elhelyezkedő járműveknek el kell férniük az „ l ” útszakaszon. Képletekkel kifejezve:

$$L + l + l_{det} + l_{ám} = l_{köv} \cdot k \quad (7)$$

ahol

k : a járművek száma.

$$l = l_g \cdot k \quad (8)$$

ahol

$$l_g = 4,5 + 2 = 6,5\text{m} \quad (9)$$

Az (7) és (8) képletek két ismeretlenes egyenletet adnak „ l ”-re. Oldjuk meg ezt az egyenletet!

Fejezzük ki (7)-ből a „ k ”-t!

$$k = \frac{L + l + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}}}{l_{\text{köv}}} \quad (10)$$

Helyettesítsük be a kapott eredményt (8)-ba.

$$l = l_g \cdot k = l_g \cdot \frac{L + l + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}}}{l_{\text{köv}}} = (L + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}}) \frac{l_g}{l_{\text{köv}}} + l \frac{l_g}{l_{\text{köv}}} \quad (11)$$

Rendezzük egy oldalra „ l ”-t!

$$l \cdot \left(1 - \frac{l_g}{l_{\text{köv}}}\right) = \frac{l_g \cdot (L + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}})}{l_{\text{köv}}} = l \cdot \left(\frac{l_{\text{köv}} - l_g}{l_{\text{köv}}}\right) \quad (12)$$

Egyszerűsíthetünk „ $l_{\text{köv}}$ ”-vel!

$$l \cdot (l_{\text{köv}} - l_g) = l_g \cdot (L + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}}) \quad (13)$$

Átrendezve „ l ”-re:

$$\begin{aligned} l &= \frac{l_g \cdot (L + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}})}{l_{\text{köv}} - l_g} = \frac{L + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}}}{\frac{l_{\text{köv}}}{l_g} - 1} = \frac{L + l_{\text{det}} + l_{\text{átm}}}{\frac{v \cdot t_{\text{köv}}}{l_g} - 1} = \\ &= \frac{L + v \cdot t_{\text{det}} + v \cdot t_{\text{átm}}}{\frac{v \cdot t_{\text{köv}}}{l_g} - 1} = \frac{L + v \cdot (t_{\text{det}} + t_{\text{átm}})}{\frac{v \cdot t_{\text{köv}}}{l_g} - 1} \end{aligned} \quad (14)$$

Megkaptuk az „ l ” távolság képletét. A követési távolságot a (3) képletben határoztuk meg, a gépkocsi hosszt pedig a (9)-ben. A csomópont szélesség pedig az adott kereszteződés geometriájából adódik.

Végezzünk el egy próbaszámítást, a következő adatokkal:

$L=10$ m	$v=7$ m/s	$t_{köv}=2$ s	$l_g=6,5$ m	$t_{det}=3$ s	$t_{átm}=2$ s
----------	-----------	---------------	-------------	---------------	---------------

Ebben az esetben a detektor csomóponttól mért elhelyezési távolsága a következő kell, hogy legyen, (14) alapján:

$$l = \frac{10 + 7 \cdot (3 + 2)}{\frac{7 \cdot 2}{6,5} - 1} = 39\text{m} \quad (15)$$

Ebben az esetben 6 db jármű fér el a detektor és a kereszteződés közötti szakaszon. Ha választani kell, akkor mindenképpen ildomos egy kicsit távolabb elhelyezni a detektort a csomóponttól, mert akkor még mindig ott a lehetőségünk a megszólalási idővel játszani. Ha közelebb helyezzük el, akkor már semmilyen tartalék nem áll rendelkezésünkre.

A kapott eredményt kiértékelve megállapíthatjuk, hogy az „ l ” távolságot jelentős részben a detektálási idő és az átmeneti idő határozza meg, viszonylag kis csomópontok esetében. Látható, hogy a példában szereplő 10 m-es kereszteződés szélesség mellett, a képlet számlálójában szereplő detektálási időből és átmeneti időből képzett távolság uralkodik, szám szerint $21+14=35$ méteres értékkel. Érdekes tény, hogy a nevező értéke közel 1-re adódott, egész pontosan 1,153846 a kapott érték. Kézenfekvőnek tűnne, hogy hanyagoljuk el a nevezőt, pontosabban vegyük az értéket 1-nek. Ebben az esetben az eredmény 45 m-re adódott volna. Ami a biztonság irányába való eltérést jelentette volna. Ugyanakkor ez az érték csak a megadott paraméterekkel együtt értelmezhető, a haladási sebesség és a gépkocsik hosszának ismeretében. Változtassuk meg első körben a haladási sebességet, és figyeljük, hogyan változik az eredmény. Legyen $v=10$ m/s .

Ezek szerint az eredmény:

$$l = \frac{10 + 10 \cdot (3 + 2)}{\frac{10 \cdot 2}{6,5} - 1} = 28,89\text{m} \quad (16)$$

Meglepő módon a távolság csökkent az előzőhöz képest. Ennek oka, hogy a nagyobb haladási sebesség hatására nő a követési távolság, kevesebb jármű fog a kritikus területen tartózkodni, így kisebb távolság is elég a detektálásra. Ebből arra következtethetünk,

hogy kisebb méretezési sebesség esetén nagyobb értéket fogunk kapni. Ezt alátámasztandó számoljuk ki $v=5$ m/s haladási sebességre is az a detektor elhelyezési távolságát.

$$l = \frac{10 + 5 \cdot (3 + 2)}{\frac{5 \cdot 2}{6,5} - 1} = 65\text{m} \quad (17)$$

A várakozásoknak megfelelően jelentősen nőtt a távolság. Most már tisztán látható, hogy nem hanyagolhatjuk el a nevezőt, nem vehetjük az értékét 1-nek. A (16)-os számításban a számláló 60 m-re, a (17)-esben 35 m-re adódik, a 28,89 m és a 65 m-es vég eredménnyel szemben.

Most vizsgáljuk meg, hogy a járműhossz változtatásra hogyan viselkedik a (14)-es alaképletünk. Most 7 m/s-mal számolunk, a járműhosszt csökkentjük 6 m-re.

$$l = \frac{10 + 7 \cdot (3 + 2)}{\frac{7 \cdot 2}{6} - 1} = 33,75\text{m} \quad (18)$$

Érthető módon 39-ről 33,75 m-re csökkent az eredmény, hiszen az adott szakaszon több jármű fér el, ha rövidebbek a gépkocsik, és/vagy kisebb távolságot hagynak maguk előtt. Végezzük el ugyanezt a számítást nagyobb gépkocsihosszal. Most vegyünk $l_g=7$ m-t.

$$l = \frac{10 + 7 \cdot (3 + 2)}{\frac{7 \cdot 2}{7} - 1} = 45\text{m} \quad (19)$$

Ebben az esetben ténylegesen 1-re adódott a nevező. Amit összességében megállapíthatunk, hogy a (14)-es képlet rendkívül érzékenyen reagál az egyes paraméterek változásaira. Különösen a gépjárműhosszra érzékeny a rendszer. A szabványokban szereplő 6,5 méteres értéket célszerű alapnak tekinteni, vélhetően a valósághoz képest a biztonság felé „tévednek” ezzel a paraméterrel. Szabad mozgásterünk csupán a haladási sebesség esetében marad.

5.3. Beavatkozási szintek

5.3.1. Kiegészítő, figyelmeztető jelzés

A torlódásdetektáló által szolgáltatott adatok alapján, amikor torlódásjelzés érkezik, semmi más nem teszünk csak a csomópont adott irányában egy kiegészítő jelző segítségével a járművezetők tudtára adjuk, hogy nem érdemes a kereszteződésbe behajtaniuk, mert nem lesz módjuk elhagyni azt. Ebben az esetben nem változtatunk semmit a fázisterven, csak információközlést végzünk. Már ezzel az intézkedéssel elérhetjük azt, hogy ne akadályozzák a keresztirányú forgalmat a csomópontban feltorlódó gépkocsik.

Gondoskodnunk kell arról, hogy tényleg csak akkor jelezzen a készülék, amennyiben valós a torlódás ténye, különben az emberek nem fogják komolyan venni a jelzést, ami ráadásul nem is lenne kötelező érvényű. A megbízhatóság minden beavatkozásnál fontos szempont, nem csak ebben az esetben.

5.3.2. Kritikus iránynak tilos jelzés

Ekkor már nem csak információt közölnénk a forgalom szereplőivel, hanem „kényszerítenénk” őket a megállásra. Csak annyit teszünk, hogy idő előtt tilos jelzést adunk a torlódott iránynak, a fázistervhez más módon nem nyúlunk hozzá. Ez már lehetőséget teremt a fokozott szabálybetartatásra, nincsen választási lehetőségük a közlekedőknek.

Kritikus helyeken akár automata ellenőrző rendszert is ki lehet építeni, a tiloson való áthaladás ellen. Itt is figyelni kell arra, hogy ténylegesen csak a vétkes sofőröket szabad megbüntetni.

5.3.3. Program módosítás, alkotás

Tovább lépünk, és már a tilos jelzésen túlmenően, a fázistervet hozzáigazítjuk a pillanatnyi forgalmi viszonyokhoz. Adott esetben így lehet megnövelni a csomópont kapacitását.

6. Torlódásdetektáló algoritmus szimulációja

Ebben a fejezetben az előző fejezetben bemutatott sebesség alapú módszert fogjuk alaposabban megvizsgálni, ehhez a LISA+ nevű programot fogjuk használni. A szoftver segítségével egy mintacsomópontot hozunk létre, ahol mesterséges módon torlódást fogunk előidézni. Írunk egy torlódásdetektáló algoritmust, amit a program szimulációs moduljában fogunk tesztelni, a mintacsomópont segítségével.

6.1. Szoftver háttér

Szimulációs programnak a LISA+ nevű szoftvert választottuk^[8]. Ennek oka, hogy a programot kifejezetten jelzőlámpás csomópontok lámpavezérlésének tervezésére, fejlesztésére készítették fel.

A programot a Schlothauer & Wauer nevű cég fejlesztette ki. Jelenleg a 4.2.1-es verziószámánál tartanak a fejlesztésben, mi a 3.4-es verzióval dolgoztunk. Németországban széles körben elterjedt a használata, mivel felhasználóbarát, és a szabványoknak megfelelő módon lehet vele jelzőlámpás csomópontok jelzésterveit megvalósítani. Minden szempontból könnyebbséget jelent a használata. Nagy előnye, hogy a beépített szimulációs modulnak köszönhetően telepítés nélkül meg lehet vizsgálni a csomópont forgalmi lefolyását, valamint a beprogramozott logika működését. Másik nagy előnye, hogy képes közvetlenül az arra alkalmas forgalomirányító berendezésre (pl. Actros) feltölteni jelzéstervet, meg logikát. Ráadásul a forgalomfüggő vezérlést grafikusán tudjuk megtervezni vele, blokkdiagramok segítségével. Más esetben ehhez hosszadalmas programozás szükségeltetik.

Ugyanakkor vannak korlátai a LISA+-nak. Ezt a tervezés során többször láthatjuk majd. Szerencsére nem okoz megoldhatatlan gondokat, kisebb megkötésekkel, kompromiszumokkal eredményesen lehet vele dolgozni, ami a szimulációt és a tervezést illeti. A hiányosságok oka, hogy alapvetően a már ismert módszerek megvalósítására, konkrét csomópont tervezésére fejlesztették a programot, nem új módszerek kidolgozására. Ebből adódnak a nehézségek.

Az angol nyelvet választottuk ki a programban (német is rendelkezésre állt). Helyenként előfordult, hogy nem fordították le az eredeti német szöveget, ez kis kellemetlenséget okozott, de érdemben nem hátráltatta a munkát.

6.2. Szimuláció célja

Meg akarjuk valósítani a korábban már bemutatott sebesség alapú módszert, ami egy darab detektor segítségével detektálja a torlódást. A forgalomfüggő, torlódás alapján működő logika alkalmazásával a következő kérdésekre adandó válaszokra vagyunk kíváncsiak:

- Mennyivel változik meg a csomópont áteresztőképessége?
- Mennyivel változik meg az utazási idő?
- Hogyan viszonyul az ideális utazási időhöz képest a tényleges érték, mennyi a veszteségidő?

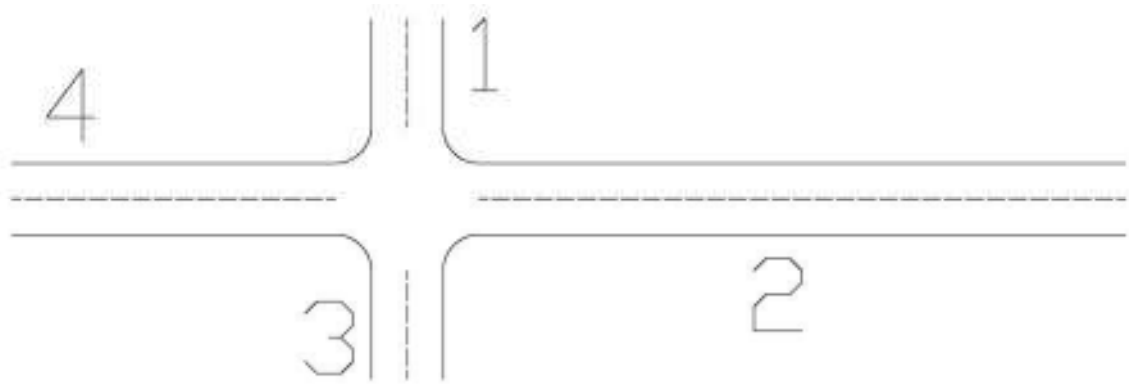
A kapott eredményekből további következtetéseket vonhatunk le, például gazdasági számításokat végezhetünk.

6.3. Előkészületek

Először fel kell vennünk egy csomópontot, amin a szimulációt el akarjuk végezni. Mi AutoCad program segítségével rajzoltuk meg a minta csomópont helyszínrajzát. Most elszigetelten kívánjuk megvizsgálni a vezérlés működését, ezért a valóságtól kicsit elrugaszkodva, egy olyan négyágú kereszteződést vettünk fel, aminek csak az egyik irányát szeretnénk tesztelni torlódás szempontjából. Ennek következménye, hogy két rövidebb ág, és két hosszabb ágat rajzoltunk meg. A hosszabb ágakon fogjuk előidézni a torlódást, annak is csak az egyik irányában.

A rajzolásnál az egyszerűsége törekedtünk, az út szélét egy folytonos vonallal, a sávelválasztást pedig szaggatott vonallal rajzoltuk meg. A kereszteződés területén nem alkalmaztunk sávelválasztókat. Szintén az egyszerűség szempontját figyelembe véve kétszer egy sávot veszünk tesztkörnyezetnek.

A teszteléshez felhasznált csomópontunk helyszínrajza a következő oldalon látható, a 9. ábrán.



9. ábra: Szimulációs csomópont helyszínrajza

Függőleges irány lesz a torlódási irányra merőlegesen, e sávokon fog haladni a keresztirányú forgalom, ezért is rövidebbek, itt nem kívánunk torlódást előidézni. Egy sávot 3,5 m szélességűre rajzoltunk, ezt a LISA+-ban történő léptékezésnél kell figyelembe vennünk. A jobboldali azért hosszabb, mert ennek az ágnak a kimenő irányában szeretnénk torlódást generálni, a detektort is távol kell elhelyeznünk a csomóponttól, hogy legyen elég idő a detektálásra, és a beavatkozásra.

Következő lépésként a LISA+ csomóponti vázlat (GUI/Intersection Sketch) moduljába kell beillesztenünk az alaprajzot. Mi ezt JPG képformátumban tettük meg.

6.3.1. Csomópont felvétele

A térkép betöltésekor a program megkérdezi, hogy szeretnénk-e a léptéket megadni. Később is megadhatjuk, de célszerű ekkor meghatározni. Kell egy függőleges, és egy vízszintes lépték, mi két sávra adtunk meg 7 m-es léptéket, mivel egy sáv 3,5 m-es.

Miután betöltöttük a helyszínrajzot a programba, meg kell adnunk az egyes bemenő irányokat. A felső irányból kezdjük el a számozást, mert a szoftver alapértelmezésben azt tekinti első számú iránynak a későbbiekben. Ha másképp neveznénk el, megtehetjük, de az kavarodáshoz vezethet. Az óra járásának megfelelően számozzuk növekvő sorrendben az irányokat, tehát a felső a 1-es, a jobboldali a 2-es, az alsó a 3-as, a baloldali a 4-es.

Az irányok megadása után definiálnunk kell az egyes sávokat. Miután ezt megtettük, a ki- és bevezető sávokat össze kell kötnünk, kijelölve a haladási útvonalakat a kereszteződésben. A zavartalan vizsgálat igénye miatt úgy döntöttünk, hogy nem határozzuk meg kanyarodó irányokat, hanem csak egyenesen engedjük a járműveket mozogni.

Ezzel kiküszöböljük a kanyarodásból származó torzításokat. Ezt megtehetjük, hiszen arra vagyunk kíváncsiak, hogy mennyire akadályozza a keresztirányú forgalmat a torlódás következtében a csomópontban maradt jármű. Nem csak, hogy megtehetjük, hanem a pontos eredményekhez ez szükséges is. Akkor érdemes engedélyoznünk a kanyarodást, ha valóságos kereszteződésre akarjuk alkalmazni a logikánkat. Egyelőre csak a hatékonyságát szeretnénk meghatározni a szabályozásnak.

A haladási nyomvonalak találkozásánál kijelöljük a konfliktuspontokat. Esetünkben négy darab adódik. A csomópont geometriájából adódóan a közbensőidők szimmetrikusak lesznek, várhatóan közel egyformák is, így ez sem fogja befolyásolni a szabályozás hatékonyságát. Értelemszerűen most gyalogos átkelőket sem határozunk meg, mert az is torzító hatással lenne a mérésre, szimulációra. Ugyanez érvényes a kerékpár átkelőkre is.

Az alapadatokat továbbítatjuk a programmal a többi tervezési modulba.

6.3.2. Vizsgálati adatok

Be kell állítanunk a forgalomáramlási mennyiségeket. Mivel torlódást akarunk előidézni, ezért célszerű a szaturációs pontnak (a fundamentális diagram maximuma) megfelelő forgalomnagysággal terhelni a csomópontot. Mivel eleve szimmetrikus a csomópontunk, minden irányba ugyanakkora forgalmat adunk meg, ez 2000 jármű/h forgalomnagyságot jelent. A program magától is ezt az értéket adja meg szaturációs forgalomnak. Most nem vettük figyelembe a kritikus értéket befolyásoló tényezőket, amit a szoftver képes lenne kezelni, mivel számunkra ez most nem lényeges.

Az egyes irányok forgalomnagyságához hozzá lehet rendelni, hogy milyen járműtípusok, milyen százalékban alkossák a forgalmat. A zavarmentes vizsgálathoz 100 %-ban személygépjármű forgalmat adunk meg, sem buszt, sem motort, sem más járművet nem engedünk közlekedni, csak és kizárólag személygépkocsit.

6.3.3. Jelzőcsoportok felvétele

A jelzőcsoportokat külön-külön is felvehetjük a jelzőcsoport modulban (Signal Groups), de már a csomóponti vázlat modulban is definiálhatjuk őket, aminek előnye, hogy sávok létrehozásakor egyszerűen hozzárendelhetjük a jelzőcsoportot is. Célszerű így eljárni. Nekünk 4 db jelzőcsoportra van szükségünk. Finomabb beállításokat már csak a jelző-

csoport modulban végezhetünk. Itt adhatjuk meg az előkészítési és az átmeneti időt az egyes jelzőkhöz. Alapbeállításban előkészítési időnek 1 másodpercet, átmeneti időnek meg 3 másodpercet ajánl fel a program, ez megfelel a városi közlekedés szabályainak, tehát ezen értékekkel fogjuk tesztelni a csomópontot. Minimális zöldidőnek 6 másodpercet ad meg a program.

6.3.4. Tiltásmátrix megadása

A tiltásmátrix modulban (Incompatibility Matrix) módosíthatjuk a mátrixot, úgy adjuk meg a tiltásokat, hogy csak 4 db szabad irány maradjon, az egyenes irányokat engedélyezzük.

6.3.5. Közbenső idők számítása

A LISA+ program egyik nagy előnye, hogy automatikus módon tudja kiszámítani a közbenső időket. Nekünk csupán a peremfeltételeket kell megadnunk, de még azt sem, ha elfogadjuk a szabványos értékeket (RiISA³ szerint), amit természetesen betápláltak a szoftverbe. Ezt ki is használjuk, és a hosszadalmas számítások helyett a program által kiszámolt értékeket elfogadjuk. A kapott eredményeket továbbítatjuk a közbensőidő mátrixba. Ide már felfelé kerekített értékek kerülnek, minden irányban 4 másodperc lett a kerekített eredmény.

6.3.6. Késleltetési feltételek

Az egy fázisban lévő jelzőcsoportoknál megadható, hogy mekkora időbeli eltéréssel, eltolással váltsanak a jelzők szabad jelzésre, és tilos jelzésre. Számunkra a tesztelés szempontjából az a megfelelő, ha egyszerre váltsanak az egyes jelzők. Ezért üresen hagyjuk a kitöltési mezőket.

6.3.7. Jelzésterv készítése

A program képes az önálló jelzésterv elkészítésére, a megadott paraméterek figyelembevételével. Nekünk csak annyi a fontos, hogy egyszerű legyen a terv. Mivel teljesen szimmetrikusra alakítottuk ki a csomópontot, és a forgalomnagyságot is azonosra vettük

³ Die Richtlinien für Lichtsignalanlagen

az összes irányban, így a jelzésterv is ennek megfelelően egyszerűre fog adódni. 60 másodperces ciklusidőre készítettük el a jelzéstervet. Két fázisunk van, mindkettő zöldideje a várakozásoknak megfelelően egyforma hosszú, 26 másodperces, mivel a közbenső idők 4 másodpercesek, így jön ki a 60 másodperc a két fázisra. Ennek megfelelően 0, és 30 másodpercnél definiáltuk a fázisok kezdési idejét.

Gondoskodnunk kell még az aktiválási programról, mert forgalomfüggő logikánál erre szükség van, normál esetben a szimulátor modul át tudja hidalni ezt a problémát. Ebben is segítségünkre van a LISA+ szoftver, szabványos programot alkot nekünk, oly módon, hogy az első fázist készíti elő, utána kapcsolja a fixidejű jelzéstervet.

6.3.8. Fázisátmenetek meghatározása

A fázisátmeneteket szintén képes a szoftver automatikusan generálni. Úgy hozza létre az egyes fázisokat, hogy azokat egymás után lefuttatva is meglegyen a minimális zöldidő. Így viszont egy 6 másodperces zöldidő már az átmenetben is szerepel, ami számunkra előnytelen lesz, ezért a fázisátmenetet a zöldidő kezdetéig lerövidítjük. Így maradhatnak a fáziskezdet jelző pontok a helyükön a jelzéstervben.

6.4. Detektáló logika megvalósítása és vizsgálata

Először megvizsgáljuk a mintacsomópont viselkedését torlódásmentes állapotban, ezt követően torlódást idézünk elő az egyik irányban, úgy fogjuk elemezni a forgalomlefollyást. Következő lépésként a torlódásdetektáló logika tervezésének lépéseit vesszük sorra. A megvalósított algoritmust ezután különböző paraméterekkel fogjuk lefuttatni a szimulációs modulban.

6.4.1. Szimuláció előkészítése

Elindítjuk a szimulátor modult (Test and Simulation), ahol a program előkészített nekünk a szimulációs hálót, ami lényegében megegyezik azzal a hálózattal, amit a csomóponti tervezésnél felvettünk, annyi különbséggel, hogy nem képes görbület mentén vezetni a járműveket. De ez számunkra most nem is érdekes, mivel nem definiáltunk ka-nyarodási irányokat.

Torlódás előidézéséhez kézenfekvő lenne egy további jelzőcsoport definiálására, amit a 2-es ág kivezető szakaszának végére helyezhetnénk el, egy külön jelzéstervvel. Sajnos kivezető szakaszra jelzőcsoportot nem tud értelmezni a program, ezért más módszerhez kell folyamodnunk. Lehetőség van a tesztelési szakaszok változtatására, újak létrehozására. Ezért az egy szakaszból álló, már említett 2-es ág kivezető szakaszt két részre osztjuk, egy csomóponttal érintkező hosszabb, és egy a kivezetést biztosító rövidebb szakaszra. Mindezt tesszük azért, mert az egyes szakaszokhoz hozzárendelhetünk haladási sebességet. Eredményesen idézhetünk elő torlódást, ha a kivezető szakaszon jelentősen lelassítjuk a járműveket, ráadásul ez tűnik az egyetlen járható útnak. Annyiban nem valószínű ez a megoldás, hogy nem minden jármű fog megállni, ahogy az a torlódásnál megszokott, hanem lesz, amelyik lassan, de haladni fog. De még az is elképzelhető, hogy egyetlen jármű sem fog megállni a kritikus szakaszon. A detektáló logikát ehhez kell igazítanunk. Globális sebességnek 7 m/s-ot állítottunk be, mert csúcsforgalomban ténylegesen nem számíthatunk ennél nagyobb sebességre. A kivezető szakaszra 1 m/s-os maximális sebességet engedélyeztünk. Ez az alacsony sebesség már alkalmas torlódás előidézésére.

Automatikus módon a szoftver megengedi, hogy a járművek a konfliktusponton „áthaladjanak” egymáson. Nem foglalkozik a csomópontban maradt járművekkel, amik a valószínűleg akadályozzák a többi járművet. Ennek nem lenne jelentősége átlagos forgalomnagyságnál, de ami célunk jelenleg pontosan az, hogy előidézzük a csomóponti torlódást, majd kiküszöböljük. Szerencsére van mód arra, hogy konfliktus szabályt hozunk létre két nyomvonal találkozásánál. A várhatóan kritikus konfliktuspontokban definiáltunk a várakozási szabályt, így már valószínűleg csak akkor indulnak keresztirányban a járművek, ha már semmilyen más jármű nem akadályozza a szabad áthaladásukat a csomóponton. Valójában ezt a szabályt az elsőbbségadás esetére találták ki, példának okáért a balra kanyarodó járműveknek elsőbbséget kell adniuk a szemből jövőeknek, ha azonos fázisban haladnak, maszkolás nélküli jelzésképpel. Ettől függetlenül a célnak megfelel a beállítás.

6.4.2. Szimuláció lefuttatása

Elindítjuk a szimulációt valós időben, a meghatározott fixidejű fázistervvel. Megfigyelhetjük, hogy már az első ciklus végén „beragadnak” a járművek a csomópontba, akadályozva keresztirányú forgalmat. Azt is észrevehetjük, hogy a 4-es irányból a 2-es irányba haladó járművek által okozott „akadály”, az 1-es irányból indulóknak 6 másodpercnyi, míg a 3-as irányból indulóknak akár 14 másodpercnyi zöldidejét veszi el, a rendel-

kezésre álló 26 másodpercből. Ez rendkívül sok! Pontosan ezt a jelenséget szeretnénk a torlódásdetektálási logikával megszüntetni.

Pontosabb elemzéshez legalább egy órányi adatra van szükségünk. Szerencsére van lehetőség gyorsított módon lefuttatni a tesztet, szimulációt. Alapból úgy állították be a programot, hogy csak a 900. másodperctől számolja ki, mérje az adatokat a további elemzéshez. Erre azért van szükség, mert kell egy fölépülési idő, mire beáll a csomópontban a kívánt forgalomnagyság. Pontosan egy óras időtartammal (3600 másodperc) futtatjuk a szimulációt, tehát egész pontosan 4500 másodpercig. A program magától kiértékeli a szimuláció eredményeit, amit megtekinthetünk a „Simulation Evaluation” menüpontra való kattintással. A kapott eredményeket elmenthetjük, vagy akár ki is másolhatjuk szöveges fájlba, vagy táblázatkezelőbe.

A következő eredményeket kaptuk:

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	635	87	9,61	77,38
2	4	840	91,56	14,75	76,81
3	1	517	111,03	9,61	101,42
4	2	504	200,78	25,67	175,12
	Összesen	2496	116,48	14,58	101,9

1. Táblázat: Mérési adatok, torlódás esetén, detektáló nélkül

Mivel teljesen szimmetrikus a csomópontunk, és a jelzéstervben is minden iránynak ugyanannyi zöldidő jutott, a forgalomnagyságokat is azonosnak vettük, ezért minden iránynak az egyetlen akadálymentes irány (2-4) járműszámait kellett volna hoznia, abban az esetben, ha nem lett volna egyáltalán akadályoztatás. A 4-2 irányban még magyarázható az általunk beépített lassítóval a kisebb járműszám, de az 1-3, 3-1 irányokban már egyértelműen a csomópontban maradt járművek okozták a kisebb értékeket.

Ennek ellenőrzésére, bizonyítására, minden korlátozást föloldottunk, és akadálymentesen is megismételtük a szimulációt. Ennek eredménye alább látható.

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	778	67,24	9,61	57,62
2	4	840	91,83	14,75	77,08
3	1	773	66,46	9,61	56,85
4	2	851	77,48	14,75	62,74
	Összesen	3242	76,11	12,29	63,82

2. Táblázat: Mérési adatok, torlódás nélkül

Érdekes módon 1-3, 3-1 irányok nem hozzák mennyiségben a másik két irány forgalom nagyságát. Ennek feltételezhető oka, hogy túl rövid szakaszt vettünk fel a lámpa előtti sorfelállásnak, úgy tűnik, hogy a program nem tudja ugyanolyan ütemben generálni a „semmiből” a járműveket, mintha a már generált járművek felálltak volna a sor mögé, és úgy indultak volna el a szabad jelzésnél. Összehasonlításra viszont tökéletesen alkalmas az eredmény. Normál esetben 3242 jármű haladt át a csomóponton, akadályoztatással mindösszesen 2496. Ez azt jelenti, hogy több mint 23 százalékkal esett vissza az átbecsátóképessége a csomópontnak a torlódás következtében. Ez jelentős csökkenés!

6.4.3. Detektor elhelyezése

A vezérlési logikánk a detektor által szolgáltatott mérési adatokra támaszkodik. Ezért szükséges, hogy átgondoljuk a detektor elhelyezését. Ehhez használjuk fel a korábban már kimunkált képletünket!

$$l = \frac{L + v \cdot (t_{\text{det}} + t_{\text{átm}})}{\frac{v \cdot t_{\text{köv}}}{l_g} - 1} \quad (1)$$

Még nem tudjuk, hogy mennyi lesz az ideális detektálási idő, erre a tesztelés fog választ adni. Így viszont nem tudunk pontos távolságot számolni, mivel ez a paraméter nagyban befolyásolja a számítást. Hozzávetőleges számítást azonban végezhetünk. A következő adatok ismertek:

$L=14$ m	$v=7$ m/s	$t_{\text{köv}}=2$ s	$l_g=6,5$ m	$t_{\text{átm}}=3$ s
----------	-----------	----------------------	-------------	----------------------

Detektálási időnek az egyszerűség kedvéért vegyünk 2 másodpercet. Így alakul a számítás:

$$l = \frac{14 + 7 \cdot (2 + 3)}{\frac{7 \cdot 2}{6,5} - 1} = 42,467\text{m} \quad (2)$$

A biztonság irányába való elmozdulással, 45m-re helyezzük el a detektort a csomóponttól. Ezt megelőzően azonban definiálnunk kell egy detektort a megfelelő program modulban, amit D1 azonosítóval látunk el. Hossznak 1 métert adunk meg, így el tudjuk kerülni azt, hogy két egymást követő járművet egy kocsinak érzékeljen a detektor.

6.4.4. Torlódási logika létrehozása

A 2. módszer alapján a sebességet kellene alapvetően mérnünk, sajnos erre a szoftver képtelen, így más jellemzőt vagyunk kénytelenek figyelembe venni. A sebesség és a foglaltság között fordított arányossági összefüggés van. A sebesség csökkenésével arányosan a jármű foglaltság a detektoron nőni fog. Ezt kihasználva a foglaltságot fogjuk mérni, ennek a jellemzőnek adunk küszöbértéket, még hozzá egy minimumot, ami felett már torlódást fog jelezni a logika.

A fixidejű jelzéstervnél megfigyelhettük, hogyan állja útját a keresztforgalomnak egy csomópontban rekedt jármű. Célunk, hogy ezt megakadályozzuk, még hozzá valós időben, nem csak a következő ciklus változtatásával.

Miután érzékeltük a detektor által a torlódás kialakulását, azonnal közbelépünk, és tilos jelzést adunk a kritikus iránynak, esetünkben a 4-2 iránynak. Mivel fázisokkal tudunk operálni, így kénytelenek vagyunk az ellenkező, 2-4 iránynak is tilos jelzést adni. A ciklusból még hátralévő időt viszont teljes egészében odaadhatjuk a következő fázisnak. Ideális esetben nem marad egy jármű sem a kereszteződésben, szabad utat engedve a keresztiránynak. Mivel torlódást generáltunk a 4-2 irány kivezető szakaszán, nem okozhat gondot a hosszabb tilosidő, mert úgyis újra fel fog épülni a sor, ami előbb, vagy utóbb ismét el fogja érni a csomópontot. Várakozásaink szerint minden ciklusban be kell avatkoznia a logikának.

Érdeemes egy minimális zöldidőt definiálnunk, ameddig a detektor jelzése ellenére sem fogjuk lerövidíteni az adott fázist. A 4 másodperces közbensőidők miatt a logikában 8 másodperccel rövidebb ciklusidőt kell meghatároznunk, mivel a fázisátmenetekkel nem

tudunk számolni. Ez csak technikai jellegű kérdés, nem befolyásolja a szabályozás alapjait.

Blokkdiagramok segítségével valósítottuk meg a logikát, a végeredmény az 1. számú mellékletben látható (14.1).

Ez a program minden másodpercben egyszer lefut, a szimulációs eszköz szolgáltatja a működéséhez szükséges adatokat. A téglalapok cselekvést jelentenek, a jobbra-nyíllal, benne kis pluszjellel ellátott téglalapok döntést szimbolizálnak, a nyíl irányában a feltétel helyessége esetén halad tovább a logika, lefelé akkor, ha a feltétel nem áll fenn.

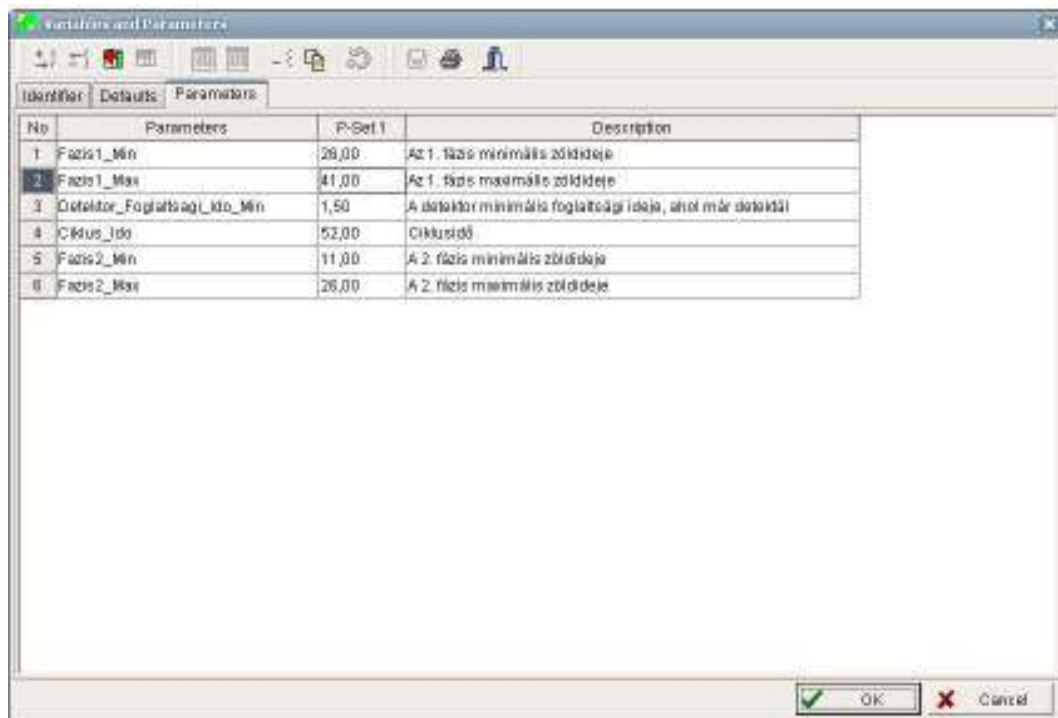
A programkód a 2. számú mellékletben olvasható (14.2).

A változók és a paraméterek magyarázatai, valamint funkciójuk a következő, 10. ábrán láthatók.

No	Identifier	Type	Controller Func.	INT Object	Description
1	Fazis1	boolean	Phase	Stage 1	Az 1. fázis aktív
2	Fazis2	boolean	Phase	Stage 2	Az 2. fázis aktív
3	Fazis1_Min	parameter			Az 1. fázis minimális zörléskéje
4	Fazis1_Max	parameter			Az 1. fázis maximális zörléskéje
5	Detektor_Foglaltsagi_ido	real	T_Letzte_Arv	01	A detektor pillanatnyi foglaltsági ideje
6	Detektor_Foglaltsagi_ido_Min	parameter			A detektor minimális foglaltsági ideje, ahol már detektál
7	Fazis_Valtas_1_2	akción	Setz_PUe	1_2	1. fázisról váltunk a 2. fázisra
8	Fazis_Valtas_2_1	akción	Setz_PUe	2_1	2. fázisról váltunk az 1. fázisra
9	Fazis1_Szamlo	integer	T_Zähler	Fazis1Szamlo	Az 1. fázis számlálójának pillanatnyi értéke
10	Fazis1_Szamlo_Nullaz	akción	Reset	Fazis1Szamlo	Nullázza az 1. fázis számlálóját
11	Fazis2_Szamlo_Nullaz	akción	Reset	Fazis2Szamlo	Nullázza a 2. fázis számlálóját
12	Fazis1_Szamlo_Inc	akción	INC	Fazis1Szamlo	Elindítja az 1. fázis számlálóját
13	Fazis2_Szamlo_Inc	akción	INC	Fazis2Szamlo	Elindítja a 2. fázis számlálóját
14	Fazis1_Szamlo_Leallitas	akción	Stop	Fazis1Szamlo	Leállítja az 1. fázis számlálóját
15	Fazis2_Szamlo_Leallitas	akción	Stop	Fazis2Szamlo	Leállítja a 2. fázis számlálóját
16	M	integer			Mutatója, hogy az 1. fázis mennyi időt használt el a ciklusból
17	Ciklus_ido	parameter			Ciklusidő
18	Fazis2_Szamlo	integer	T_Zähler	Fazis2Szamlo	Az 2. fázis számlálójának pillanatnyi értéke
19	Fazis2_Min	parameter			Az 2. fázis minimális zörléskéje
20	Fazis2_Max	parameter			Az 2. fázis maximális zörléskéje

10. ábra: Változók és paraméterek, torlódási logika

A paramétereket a fenti ábrán megjelenő képernyőn kellett definiálni, de az értékadást már egy másik ablakban kellett megadni, ami a 11. ábrán olvasható.



11. ábra: Paraméterek, torlódási logika

6.4.5. Torlódásdetektáló szimuláció

Ugyanúgy lefuttatjuk a szimulációt, mint korábban, azzal a különbséggel, hogy most a torlódásdetektáló logikát alkalmazzuk, nem a fix idejű programot. A detektálási idő optimumát fokozatos közelítéssel fogjuk meghatározni. Első körben 3 másodpercet választunk detektálási időnek, a logika programozásánál ehhez a paraméterhez ezt az értéket adjuk meg.

A szimuláció eredménye a következőképpen alakul:

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	808	63,76	9,61	54,15
2	4	706	115,36	14,75	100,61
3	1	686	78,07	9,61	68,45
4	2	510	193,29	25,67	167,63
	Összesen	2710	105,2	13,97	91,23

3. Táblázat: Mérési adatok, 3 s-os detektálási idő esetén

Az eredményeket külön fogjuk kiértékelni, az összes szükséges szimuláció elvégzése után! Ugyanezt a mérést megismételjük különböző detektálási időkkel.

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	831	61,37	9,61	51,76
2	4	660	123,73	14,75	108,98
3	1	742	70,44	9,61	60,82
4	2	502	192,58	25,67	166,92
	Összesen	2735	102,96	13,8	89,16

4. Táblázat: Mérési adatok, 2,5 s-os detektálási idő esetén

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	929	52,63	9,61	43,02
2	4	624	132,62	14,75	117,87
3	1	835	60,16	9,61	50,55
4	2	511	185,25	25,67	159,59
	Összesen	2899	95,39	13,55	81,84

5. Táblázat: Mérési adatok, 2 s-os detektálási idő esetén

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	1018	46,31	9,61	36,7
2	4	575	146,22	14,75	131,47
3	1	920	52,23	9,61	42,62
4	2	512	179,86	25,67	154,19
	Összesen	3025	89,71	13,31	76,4

6. Táblázat: Mérési adatok, 1,5 s-os detektálási idő esetén

Forrás	Cél	Járműszám (E)	Utazási idő (s)	Ideális utazási idő (s)	Veszteségidő (s)
1	3	1086	42,1	9,61	32,48
2	4	501	171	14,75	156,25
3	1	1083	41,67	9,61	32,06
4	2	480	184,09	25,67	158,42
	Összesen	3150	84,09	12,88	71,21

7. Táblázat: Mérési adatok, 1 s-os detektálási idő esetén

6.5. Mérési eredmények kiértékelése

A szimuláció mérési eredményeit fogjuk kiértékelni, a forgalomnagyság, utazási idők és veszteségidők alapján.

6.5.1. Forgalomnagyságok elemzése

Foglaljuk össze egy táblázatba a forgalomnagyságok alakulását a detektálási idők szerint! Az értékek jármű/óra mértékegységben értendők!

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	635	808	831	929	1018	1086
2	4	840	706	660	624	575	501
3	1	517	686	742	835	920	1083
4	2	504	510	502	511	512	480
	Összesen	2496	2710	2735	2899	3025	3150

8. Táblázat: Forgalomnagyságok, különböző detektálási idők esetén

Nézzük, milyen következtetéseket vonhatunk le az eredmények összehasonlításából! Ami az összevetésből egyből kiolvasható, hogy az utolsó, 1 másodperces detektálási idő esetén lett a legnagyobb a csomópont áteresztőképessége, az adott forgalmi helyzetet figyelembe véve. Szabályozás nélkül mindösszesen 2496 jármű haladt át óránként a csomóponton, míg szabályozással a legjobb eredmény 3150 jármű/h volt, ami majdnem eléri az elméleti maximumot, ami 3242 jármű/óra, mérésünk szerint, de abban az esetben nem generáltunk torlódást. Ez 26,2 %-os növekedést jelent a kiindulási értékhez képest.

$$\frac{3150}{2496} = 1,26202 \quad (3)$$

A maximális kapacitás 97,16 %-át tudtuk elérni a szabályozóval. Szabályozó nélkül ez az érték 76,99 % volt.

$$\frac{3150}{3242} = 0,971622 \quad (4)$$

$$\frac{2496}{3242} = 0,769895 \quad (5)$$

Amit észrevehettünk még, hogy a 2-4 irányban folyamatosan csökken az áteresztőképesség, aminek az oka, hogy egy fázisban van a 4-2 iránnyal, amit tulajdonképpen szabályoztunk a torlódást figyelembe véve. Ezzel párhuzamosan viszont a másik két irányban folyamatos növekedést tapasztalhatunk. Az 1-3 irányban már az első lépésben (3 másodperces detektálási idő) jelentősebb növekedést észlelhetünk, ennek magyarázata, hogy ezt az irányt kevesebb ideig akadályozták a 4-2 irányban föltorlódó, kereszteződésben megálló járművek. A 3-1 irány lassabban ugyan, de szintén észrevehetően egyre nagyobb járműszámot mutat fel.

Érdekes, hogy a 4-2 irányban lényegében nem változik a forgalomnagyság. Ez nem is annyira meglepő, hiszen itt idéztünk elő torlódást, aminek következménye, hogy nem a zöldidő határozza meg alapvetően az átbocsátó képességét, hanem a torlódást előidéző szakasz. Ebből viszont arra következtethetünk, hogy a szabályozó logikánk hatékonyan működik, hiszen az is előfordulhatott volna, hogy hibás működés esetén ennek az iránynak az áteresztőképessége lecsökken. Ez nem történt meg.

Összegezve az eddigieket kijelenthetjük, hogy a 2-4 irány rovására az 1-3, 3-1 irányokat részesítettük előnyben úgy, hogy a 4-2 irányban kialakuló torlódás nem akadályozza ezen irányokat. Pontosan ez volt a célunk.

Tovább vizsgálva az eredményeket, megfigyelhető, hogy a 3-1 irány forgalmi adatai csak az utolsó esetben éri el teljes mértékben az 1-3 irány értékeit. Már említettük, hogy az 1-3 irányt kevesebb ideig hátráltatja egy esetlegesen a kereszteződésben ragadt jármű, mint a 3-1 irányt. Ez a csomópont geometriájából adódik. Ebből viszont arra következtethetünk, hogy csak az 1 másodperces detektálási idejű programnál nem „ragadtak be” a 4-2 irányban haladó járművek a torlódás folyamányaként. Ez is azt mutatja, hogy csak ebben az esetben értük el azt a célkitűzésünket, hogy ne maradjon jármű a csomóponton belül.

Számszerűsítsük a szabályozó hatékonyságát! A csomópont kapacitásának növekedését már kiszámoltuk, 26,2 %-os növekedést tudott felmutatni. Ezt bontsuk le az egyes irányokra! A következő táblázatban láthatók a szabályozó nélküli csomópont forgalomnagyságai, mellettük a különböző detektálási időre beállított szabályozókhoz tartozó forgalomnagyság változások (a kiinduláshoz képest), 2 tizedes jegyre kerekítve.

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	635	27,24 %	30,87 %	43,30 %	60,31 %	71,02 %
2	4	840	-15,06 %	-21,43 %	-25,72 %	-31,55 %	-40,36 %
3	1	517	32,69 %	43,52 %	61,51 %	77,95 %	109,48 %
4	2	504	1,19 %	- 0,4 %	1,39 %	1,59 %	-4,77 %
	Összesen	2496	8,57 %	9,58 %	16,15 %	21,19 %	26,20 %

9. Táblázat: Forgalm nagyságok változása a szabályozó nélküli esethez viszonyítva

Az igazán kritikus 3-1 irányban 100 %-ot meghaladó növekedést értünk el. Ezt az irányt gátolták a 4-2 irányban feltorlódó járművek. A kicsit kevésbé érintett 1-3 iránynak is jelentős a növekedése, itt 70% feletti az eredmény. A szabályozás vesztesei a 2-4 irányban haladók, kicsivel több, mint 40%-os a maximális visszaesés. Ezt azonban bőven kompenzálja a másik két irány áteresztőképesség növekedése. Korábban már említettük, hogy a vizsgált 4-2 irányban enyhe csökkenés tapasztalható az 1 másodperces detektálási idejű programnál. Ennek oka a szimulációs hálózat kialakításából adódik, feltételezhető, hogy ha hosszabb kivezetési szakaszt hagytunk volna ennek az iránynak, akkor nem lépett volna fel ez a jelenség.

6.5.2. Utazási idők elemzése

Összegyűjtöttük a mérési eredményeket a detektálási idő szerint. Az értékek másodpercben értendők.

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	87	63,76	61,37	52,63	46,31	42,1
2	4	91,56	115,36	123,73	132,62	146,22	171
3	1	111,03	78,07	70,44	60,16	52,23	41,67
4	2	200,78	193,29	192,58	185,25	179,86	184,09
	Összesen	116,48	105,2	102,96	95,39	89,71	84,09

10. Táblázat: Utazási idők, különböző detektálási idők esetén

A forgalm nagyságok alakulásának megfelelő tendenciák figyelhetők meg az utazási idők alakulásánál is. Az áteresztőképesség növekedésével párhuzamosan csökkentek a várakozási idők is. Arányaiban viszont jelentősebb változás észlelhető a forgalm nagyságokhoz képest. Az 1-3 irányban 87 másodpercről, 42,1 másodpercre mérséklődött az

utazási idő, ez kicsivel több, mint 50 %-os csökkenés. A 3-1 irányban még ennél is szembetűnőbb a változás, nagyjából 62,5 %.

Várható volt, hogy a 2-4 irányban növekedni fog az utazási idő, mert ebben az irányban csökkent az áteresztőképesség. Ami viszont meglepő, hogy bár a 4-2 irány kapacitása nem nőtt - ennek a mesterséges torlódás előidézése az oka - az utazási idő mégis csökkenő tendenciát mutat. Az 1 másodperces detektálási idejű programnál enyhe növekedést mutat a 4-2 irány utazási ideje, ez egybevág azzal, hogy az áteresztőképesség ugyanennél a programnál enyhén csökkent.

Összegyűjtöttük az utazási idők százalékos változását a detektálási idők szerint, a szabályozás nélküli értékekhez képest.

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	87	-26,71 %	-29,46 %	-39,51 %	-46,77 %	-51,61 %
2	4	91,56	25,99 %	35,14 %	44,84 %	59,70 %	86,76 %
3	1	111,03	-29,69 %	-36,56 %	-45,82 %	-52,96 %	-62,47 %
4	2	200,78	-3,73 %	-4,08 %	-7,73 %	-10,42 %	-8,31 %
	Összesen	116,48	-9,68 %	-11,61 %	-18,11 %	-22,98 %	-27,81 %

11. Táblázat: Utazási idők változása a szabályozó nélküli esethez viszonyítva

6.5.3. Veszteségidők elemzése

A veszteségidők szoros összefüggésben vannak az utazási időkkel. Megmutatják, hogy mennyivel több időt tölt el egy jármű az adott útszakaszon az ideálshoz képest. Talán ebből tudhatunk meg a legtöbbet a szabályozó hatékonyságáról. Az értékek másodpercben értendők!

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	77,38	54,15	51,76	43,02	36,7	32,48
2	4	76,81	100,61	108,98	117,87	131,47	156,25
3	1	101,42	68,45	60,82	50,55	42,62	32,06
4	2	175,12	167,63	166,92	159,59	154,19	158,42
	Összesen	101,9	91,23	89,16	81,84	76,4	71,21

12. Táblázat: Veszteségidők, különböző detektálási idők esetén

A korábbi megfigyeléseket igazolja ez a táblázat is. A 3-1 iránynak a kiindulási elrendezésnél is elég magas, 100 másodperc fölötti érték volt a veszteségideje. Ennek oka a 4-2 irányban kialakuló torlódás akadályozó hatása. Ugyanez a hatás az 1-3 irányban már mérsékeltebb, de szintén tetten érhető, ezt majd az ideális utazási időkkal való összehasonlításban láthatjuk jobban. A 4-2 irány természetes módon hosszú veszteségidővel rendelkezett, hiszen itt hoztuk létre szánt szándékkal a torlódást.

A 4-2 irány csökkenő tendenciájával nem különösebben érdemes foglalkoznunk, mert egyrészt a csökkenés nem jelentős, másrészt abból adódik, hogy a lerövidített zöldidő miatt később jelentek meg a járművek a csomópontban. Ami sokkal érdekesebb számunkra, hogy a 3-1 irány veszteségideje jelentősen, kevesebb, mint a harmadára csökkent. Éppen ezt szerettük volna elérni, hogy ne tartsák fel ezt az irányt. Ugyanez érvényes az 1-3 irányra is, de ott eleve kisebb akadályoztatás lépett fel, így kisebb, de még jelentősnek mondható csökkenés volt elérhető. Már korábban is láthattuk, hogy a 2-4 irány minden tekintetben „rosszul járt”, a veszteségidőknél sincs ez másképpen. Több mint a kétszeresére nőtt az érték.

Abból is lehet látni, hogy az 1 másodperces detektálási idejű szabályozásunk megfelelően működik, hogy az egy fázisban lévő irányok lényegében egyforma veszteségidőt mutatnak. Azért jelenthetjük ezt ki, mert ez azt jelenti, hogy csak és kizárólag a zöldidő határozza meg a veszteségidőt, és a forgalomnagyságot, nem pedig az akadályoztatás. Tehát ez is bizonyítja, hogy ebben az esetben már nem fordul elő, hogy egy jármű a kereszteződésben maradjon.

A rend kedvéért nézzük meg a százalékos változásokat a szabályozó nélküli állapothoz képest.

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	77,38	-28,73 %	-33,11 %	-44,40 %	-52,55 %	-58,03 %
2	4	76,81	30,99 %	41,88 %	53,46 %	71,16 %	103,42 %
3	1	101,42	-32,51 %	-40,03 %	-50,16 %	-57,98 %	-68,39 %
4	2	175,12	-4,28 %	-4,68 %	-8,87 %	-11,95 %	-9,54 %
	Összesen	101,9	-10,47 %	-12,50 %	-19,69 %	-25,02 %	-30,12 %

13. Táblázat: Veszteségidők változása a szabályozó nélküli esethez viszonyítva

Itt a legszembetűnőbb a 2-4 irány hátránya. Hozzá kell tennünk, hogy meglehetősen kedvező értékről indult, így könnyű volt nagy arányban „lerontani” a veszteségidejét ennek az iránynak.

6.5.4. Ideális utazási idők elemzése

Az eddig tárgyalt utazási idő, és veszteségidő alapján már kiszámolható lett volna az ideális utazási idő. Most táblázatos formában közöljük az értékeket, a detektálási időnek függvényében. Természetesen az ideális idők nem függenek semmilyen tényezőtől, csak és kizárólag a csomópont geometriájától, és a vizsgált terület nagyságától. Az összesített ideális utazási idők viszont eltérnek az áteresztőképességtől függően. Ez egy darab járműre vonatkoztatott átlagértéket jelent.

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s
1	3	9,61	9,61	9,61	9,61	9,61	9,61
2	4	14,75	14,75	14,75	14,75	14,75	14,75
3	1	9,61	9,61	9,61	9,61	9,61	9,61
4	2	25,67	25,67	25,67	25,67	25,67	25,67
	Összesen	14,58	13,97	13,8	13,55	13,31	12,88

14. Táblázat: Ideális utazási idők, különböző detektálási idők esetén

Ebben a táblázatban kizárólag az összesítő sor változik, mivel az átbocsátó képesség is változik, így az egy járműre vonatkoztatott átlagértékek szükségszerűen eltérnek egymástól. A mintacsomópont geometriájából adódik, hogy az 1-3, és a 3-1 irányok ideális utazási idői megegyeznek. A 2-4 és 4-2 szakaszok hosszabbak, ezért eleve nagyobb idő adódik. A 4-2 irány azért vesz fel nagyobb értéket, amit a geometria nem indokolna, mert a torlódás előidézése miatt a kilépő szakaszon lecsökkentettük a sebességet, így azon a szakaszon csak lassabban haladhatnak a járművek. Ez okozza az eltérést. Érdeemes megnéznünk, hogy a tényleges utazási idők hogyan alakulnak az ideálishoz képest. Százalékos értékkel fejezzük ki az arányt. Alapnak az akadálytalan haladást biztosító programot tekintettük.

Forrás	Cél	Szabályozó nélkül	3 s	2,5 s	2 s	1,5 s	1 s	Ideális
1	3	905%	663%	638%	547%	481%	438%	9,61
2	4	620%	782%	838%	899%	991%	1159%	14,75
3	1	1155%	812%	733%	626%	543%	433%	9,61
4	2	782%	753%	750%	721%	700%	717%	25,67
	Összesen	947%	856%	837%	776%	729%	684%	12,29

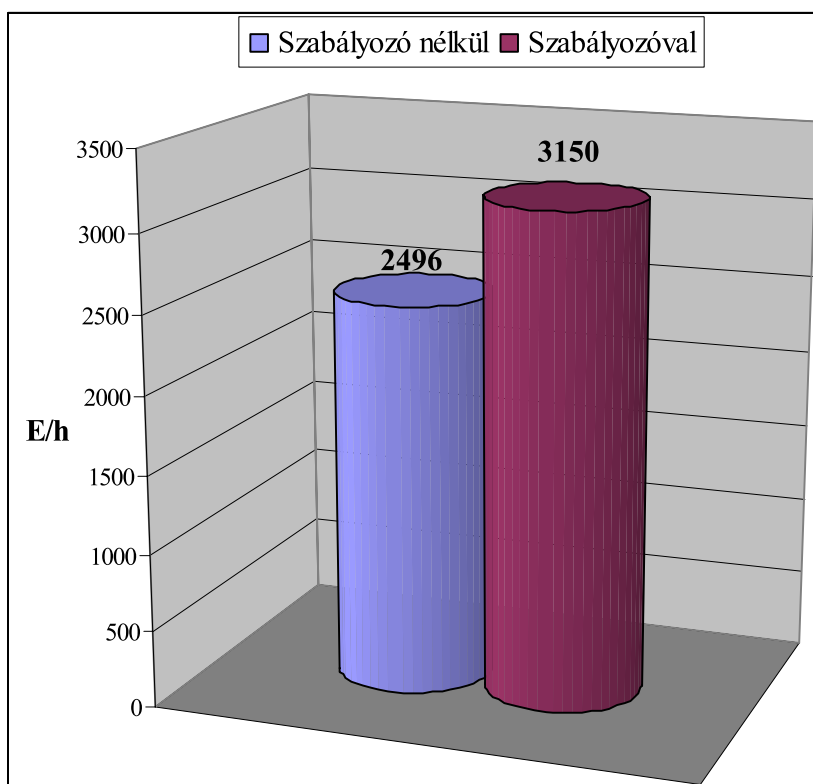
15. Táblázat: Utazási idők változása az ideálishoz képest

7. Eredmények összegzése, gazdasági előnyök

A mérési adatok kiértékelése után, ebben a fejezetben összegezzük az elért eredményeket, valamint számba vesszük a szabályozó alkalmazásából származó, várható gazdasági előnyöket.

7.1. Csomópont áteresztőképessége

A lefuttatott szimulációk sorozatából egyértelműen kiderült, hogy már a legnagyobb detektálási idejű szabályozásnál is megnőtt a kereszteződés áteresztőképessége. Ez még fokozódott is a detektálási idő csökkentésével. Ennek oka, hogy egyre kevésbé „ragadtak be” a kereszteződésbe a járművek, elkerülve a keresztforgalom akadályoztatását. A legjobb eredményt az 1 másodperces detektálási idejű szabályozásnál értük el, ami a kiindulási értékhez képest 26,2 %-os növekedést jelentett. A csomópont maximális, torlódás nélküli kapacitásához képest, a torlódáskor alkalmazott szabályozóval 97,16 %-os kihasználtságot tudunk produkálni. Ezt rendkívül jó eredménynek tekinthetjük! A kereszteződésen áthaladó forgalom mértékének változása az alábbi, 12. ábrán látható. A diagram függőleges tengelye az egységjárművek (E) egy óra alatt áthaladó mennyiségét mutatja.

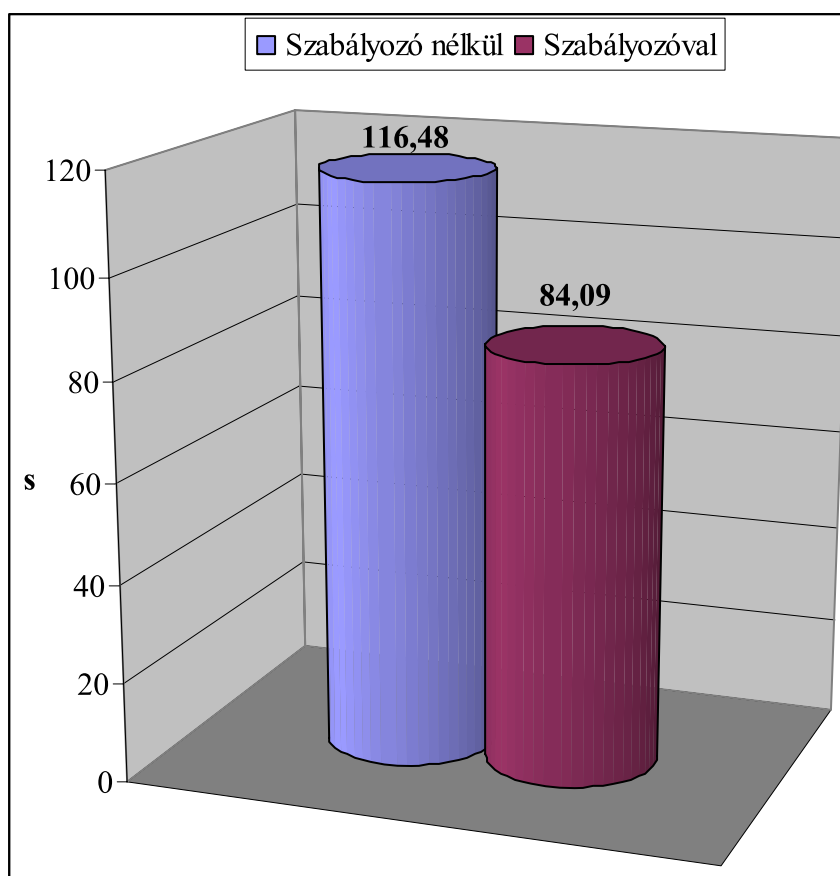


12. ábra: Forgalm nagyság változása

7.2. Utazási idő

Az utazási idők esetében a forgalomnagyság változásához fogható mértékű javulást tapasztaltunk, számszerűen 27,81 %-os csökkenést értünk el. A két érték természetesen szorosan összefügg, így nem is olyan meglepő ez az eredmény. Sikerült elérnünk, hogy a szabályozó a megfelelő időben avatkozzon be a jelzéstervbe, aminek az lett a következménye, hogy az éppen szabadjelzést kapó irányok akadálytalanul tudtak haladni. Ennek köszönhető a jelentős csökkenés.

Az egy járműre vetített utazási idő változása az alábbi, 13. ábrán látható, az értékek másodpercben értendők.

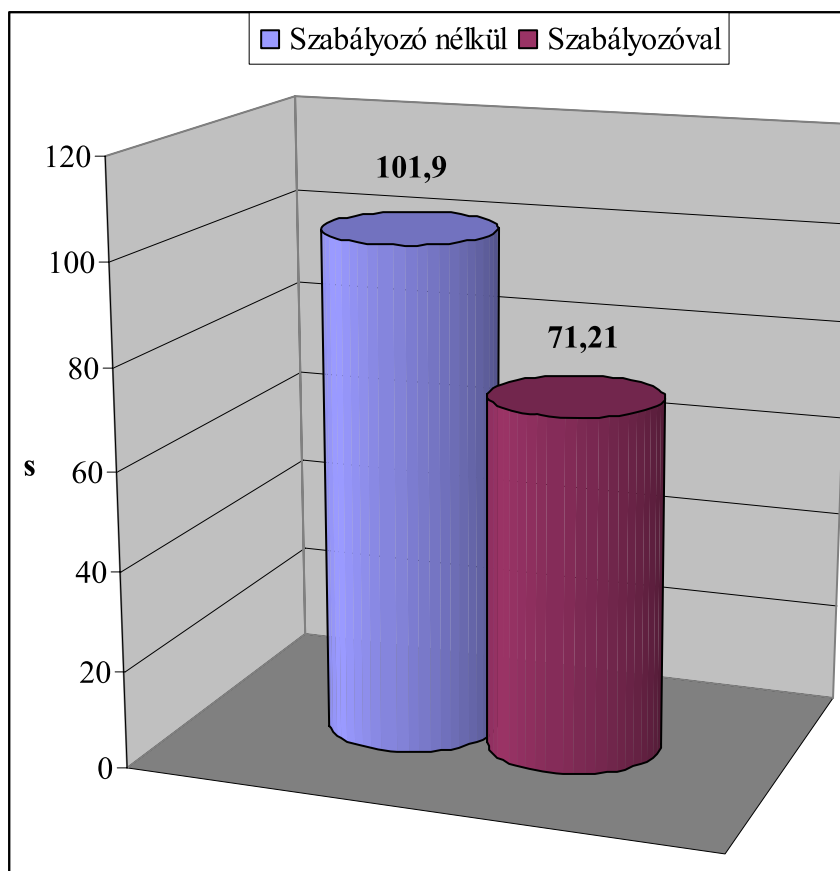


13. ábra: Utazási idő változása

7.3. Veszteségidő

Az utazási idők csökkenése a kevesebb veszteségidő következménye. A veszteségidő változása a már említett forgalmi okokkal magyarázható, a szabályozó megakadályozta, hogy a kereszteződésben járművek maradjanak a tilos jelzés ideje alatt.

A következő, 14. ábrán látható a veszteségidő változása. Az értékek másodpercben vannak megadva, és egy járműre vonatkoznak.



14. ábra: Veszteségidő változása

7.4. Gazdasági előnyök

A gazdasági előnyöket legjobban az utazási idők csökkenéséből tudjuk kiszámítani, most az externális költségek elemzésébe nem megyünk bele. Az utazási idő költsége a nem hivatásos forgalomban 1312 Ft/h volt 2001-ben a KTI szerint, egy főre vetítve^[9]. Ez az EU átlagát jelenti. Ebből kiindulva nézzük meg, hogy milyen megtakarítás érhető el a torlódásdetektáló szabályozásunkkal. Optimális esetben (az 1 másodperces detektá-

lási idejű változat) egy járműnél 84,09 másodperc lett az utazási idő átlagos értéke, szabályozó nélkül 116,48 másodperc volt ugyanez az érték. Tehát a csökkenés 32,39 másodperc.

A szabályozott esetben 3150 jármű haladt át a csomóponton. Így egy óra alatt $3150 \cdot 32,39 = 102028,5$ másodpercet takarítottunk meg. Ez egyenlő 28,34125 órával ($102028,5/3600$). Ebből könnyedén kiszámolhatjuk, hogy egy óra alatt egy csomópontban $1312 \cdot 28,34125 = 37183,72$ Ft-ot takaríthatunk meg nemzetgazdasági szinten. A mintacsomópontunk 2x1 sávós volt, több sáv esetén ugyanez az érték magasabbra adódik.

Alább táblázatos formában látható a számítás.

Utazási idő költsége	1312 Ft/h
Utazási idő csökkenés, szabályozóval, 1 óra alatt	32,39 s
Forgalomnagyság, szabályozással	3150 E/h
Óras utazási idő csökkenése, összesen, 1 óra alatt	$102028,5 \text{ s} = 28,34125 \text{ h}$
Költségcsökkenés 1 óra alatt	37183,72 Ft

16. Táblázat: Utazási idők csökkenéséből eredő megtakarítás számítása

Ha figyelembe vesszük, hogy hány olyan csomópont van, ahol a szabályozót eredményesen lehet alkalmazni, és azt is, hogy egy évben mennyi ideig áll fenn a csomóponti torlódás veszélye, akkor elég jelentős összeggel állunk szemben. Egy csomópont esetében is több millió Ft megtakarítás érhető el egy év alatt. Például 100 torlódásos nap esetén, napi 1 óra torlódással számolva is már 3,7 millió Ft-ot kapunk eredményül. Életszerűen ennél nagyobb értéket is kaphatunk. A kiépítés költségei vélhetően egy éven belül megtérülnének a rendszer bevezetése esetén, mivel a telepítés költségei várhatóan ennél nagyságrendileg kisebbek, de legrosszabb esetben is azonos nagyságrendűek.

8. Fejlesztési lehetőségek a szimulációs eljárásban

8.1. Harmadik fázis létrehozása

Az alapprogramban két fázist határoztunk meg, az egymással párhuzamosan közlekedőknek egy fázist adtunk. Ez alapvetően megfelelt a detektálás hatékonyságának a vizsgálatához, de további elemzéshez szükséges egy újabb fázis bevezetése. A detektáló program úgy szabályozott, hogy ha torlódást észlelt, akkor átváltott a következő fázisra, ahol a keresztirányú forgalom kapott szabad jelzést. Mint láthattuk ez a 2-4 irányt hátrányosan érintette, hiszen itt még szabadon haladhattak volna a járművek. Ezt nem volt képes kezelni 2 fázissal a szabályozó program. Egy 3. fázis beállításával, ahol csak a 2-4 irány lenne engedélyezett, lehetőség lenne csökkenteni az irányt érintő hátrányokat.

Ezzel a feltétellel vizsgálhatóvá válna egy olyan megoldás is, ahol nem változtatnánk meg az egyes irányok zöldidejét, csak és kizárólag a 4-2 iránynak, ahol torlódást idéztünk. Kiderülhetne ebből az elrendezésből, hogy a 3-1 irányt mennyire akadályozzák a 4-2 irányban feltorlódó, a kereszteződésben megálló gépkocsik. A kapacitást ebben az esetben nem befolyásolná a 2-4 irány rövidebb zöldidejéből adódó forgalomcsökkenés. Vélhetően a csomópont teljes kapacitása nem nőne olyan mértékben, mint az általunk lefuttatott szimulációban, ellenben pontos képet kaphatunk a detektálás működőképességéről, életképességéről.

Nézzük meg, hogy milyen eredményeket várhatunk az új elrendezéstől!

Forrás	Cél	Akadálytalan haladás	Torlódás, szabályozó nélkül	Torlódás, szabályozóval
1	3	778	635	778
2	4	840	840	840
3	1	773	517	773
4	2	851	504	504
	Összesen	3242	2496	2895

17. Táblázat: Várható forgalomnagyságok egy harmadik fázis beiktatása esetén

Az első két eredményt tartalmazó oszlop a korábbi mérések eredményeit tükrözik, az utolsó oszlop a várható eredményt, az új, ideálisan működő szabályozóval. A következőképpen jött ki az eredmény. Feltételeztük, hogy ideális esetben, a szabályozás megfelelő működése esetén, a torlódást elszenvedő irány (4-2) kivételével az összes irány az akadálytalan haladásnak megfelelő értékeket hozza. Azért feltételezhetjük ezt, mert a

zöldidőket nem változtatjuk meg, csak a 4-2 iránynak adunk a torlódásnak megfelelően rövidebb szabadidőt. Ennek következménye, hogy jármű nem fog a kereszteződésben álló helyzetben maradni. Így a többi irány szabadon mozoghat, tehát a szabad áramlásnak megfelelő forgalomnagyságokat produkálja. Látható, hogy ideális esetben sem érhetünk el akkora növekedést, mint az alap elrendezéssel, de így is jelentős a várható haszon. Valamelyest még növelhető a csomópont áteresztőképessége, ha a 2-4 iránynak csökkentjük a zöldidejét, az 1-3, 3-1 irányok javára. De ez már nem a torlódásdetektálás része, hanem a forgalomoptimalizálásé, tulajdonképpen semmi köze a torlódáshoz. Lezögezhetjük, hogy érdemes egy 3. fázis létrehozásának irányában elmozdulni.

8.2. Jobbra kanyarodás engedélyezése

Szimulációnkhoz eddig egy végtelenül leegyszerűsített modellt használtunk, többek között nem engedélyeztük a jobbra kanyarodást sem, azért, hogy ez ne befolyásolja a detektálás vizsgálatának hatékonyságát. Az életszerűség felé való haladás egyik sarkalatos pontja lehet a jobbra kanyarodás engedélyezése. Ez alapvetően megváltoztatná a csomópont kapacitását, hiszen a kanyarodó járművek feltarthatják az egyenesen haladókat, de mindenképpen enyhe lassításra készíthetők.

Másik szempont, hogy a torlódás irányában (4-2), gondot okozhat, hogy a 3-1 irányból jobbra kanyarodóknak esetleg nem jut hely a bekanyarodásra, a torlódás miatt. Ebben az esetben viszont éppen ők fogják feltartani az egyenesen haladókat, nem a csomópontban rekedt, 4-2 irányban haladók. Ez a jelenség sok gondot okozhat a szabályozó ideális beállításában. Hozzá tartozik a helyzethez, hogy várhatóan lassabban fog kialakulni a torlódás a 4-2 irányban, hiszen a 4-3 irány engedélyezetté válásával csökken a 4-2 irány forgalma.

Egy megoldási lehetőség, hogy távolabb helyezzük el a detektáló egységet, és nem engedjük, hogy a torlódás következtében a kocsisor elérje a kereszteződést. Így szabad helyet biztosíthatunk a kanyarodó járművek részére is. Tovább finomíthatjuk a szabályozást azzal, hogy az előbb tárgyalt 3. fázis mellé definiálunk egy 4.-et is. Ez a fázis korábban adna szabad jelzést a 3-2 iránynak, mint a 3-1 iránynak. Akkor lehetne használni ezt a fázist, amikor a 4-2 irány már a detektálás következtében tilos jelzést kap, de még a 2-4 irányban szabad jelzés érvényes. Tehát ebben a fázisban a 2-4 és 3-2 irányokat egyszerre engedélyoznánk. Ezzel az intézkedéssel tovább növelhető a csomópont kapacitása.

8.3. Többsávós utak

A valósághoz való közelítés következő állomása lehetne, ha egyes irányokban több sávot hoznánk létre. Azon túl, hogy a csomópont kapacitása ettől lényegesen megnőne, a torlódásdetektálást megnehezíti. Mert ebben az esetben már minden egyes sávban külön detektort kell elhelyeznünk. Ez önmagában nem bonyolult feladat, a nehézség inkább a szabályozási oldalon jelentkezik. Hiszen semmi sem garantálja, hogy az egyes sávokban egyszerre jelentkezik a torlódás, sőt egyenesen valószínűtlen. Mégis olyan logikát kell létrehozunk, hogy megbízhatóan tudjuk érzékelni a torlódást.

Legalább két lehetőség közül választhatunk. Az egyik, hogy már akkor torlódást észlelünk, ha csak az egyik sáv detektora jelez, legyen az akármelyik. A másik, hogy csak akkor tekintjük kialakultnak a torlódást, ha mindkettő detektor jelez. Az első esetben előfordulhat, hogy ténylegesen csak az egyik sávban alakult ki torlódás, ebben az esetben tényleg fölösleges lenne jelezni, hiszen ekkor biztosított a „menekülési út” (a másik sáv) az esetlegesen a kereszteződésben maradt járműveknek.

A második esetben a logika ténylegesen csak akkor észlelné torlódást, ha már mindkét sáv érintett. Ez viszont magában hordozza annak lehetőségét, hogy az egyik sávban hosszabb kocsisor alakult ki, mire a másik sávban jelzés történik, ezért a szabályozás nem tudja ellátni az eredeti feladatát, a csomópontban lévő torlódás kiküszöbölését. Megoldás lehet, ha messzebb helyezük el a detektorokat a kereszteződéstől, biztonsági tartalékot hagyva a fent vázolt esetnek. Ebben az esetben késleltetetten kell torlódást jelezni, hogy pontos legyen a szabályozás. Másik megoldás lehet, hogyha az eredeti detektorokon túl, még sávonként egy-egy detektort elhelyezünk, a csomóponttól távolabb. Így előre észlelhetjük a torlódás kialakulását sávonként, ennek megfelelően reagálhatunk a pillanatnyi forgalmi helyzetre.

Tovább lehet módosítani a csomópontot azzal, hogy egyes sávokat kanyarodósávnak jelölünk ki, másokat pedig az adott irányra rákanyarodóknak tartunk fenn (járműosztályozók). Talán ez még egyszerűsíti is a szabályozást, mert erre a sávra már nem kell torlódásdetektort elhelyezni, csak az egyenesen haladó sávokra. Bár, ha igazán igényes programot akarunk, akkor a kanyarodóknak fenntartott, a csomópontból kivezető sáv melletti sávban biztosítjuk a besorolás lehetőségét, ezért ott távolabb kell elhelyezni a detektort. Erre csak abban az esetben van szükség, ha a szóban forgó sáv megszűnik.

8.4. Balra kanyarodás

Legnagyobb kihívás elé kétségkívül a balra kanyarodás engedélyezése állíthatja a torlódásdetektáló működését. A gondot az okozhatja, hogy ugyanazon, a torlódásra vizsgált szakaszon az egyenesen haladók más utat tesznek meg, mint a balra kanyarodók. Ki kell számítani, hogy melyik irányban kell távolabb elhelyezni a detektort, és ott kell kialakítani. Arra mindig van lehetőség, hogy késleltetést alkalmazzunk a logikában, de előbb nem tudjuk érzékelni a torlódást, mint ahogy az kialakul az adott szakaszon.

A balra kanyarodás engedélyezésével egy irányba már három másik irányból távozhatnak a csomópontból a járművek. Jó eséllyel három egymást követő fázisban. Így fennáll az a veszély, hogy nem lesz ideje kiürülni az adott szakasznak. Ezt megelőzendő, a kereszteződéstől sokkal távolabb kell elhelyeznünk a detektáló egységet, ezzel lerövidítve a kocsisort, helyet teremtve a következő fázisban érkező járműveknek. Torlódás esetén igazán nagy kihívást jelent a feladat megoldása. Ugyanakkor úgy is dönthetünk, hogy csak arra törekszünk, hogy ne maradjon senki a csomópontban tilos jelzés alatt. Ebben az esetben viszont féltő, hogy a következő fázis járművei már el sem indulhatnak, mert nincs hová besorolniuk. Ha mégis elindulnak, akkor ők fognak a kereszteződésben maradni. Ezt el kell kerülni.

Olyan kereszteződésben, ahol engedélyezett a balra kanyarodás, és maszkolt jelzőkkel, külön fázist biztosítunk nekik, ott minimum 3 fázisnak kell lennie. Ennyi fázis esetén már lehetőségünk van a fázisok felcserélésére, sorrendjüknek a változtatására is, ezzel optimalizálhatjuk a csomópont forgalomáramlását. Ezt is célszerű szem előtt tartani a szabályozó tervezésénél.

8.5. Torlódás vizsgálata több irányban

Eddig csak egyetlen irányban figyeltük a torlódás kialakulását, úgy vettük, hogy a többi irányban „korlátlan” elnyelő képessége van. Ez természetesen a valóságban nincs így. Sokkal életszerűbb, hogy egy adott időpontban legalább két irányban torlódás alakul ki. Szabályozási lehetőségeink ebben az esetben korlátozottá válhatnak, mert nem fogunk tudni más irányoknak hosszabb zöldidőt adni. Szélsőséges esetben előfordulhat még az a képtelen helyzet is, hogy egyszerre minden irányban tilos jelzést kell adnunk, akár hosszabb ideig is, annál az oknál fogva, hogy nem lennének képesek a járművek áthaladni a kereszteződésen anélkül, hogy ne kellene megállniuk a csomópont közepén, egy konfliktusponton.

Ha több irányban is előidézünk torlódást a szimuláció számára, gondoskodnunk kell az egyes irányok torlódásdetektálásának összehangolásáról. Célszerű megtartanunk a ciklusidőt, hogy ne változtassuk meg a szomszédos csomópontokkal való összehangoltságot. Ilyenkor csak a zöldidővel tudunk játszani, de a fázis kezdeteknek maradniuk kell az eredeti, cikluson belüli helyükön.

Alapesetben egymástól függetlenül is működhetnek a különböző irányok torlódásdetektáló logikái, csak összetettebb szabályozás esetén van szükség a rendszerek összehangolására.

9. Összefoglalás

A városi közlekedés során felmerülő nehézségek közül a torlódás az egyik legjelentősebb, éppen ezért diplomatervem a keresztezésekben kialakuló torlódásokkal foglalkozik. Ennek lényege, hogy a csomópont kivezető szakaszán feltorlódott járművek telítik az adott szakaszt, így a gépkocsivezető esetleg úgy megy be a kereszteződésbe, hogy már nem tudja elhagyni azt a szabad jelzés alatt, amivel torlaszt képez a keresztirányú forgalomnak. Azon a szakaszon egészen addig nem tudnak továbbhaladni, amíg a gátat képező jármű ki nem hajt a kereszteződésből.

Diplomatervemben olyan módszer kidolgozását tűztem ki célul, ami abban az esetben akadályozza meg a járművek behajtását a csomópontba, amikor a jelzőlámpa szabad jelzése alatt már nem biztosított számukra annak elhagyása.

Megvizsgáltam, hogy milyen forgalomszervezési módszerek állnak rendelkezésre a cél elérése érdekében, valamint azt is áttekintettem, hogy milyen mérési eszközök léteznek a forgalom lefolyásának vizsgálatára.

Ezt követően új, előreutató módszert dolgoztam ki a csomóponti torlódások detektálására, ami a járművek sebességváltozása alapján működő szabályozást valósít meg. A torlódásdetektáló logikát a LISA+ nevű programmal vizsgáltam meg a szoftver szimulációs moduljában, egy mintacsomópont segítségével.

A módszer lényege a következő: a csomópont kivezető szakaszán haladó forgalom sebességének a csökkenését egy detektor segítségével mérem, adott távolságra a kereszteződéstől. Amikor egy meghatározott szint alá csökken a sebesség, akkor a szabályozó torlódást feltételez, ennek megfelelően valós időben avatkozik be a csomópont forgalomirányító rendszerébe.

Sokrétű vizsgálatot végeztem a mintacsomóponton, meghatároztam a torlódásmentes kapacitást, ezután torlódást idéztem elő egy adott irányban a kivezető szakaszán, majd ismét lefuttattam a szimulációt. Ezt követően a kereszteződéstől megfelelő távolságra elhelyeztem egy a sebességmérő detektort. A távolság kiszámítására kidolgoztam egy képletet, ami az eredmények tanúsága szerint jól használható, ennek megfelelően helyeztem el a detektort a szimulációs hálózatban. Kidolgoztam a torlódásdetektáló logikát, amiben paraméterként többek között a detektor detektálási idejét adtam meg. A detektor foglaltságát voltam kénytelen vizsgálni, mivel a szoftver sebesség mérésére alkalmatlan volt. Viszont a sebesség és a foglaltsági idő közötti összefüggésnek kö-

szönhetően - minél nagyobb a foglaltsági idő, annál kisebb a haladási sebesség az adott szakaszon - a foglaltság mérésével is megvalósítható volt a szabályozó. Különböző detektálási idővel futtattam le a szimulációt, majd az adatokat kiértékeltem.

A torlódásdetektáló szabályozó alkalmazásával elért legfontosabb eredmények a következők:

Csomópont kapacitás növekedése	26,2 %
Kapacitáskihasználtság	97,16 %
Utazási idő csökkenése	27,81 %
Veszteségidő csökkenése	30,12 %

A részletes adatok vizsgálatából arra a következtetésre jutottam, hogy a szabályozó elérte a célját, tilos jelzés alatt nem maradt jármű a kereszteződésben.

Az eredményeket felhasználva kiszámítottam, hogy mekkora gazdasági előnyt jelenthet a szabályozó alkalmazása. Számításaim szerint egy órányi torlódás alatt, egy csomópontban nemzetgazdasági szinten körülbelül **37 ezer forintot** lehet megtakarítani. Az összeg nagyságrendje alapján úgy gondolom, hogy a szabályozó rendszer bevezetése rövid időn belül megtérül.

A logikát egyszerűbb csomópontokra dolgoztam ki, használatával meggyőző, a gyakorlatban is hasznosítható eredményeket értem el. Ugyanakkor további fejlesztések megvalósítására is van még lehetőség, ezek irányait ki is jelöltem.

Biztos vagyok abban, hogy a rendszer tökéletesítésével még számos forgalomszabályozási cél érhető el.

10. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani Dr. Varga István konzulensemnek, valamint Tettamanti Tamásnak, szakmai segítségük ösztönzőleg hatott a diplomaterv elkészítésére. Külön köszönettel tartozom Schvanner Norbertnek, a LISA+ szoftverhez nyújtott segítségéért.

11. Irodalomjegyzék

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Gridlock>
- [2] 1/1975. (II. 5.) KPM-BM együttes rendelet a közúti közlekedés szabályairól;
Az aktuális közúti közlekedési szabályzat megtalálható:
http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=97500001.KPM&kif=közlekedés#xcel

Harmadik fejezethez felhasznált irodalom:

- [3] Dr. Fi István: Forgalmi tervezés, technika, menedzsment; 1999 tankönyv
http://www.uvt.bme.hu/targyak/utterv/fi_ftm/
- [4] Szabóné Kamarás Csilla, Városi közlekedés, 5 előadás, Jelzőlámpás forgalom-irányítás, 2003

Negyedik fejezethez felhasznált irodalom:

- [5] US. Department of Transportation, Federal Highway Administration: Traffic Detector Handbook, Third Edition, Volume I.-II. (P. No.: FHWA-HRT-06-108), 2006 Nov.
- [6] Dr. Varga I., Luspay T., Tettamanti T.: Közúti közlekedési automatika, BME Közlekedésautomatikai Tanszék, 2008 Jegyzet
- [7] Georgios Vigosa, Markos Papageorgiou, Yibing Wang: Real-time estimation of vehicle-count within signalized links
- [8] Schlothauer & Wauer, <http://www.schlothauer.de/en/>
- [9] Tímár András: A közúti költségek, 2006 Előadás

12. Ábrajegyzék

1. ábra: Önzáró torlódás (Gridlock) ^[1]	9
2. ábra: Jelzőlámpás kereszteződésen való áthaladás út-idő diagramja.....	16
3. ábra: Csomópontok összehangolásának elvi vázlata	18
4. ábra: Jármű hatása a föld mágneses erőterére.....	20
5. ábra: Területfoglaltság módszer, detektor elhelyezkedése a helyszínrajzon	24
6. ábra: Valós idejű járműszám becselő elvi elrendezése.....	26
7. ábra: Sebesség alapú módszer, detektor elhelyezkedése a helyszínrajzon	28
8. ábra: Detektor elhelyezkedésének távolsága a helyszínrajzon	29
9. ábra: Szimulációs csomópont helyszínrajza	38
10. ábra: Változók és paraméterek, torlódási logika.....	46
11. ábra: Paraméterek, torlódási logika	47
12. ábra: Forgalm nagyság változása	55
13. ábra: Utazási idő változása	56
14. ábra: Veszteségidő változása	57

13. Táblajegyzék

1. Táblázat: Mérési adatok, torlódás esetén, detektáló nélkül	43
2. Táblázat: Mérési adatok, torlódás nélkül	44
3. Táblázat: Mérési adatok, 3 s-os detektálási idő esetén	47
4. Táblázat: Mérési adatok, 2,5 s-os detektálási idő esetén	48
5. Táblázat: Mérési adatok, 2 s-os detektálási idő esetén	48
6. Táblázat: Mérési adatok, 1,5 s-os detektálási idő esetén	48
7. Táblázat: Mérési adatok, 1 s-os detektálási idő esetén	48
8. Táblázat: Forgalm nagyságok, különböző detektálási idők esetén.....	49
9. Táblázat: Forgalm nagyságok változása a szabályozó nélküli esethez viszonyítva ..	51
10. Táblázat: Utazási idők, különböző detektálási idők esetén	51
11. Táblázat: Utazási idők változása a szabályozó nélküli esethez viszonyítva.....	52
12. Táblázat: Veszteségidők, különböző detektálási idők esetén	52
13. Táblázat: Veszteségidők változása a szabályozó nélküli esethez viszonyítva	53
14. Táblázat: Ideális utazási idők, különböző detektálási idők esetén.....	54
15. Táblázat: Utazási idők változása az ideálishoz képest.....	54
16. Táblázat: Utazási idők csökkenéséből eredő megtakarítás számítása	58
17. Táblázat: Várható forgalm nagyságok egy harmadik fázis beiktatása esetén.....	59

14.2. Torlódási logika forráskódja

program Torlodos_vezertes;

```
{(Fazis2):
  {Fazis2_Szamlalo_Indit;
  (Fazis2_Szamlalo < Fazis2_Min):
    {exit;}
  else
    {(Fazis2_Szamlalo = Fazis2_Max):
      {Fazis_Valtas_2.1;
      Fazis2_Szamlalo_Leallitas;
      M:=Ciklus_Ido-Fazis2_Szamlalo;
      Fazis2_Szamlalo_Nullaz;
      exit;}
    else
      {(Detektor_Foglaltsagi_Ido < Detektor_Foglaltsagi_Ido_Min):
        {exit;}
      else
        {Fazis_Valtas_2.1;
        Fazis2_Szamlalo_Leallitas;
        M:=Ciklus_Ido-Fazis2_Szamlalo;
        Fazis2_Szamlalo_Nullaz;
        exit;};};};}
else
  {(Fazis1):
    {Fazis1_Szamlalo_Indit;
    (Fazis1_Szamlalo < Fazis1_Min):
      {exit;}
    else
      {(Fazis1_Szamlalo = Fazis1_Max):
        {Fazis_Valtas_1.2;
        Fazis1_Szamlalo_Leallitas;
        Fazis1_Szamlalo_Nullaz;
        M:=0;
        exit;}
      else
        {(Fazis1_Szamlalo = M):
          {Fazis_Valtas_1.2;
          Fazis1_Szamlalo_Leallitas;
          Fazis1_Szamlalo_Nullaz;
          M:=0;
          exit;}
        else
          {exit;};};};}
  else;
  exit;};};
```