

Autópálya forgalom károsanyag kibocsátásának modellezése
és szabályozása

Csikós Alfréd

Budapest, 2010.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Varga Istvánnak, akitől kezdettől fogva rengeteg bátorítást kaptam a kutatáshoz, illetve Luszpay Tamásnak, akinek értékes segítsége és iránymutatása nélkül nem jött volna létre ez a munka. Továbbá köszönöm Bauer Péter, Németh Balázs, Tettamanti Tamás értékes segítségét és figyelmét.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	5
2	Előzmények.....	7
2.1	Autópálya forgalomból származó szennyezők jellemzői.....	7
2.1.1	Autópálya forgalom emissziójának értelmezése, a szennyezők hatásai	7
2.1.2	Belsőégésű motorokból származó károsanyagok.....	7
2.1.3	A kipufogógázok káros hatásai	7
2.2	Forgalmi emisszió modellezése	8
2.2.1	A pillanatnyi kibocsátást befolyásoló tényezők.....	8
2.2.2	Forgalmi szituációk és modellezésük.....	9
2.2.3	Emissziómodellek	9
2.3	Korábbi modellezések, szabályozások.....	11
2.3.1	Dinamikus sebességkorlátozást alkalmazó szabályozás az emisszió optimalizálására.....	11
2.3.2	Szabályozás a károsanyag kibocsátás és a teljes eljutási idő optimalizálására	12
2.3.3	Makroszkopikus forgalom és emisszió modellezés – járműegységre számított kibocsátás	12
3	Emissziós modell felállítása és ellenőrzése.....	14
3.1	Meglévő emissziós modellek alkalmazása.....	14
3.1.1	Köztes forgalmi modell létrehozása.....	14
3.1.2	Ismert modellek felhasználása	15
3.2	Szimuláció.....	16
3.2.1	Szimulációs környezet.....	16
3.2.2	Algoritmus.....	17
3.3	Az elvégzett szimulációs futtatások.....	21
3.4	Szimuláció bemutatása egy valós forgalmi szituáción.....	21
3.5	Eredmények.....	24
3.6	Értékelés.....	25
4	Szabályozás tervezése	27
4.1	Makroszkopikus forgalom modell	27
4.2	Vizsgált szakasz modellje	29
4.3	Forgalom modell linearizálása	30
4.4	Szabályozók tervezése.....	31
4.4.1	Ismeretlen munkapontok számítása	31
4.4.2	A kiválasztott munkapontok.....	32
4.5	LQ szabályozás	37
4.5.1	Diszkrét idejű LQ szabályozó	37
4.5.2	Költségfüggvények, állapot súlyozás.....	37
4.5.3	Zavarások kezelése.....	39
4.6	Szakaszonként lineáris szabályzó: kiterjesztett LQ szabályozás a bemenőjel korlátok betartására.....	40
4.6.1	A korlátozásokat betartó szabályozás vizsgálata	41
4.6.2	A „k _i ” állapotvisszacsatolás levezetése diszkrét idejű Plc esetén.....	42
4.6.3	A szakaszonként lineáris szabályzás implementálása az autópálya modellre.....	43
4.7	Robusztusság vizsgálata.....	44
4.7.1	Kis erősítések tétele (SGT - Small Gain Theorem).....	44
4.7.2	A kis erősítések tételének alkalmazása	44

4.7.3 Bizonyítás: $\ M\ _{\infty}$ monoton függvénye a kezdőállapotnak	45
4.7.4 A szabályások robusztusságának ellenőrzése az SGT tétel alapján	46
5 Szimulációk a szabályozott rendszeren.....	50
6 Összefoglalás.....	63
Irodalomjegyzék.....	64
Melléklet.....	67

Rövidítések

TTS	Total Time Spent	Teljes eljutási idő
TE	Total Emission	Összes kibocsátás
DARE	Discrete-time Control Algebraic Riccati Equation	Diszkrét idejű kontrol algebrai Riccati egyenlet
LTI	Linear Time Invariant	Lineáris, időinvariáns (rendszer)
DLTI	Discrete Linear Time Invariant	Diszkrét, lineáris, időinvariáns (rdsz)
SGT	Small Gain Theorem	Kis erősítések tétele
LQR	Linear Quadratic Regulator	Lineáris kvadratikus szabályzó
Plc	Piecewise Linear Controller	Szakaszonként lineáris szabályzó
LD	Loop Detector	Hurokdetektor
RM	Ramp Metering	Felhajtószabályozás
SIMO	Single Input, Multiple Output	Egy bemenetű, több kimenetű (rendszer)

1 Bevezetés

A globális motorizáció elmúlt évtizedekben megfigyelt növekedése komoly környezeti károkat okoz. A belsőégésű motorokból származó károsanyagok közül a legjelentősebb hatású a CO₂, mely a legnagyobb mennyiségben termelődő üvegházhatású gáz. A klímaváltozást okozó CO₂ kibocsátás mintegy 25%-a származik a közlekedésből, az összkibocsátás csaknem 20%-a közúti eredetű [1]. A kipufogógázok további összetevői (elégtelen szénhidrogének (HC), CO, NO_x) is egyaránt okoznak lokális és globális károkat.

Napjaink egyik legfőbb célkitűzése a fenntartható fejlődés biztosítása, ennek egyik követelménye a közúton keletkező szennyezés csökkentése, és ezzel az elfogadható gazdasági és társadalmi optimumának az elérése. A diplomamunka célja olyan forgalom modellezési és szabályozási módszer kidolgozása, amellyel befolyásolható közúti forgalom által kibocsátott károsanyag mennyisége. Egy ilyen új megközelítésű forgalomszabályozás során felhasznált eszközök és módszerek mindazonáltal nem léphetnek ki a közúti forgalomirányítás meglévő és széles körben használatos eszköztárából [2].

A feladat elvégzéséhez szükségessé vált egy olyan emissziós modell felállítása, mely egy későbbi szabályozó tervezése során felhasználható. A modellek vizsgálatához szükséges volt az autópályán lévő járműforgalom és kibocsátásának pontos modellezése. A forgalom viselkedésének leírására egy szimulációs programot készítettem Matlab környezetben. Ez a szoftver a járművek mikroszkopikus mozgásegyenletei mellett makroszkopikus „méréseket” is képes reprodukálni, illetve ezek segítségével a különféle emissziómodellekkel számított értékeket számítani. A szimulátor segítségével lehetővé vált a létrehozott emissziómodellek összehasonlítása, és a modell kiválasztása, mely kellő pontossággal jellemzi a károsanyag kibocsátást, emellett a későbbi szabályozó tervezése során felhasználható.

A közlekedés, mint folyamat működésének javítása többféle megközelítés alapján lehetséges: egyrészt a meglévő infrastruktúra (forgalmi áteresztőképesség) bővítésével, másrészt a változatlan infrastruktúrális feltételek megtartásával, és a folyamat optimalizálásával. Míg előbbi igen költséges és sok erőforrást igényelő megoldás, addig utóbbi nagyságrendekkel kisebb költségű beavatkozás, mely szintén jelentős eredményekre képes.

A modell alapú szabályozó tervezéséhez a szimulációk alapján kiválasztott mezoszkopikus modellben használt emissziófüggvényt használtam fel. Az autópálya forgalom, mint szabályozandó rendszer leírásához makroszkopikus forgalmi modellt alkalmaztam. A forgalom optimalizálásához használt bemenőjelnek a felhajtó-szabályozást (ramp metering) választottam [30], mely az Egyesült Államokban illetve Nyugat-Európa egyes országaiban elterjedt forgalomirányító módszer. A makroszkopikus leírással modellezett rendszer állapotdinamikai egyenlete nemlineáris, ezt munkapont körüli linearizálással tettem alkalmassá lineáris kvadrátikus (LQ) optimalizálásra. A szabályozandó rendszer pozitív (azaz az állapotok és bemenőjelek mérőszáma nemnegatív szám), ugyanakkor a hagyományos LQ szabályozás adott esetben negatív bemenőjelet eredményezhet. Ezen probléma áthidalására az úgynevezett szakaszonként lineáris ('Piecewise linear control – Plc') szabályozást alkalmaztam, mely korlátos bemenőjel előállítását biztosítja a lehető legjobb performancia mellett. Mivel ezen módszer diszkrét idejű rendszerekre való alkalmazásáról a kutatásom során nem találtam utalást, így levezettem a szakaszonként lineáris szabályozás optimális visszacsatolását diszkrét idejű rendszerekre. A szabályozók tervezésénél a robusztusságot is vizsgáltam, és ezek alapján választottam meg azt a tartományt, amelyre robusztus Plc szabályzó tervezhető.

Az így vázolt módon háromféle szabályozást hasonlítottam össze: ezen szabályozások költségfüggvényükben tértek el egymástól. Az első költségfüggvényében kizárólag a teljes eljutá-

si idő (Total Time Spent - TTS) szerepel, mely a napjainkban használatos korszerű forgalom-szabályozási stratégiák sajátja. A második szabályozás költségfüggvénye a vizsgált szakaszon realizált összes károsanyag kibocsátást (Total Emission - TE) tartalmazta. A harmadik szabályozás optimalizálási kritériuma a fent említett két költségfüggvény összege, így egy kompromisszum elérését célozza meg.

A tervezett szabályozással végzett szimulációk során kiderült, hogy a napjainkban használatos, kizárólag eljutási idő alapú tervezés nem biztosít kibocsátás és tüzelőanyag-fogyasztás-optimális folyamatot. A szabályzók összehasonlításából látható, hogy egy többkritériumú forgalomirányítás tervezése egyaránt eredményez javulást az egy járműre jutó eljutási idő, és a járműfajlagos kibocsátás tekintetében is, így a károsanyag kibocsátás, mint tervezési szempont indokolt a további forgalomirányító stratégiák tervezésekor.

2 Előzmények

A fejezet témája az emisszió mint tág értelemben használt fogalom autópálya forgalmi környezetben való értelmezésének meghatározása, az egyes szennyezők keletkezésének és káros hatásainak ismertetése, a modellezéséről és a kibocsátás optimumát célzó szabályozásokról szóló irodalom áttekintése és összefoglalása.

2.1 Autópálya forgalomból származó szennyezők jellemzői

2.1.1 Autópálya forgalom emissziójának értelmezése, a szennyezők hatásai

Az autópályán haladó forgalom hatására keletkező szennyezés igen sokrétű: nem csupán anyagi természetű, mivel rezgést, zajt, fényszennyezést is jelent a környezet számára, a dolgozat azonban az anyagi természetű szennyezésre koncentrál. Az anyagi jellegű szennyezés is – keletkezésének módjától függően – több csoportra osztható: ilyen csoportot alkotnak a jármű kipufogójából származó szennyezők, a jármű alkatrészeinek kopásából (gumiabroncs, fékbetét, tengelykapcsoló stb) származó szennyező anyagok, illetve az útpálya kopása során leváló szennyezők. Mivel ez utóbbiak modellezése pusztán forgalmi változókkal nem lehetséges, így jelen dolgozat a járművek kipufogójából származó károsanyagok vizsgálatára korlátozódik.

2.1.2 Belsőégésű motorokból származó károsanyagok

A belsőégésű motorokban lejátszódó reakció során a szénhidrogénekből álló tüzelőanyag a tökéletes égés során széndioxidá és vízzé ég el.



A valós életben ugyanakkor ez nem teljesül: a belső égésű motorokban nem tökéletes égés játszódik le: a magas hőmérsékletű oxigénhiányos környezetben CO is keletkezik, valamint elégtelen szénhidrogének (jele HC).



Emellett a nem szintetikus tüzelőanyagokban jellemzően megtalálhatóak további szennyezők többek között nitrogén, valamint a levegő nitrogéntartalmának magas nyomáson történő oxidációja és a kenést biztosító motorolaj égésterbe kerülése és további NO_x szennyezést eredményez.



2.1.3 A kipufogógázok káros hatásai

Gáznemű szennyezők

CO₂: üvegházhatású gáz. Egészségkárosító hatása nincs, de hozzájárul a globális felmelegedéshez.

CO: a léggel vértel kerülő CO sokkal erősebben kötődik a vér hemoglobinjához, mint az oxigén, így kiszorítja az oxigént a vérből. Rövid távú hatásai: fejfájás, szédülés, eszméletvesztés, agykárosodás. Nagy dózisban halált okoz. Tartós, kis dózis hatása: a szívmot ellátó ko-

szorúerek keringését csökkenti, elősegíti a koszorúér-elmeszesedést, növeli a szívinfarktus kockázatát.

NO_x: a nitrogén-dioxid és reakciótermékei a tüdő nedvességtartalmában oldódik, salétromsav keletkezik. Rövid távon csökkent tüdőfunkciót eredményez, hosszútávon asztmát, tüdőbetegségeket okoz. Üvegáztatású gáz.

Szilárd, folyadék halmazállapotú szennyezők

HC: elégetlen szénhidrogének. Szilárd, és folyadék és gáz halmazállapotú, szilárd esetben részecskéket alkot, amely a szálló por („particulate matter”) egyik fő összetevője. A 10 µm alatti részecskék (PM₁₀) nem szűrődnek meg az orrban, hanem a tüdő léghólyagocskáiba jutva bekerülnek a vérkeringésbe. Az elégetlen szénhidrogének erősen rákkeltőek, nagy aktív felületük miatt képesek megkötni a forgalomból adódó egyéb erősen rákkeltő szennyezőket (pl. azbeszt, mangán).

2.2 Forgalmi emisszió modellezése

2.2.1 A pillanatnyi kibocsátást befolyásoló tényezők

A pillanatnyi kibocsátást számszerűsítő függvény alapvetően a jármű időbeli dinamikai jellemzőinek függvénye, emellett számos, a járműre és környezetére jellemző paraméter befolyásolja. A fejezet ezen paramétereket tekinti át.

Járműjellemzők

Megkülönböztetjük a jármű motorikus, erőátviteli és karosszériára jellemzői paramétereit. A motorikus jellemzők közé tartozik a tüzelőanyag típusa, hengerűrtartalom, befecskendezés és szelepezérlés típusa, a motor teljesítmény- és nyomaték görbéi, kipufogórendszere. Az erőátviteli jellemzők között említhető a sebességváltó típusa, a differenciálmű típusa, a hajtott kerekek száma és módja. A karosszéria jellemzői a járműtömeg, karosszéria légellenállása és homloklapfelület nagysága, a felfüggesztés és a kerekek jellemzői.

A fenti járműspecifikus paraméterek alapvetően befolyásolják a jármű fogyasztását és ebből kifolyólag károsanyag kibocsátást is. A 2.2.3 fejezetben ismertetett emissziómodellek ezen paraméterek felhasználásával csoportosítják a járműveket, és az egyes járműosztályokhoz rendelt emissziós együtthatókkal jellemzik egy forgalom kibocsátását.

Útfelület jellemzői

A jármű motorja által leadott teljesítmény és ezáltal az okozott kibocsátás arányos a jármű és az útpálya között átadott erő nagyságával, így a jármű-útpálya kapcsolat minősége rendkívül fontos az emisszió vizsgálata során. A pálya geográfiai jellemzői (emelkedés szöge, kanyar ívsugara, dőlésszöge) a teljesítmény leadás módját befolyásolják. A kerekek futófelületének az útfelülettel való kapcsolatát a felület mikro- és makroérdessége (kátyúk) határozza meg, ez a gördülési ellenállást befolyásolja, ennek növekedésével a kerekeken ható erő és vele párhuzamosan a leadott teljesítmény nő.

Klimatikus és földrajzi jellemzők

Kis befolyású tényezőként említhetőek ezen jellemzők. Első csoportjuk a járműmotor üzemét közvetlenül befolyásolja (tengerszint feletti magasság, hőmérséklet, légnyomás, páratartalom), második csoportjuk közvetetten befolyásolja a leadott teljesítményt: szélereősség.

2.2.2 Forgalmi szituációk és modellezésük

Az emisszió szempontjából érdekes forgalmi szituációk modellezésére több módszer létezik. Városi környezetben, lokális (pl. kereszteződések környékén keletkező) szennyezés vizsgálathoz leggyakrabban mikroszkopikus forgalmi modellt használnak [12], [13]. (Lásd még 3.2.2 fejezet). A mikroszkopikus modellek igen nagy pontossággal jellemzik az egyes járművek sebesség-idő, gyorsulás-idő függvényeit. Nagyobb méretű városi hálózatok esetén is mikroszkopikus forgalommodellezés használata indokolt, a rövid konstans sebességű haladás miatt. Autópálya szakaszokon a makroszkopikus forgalom modellezés kielégítő pontosságú, mivel ebben a környezetben nem jellemzőek a megállások, illetve a nagy gyorsulások/lassulások sem.

Célszerű ugyanakkor minél többféle utazást vizsgálni, mert így valamennyi, gyakran előforduló és nagy számban ismétlődő utazás kibocsátásáról adható információ. Ilyen utazásnak tekinthetők a napi ingázások, tömegközlekedési járművek fordulói, városi környezetben preferált útvonalak vizsgálata jellegzetes csúcsidei időszakokban. Egy jármű fent említett szituációkra jellemző kibocsátása a standard menetciklusok segítségével jellemezhető, melyeket kifejezetten e célból hozták létre. Egy menetciklus jellegzetes forgalmi szituációt ad meg, illetve jellegzetes utazásokat, mely jól jellemzi egy nagyváros és környezetében jellemző egyéni közlekedők utazásait. A menetciklusok előnye, hogy laboratóriumi körülmények között reprodukálhatóak.

A felsorolt modellezések tanulsága, hogy míg a mikroszkopikus forgalommodellezés a kereszteződés kiképzésében, a felhasznált forgalomtechnikai eszközök kiválasztásában illetve a környezeti és gazdasági hatásainak számításában használatosak, a makroszkopikus modellek és a menetciklusok egy nagyobb hálózat által okozott összes kibocsátás becslésére szolgálnak. Ezen becslések azonban igen elnagyoltak [12].

A kibocsátásokat különböző hálózatokon vizsgálva megállapítható, hogy az emisszió mind mennyiségében, mind összetételében alapvetően függ a hálózat struktúrájától [16]. Városi környezetben a legkisebb összkibocsátás a megállások számának minimalizálásával érhető el, a jelenleg használatos hálózati forgalomirányító stratégiák is ezt az optimumot keresik [15]. Csupán a jelzőlámpával irányított csomópontok körforgalmúvá tétele a lokális kibocsátás 50%-os csökkenését idézte elő [14].

Nem városi környezetben a kibocsátás mértéke függ az út osztályától, ennek magyarázata a megengedett sebességhatároktól függő kibocsátásfüggvények [17].

Autópályán a korszerű forgalomirányító stratégiák a teljes eljutási idő minimalizálását célozzák meg, ennek teljesítéséből azonban nem következik az kibocsátás minimalizálása.

2.2.3 Emissziómodellek

Az emissziófüggvények felvétele valós forgalmi körülmények között, vagy laboratóriumban zajlik: a kipufogóra szerelt mérőműszer a kipufogógáz pillanatnyi összetételét és mennyiségét méri. Így nyerhető az egyes szennyezők értékei a dinamikai változók (sebesség, gyorsulás) függvényében. Az így nyert adatsor egyetlen járműre jellemző. Emissziófüggvényét az adatsorhoz illesztett regresszió alapján nyerik. Ugyanakkor ez csak egyetlen jármű emissziófüggvénye: a forgalom heterogén járműösszetétele miatt jellemző járműosztályokat képezve, és a járműosztályra jellemző emissziófüggvénnyel közelíthető a forgalom kibocsátása.

Megközelítési módok

A forgalomra jellemző emisszió-idő függvény meghatározása kétféle megközelítés alapján lehetséges [8].

- A mikroszkopikus megközelítés során a járműegyedek utazási ideje, vagy egy vizsgált időintervallum alatt kibocsátott károsanyag számítása történik.
- A makroszkopikus megközelítés a forgalmi áramlatot vizsgálja: jellemzően egy adott útszakaszon felbukkanó forgalom emisszióját, az ott mérhető makroszkopikus forgalmi változók segítségével (forgalomnagyság, átlagsebesség) (1. táblázat).

A pontosabb emissziós értékeket a mikroszkopikus változók időfüggvényei alapján nyerhetjük. Ez a modell felvételének módjából adódik: a mikroszkopikus modell kialakításakor a pillanatnyi, mért járműdinamikai változók és a mért kibocsátások közti összefüggést közelítik.

Megközelítés	Modellváltozók	Felbontás	Szükséges paraméterek
Makroszkopikus	Forgalmi átlagsebesség, forgalomnagyság	Teljes forgalom	Időszakra jellemző forgalomösszetétel $E(v)$ függvénye.
Mikroszkopikus	Pillanatnyi sebesség, gyorsulás	Járműosztály	Járműosztályok $E(v,a)$ függvénye.
Szubmikroszkopikus	Pillanatnyi sebesség, gyorsulás, váltófokozat	Járműegyed	Minden járműtípus paraméterei (P-n, i-n diagram, $E(a, v, k)$ függvény.

1. táblázat Emissziós modellek áttekintése

Forgalomszabályozáshoz nem használható fel mikroszkopikus megközelítésű modell, mivel nem állnak valós idejű adatok rendelkezésre a forgalom minden résztvevőjéről. Hovatovább, a két megközelítés eltérő mivolta miatt az emissziómodellek nem hasonlíthatók össze, mivel előbbi egyéni emisszió-idő függvényeket ír le, míg utóbbi egy szakaszon felbukkanó járművek emisszió-idő függvényének összegét.

VT-Micro

Kétváltozós, mikroszkopikus megközelítésű modell [7]. A modell változói a gyorsulás és a sebesség. A 3 fejezetben az ezen modellel számított valós idejű adatokat tekintem mérvadónak.

Az amerikai Virginia Tech Közlekedési Intézetben kifejlesztett modell 5 személygépkocsi és 2 tehergépkocsi osztályt különböztet meg. Az összesen 60 járművel végrehajtott mérések során valós, úton mért körülmények között mérték a gázkibocsátásokat, különböző gyorsulás és sebesség függvényekkel. A mért eredményekhez regressziós modellt illesztettek. Az exponenciális függvény kitevőjében a sebesség és gyorsulásváltozók harmadfokú polinomja szerepel. A modell megkülönböztet pozitív és negatív gyorsulást. (A VT-Micro modell által modellezett kibocsátásfüggvény sajátossága: a kibocsátás negatív gyorsulás esetén is nullától eltérő, pozitív értéket vesz fel.) Az egyes járműosztályokhoz különböző „L, M” együtthatók tartoznak.

$$E(t)_p = \begin{cases} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 L_{i,j}^p \times v^i(t) \times a^j(t), ha \dots a(t) > 0 \\ \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 M_{i,j}^p \times v^i(t) \times a^j(t), ha \dots a(t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

ahol $E(t)_p$: a „p” szennyező emisszió-idő függvénye [kg/s]
 $a_k(t)$: k. jármű gyorsulás-idő függvénye [m/s^2]
 $v_k(t)$: k. jármű sebesség-idő függvénye [km/h]
L: regressziós együtthatók (pozitív gyorsulás estén)
M: regressziós együtthatók (negatív gyorsulás estén)
N: járműszám [db]
i,j hatványkitevő

Copert

Egyváltozós, makroszkopikus megközelítésű modell [6]. A modell egyetlen változója a sebesség, mely - ha pillanatnyi sebességként használjuk 0 gyorsulást feltételezve, és ezen sebességfüggvény a jármű teljes trajektóriáján ismert – igen pontos közelítést ad. A modellt azonban kifejezetten makroszkopikus változókkal leírt forgalom emissziójának jellemzésére készítették. A Thessaloniki Egyetemen kifejlesztett modell számos, Európában jellemző járműosztályra alkalmazható, a járművek adatbázisát időről időre frissítik. A függvény a sebesség harmadfokú polinomja. Az egyes járműosztályokat saját együtthatóikkal jellemzi.

$$E(t)_p = \sum_{i=1}^3 L_i^p \times v^i(t) \quad (5)$$

Ahol $E(t)_p$: „p” szennyező emisszió-idő függvénye
L: regressziós együtthatók

2.3 Korábbi modellezések, szabályozások

2.3.1 Dinamikus sebességkorlátozást alkalmazó szabályozás az emisszió optimalizálására

Az értekezés (Solomon Kidane Zegeye et al.: *Reduction of Travel Times and Traffic Emissions Using Model Predictive Control* [9]) a közútforgalmi folyamatszabályozás során a károsanyagkibocsátást (tüzelőanyag-fogyasztást) tekinti egyedüli szabályozási kritériumnak, és így keres optimális szabályozást. A szabályozáshoz MPC módszert alkalmaz, mely többkritériumú optimális szabályozást tesz lehetővé, az eljutási idő és a károsanyag kibocsátás közös optimumára törekszik.

A cikk megállapítja, hogy a károsanyag kibocsátás a legpontosabban a jármű pillanatnyi dinamikája alapján adható meg, melyet a mikroszkopikus járműkövetési modell ír le. Ezt követően bemutatja a szabályozáshoz felhasznált, Copert III. emissziós modellt, mely egy makroszkopikus megközelítésű emissziómodell: a forgalomra jellemző emissziót a forgalmi átlagsebesség függvényeként írja le. A későbbi szabályozások során is ezt használja a mikroszkopikus leírás helyett. Az autópálya forgalom leírásához másodrendű, nemlineáris modellt használ.

Az MPC szabályzás előnye, hogy korlátozások figyelembe vétele mellett nemlineáris rendszerek szabályozására is alkalmas. A módszer ismert kezdeti állapotok és zavarások alapján, adott horizontra számítja ki azt a bemenőjel sorozatot, mely a költségfüggvényt minimalizálja, majd ennek az első elemét helyezi a rendszerre. A rekurzív algoritmus minden diszkrét lépésben megismétli a számítást. A módszernek a rendszerre való alkalmazása a megfelelő költségfüggvény felírását jelenti: az egyes szennyezők (CO, HC, NO_x, CO₂) elméleti értéktől való eltéréseinek súlyozását írták fel. A szennyezők megfelelő súlyozását szimulációkkal vizsgálták.

A vizsgálatok során találtak olyan költségűsúlyokat, melyekkel 37,5% összes károsanyag-kibocsátás megtakarítást mellett 11% teljes eljutási idő csökkenést értek el.

2.3.2 Szabályozás a károsanyag kibocsátás és a teljes eljutási idő optimalizálására

Az értekezés (*Solomon Kidane Zegeye et al.: Model-based traffic control for balanced reduction of fuel consumption, emissions, and travel time [10]*), mely a [9] cikk által felvázolt munka folytatása, az optimális szabályozás meghatározásához használt MPC módszerben a károsanyag-kibocsátás (és ezzel közvetve a tüzelőanyag fogyasztás) mellett a teljes eljutási idő közös optimumát keresi. A szabályozáshoz dinamikus sebességhatárítást alkalmaztak.

A cikk áttekinti az emissziómodellezés lehetőségeit, és megállapítja, hogy a legpontosabb emisszió-idő függvény a VT-Micro modellel érhető el, mely egy kétváltozós (sebesség és gyorsulás), mikroszkopikus megközelítésű emissziómodell. Ennek felhasználása azonban csak akkor nyer jogosultságot, ha megfelelő információ áll rendelkezésre a forgalomra jellemző gyorsulásról. A cikk elsőként tesz kísérletet az forgalmi átlagsebesség időbeli változásának – a makroszkopikus gyorsulásnak – számítására: a felállított összefüggés helytállósága máig vita tárgyát képezi [19].

A szimulációk során négy különféle szabályozási stratégiát hasonlítottak össze: szabályozatlan; eljutási időt minimalizáló; emissziót (és tüzelőanyag-fogyasztást) minimalizáló; illetve többkritériumú: az eljutási idő és a kibocsátás közös optimumát kereső szabályozást. A szimulációk illetve a megvalósítás helytállóságát alapjaiban kérdőjelezi meg a tény, hogy a csak emisszióminimumot célzó szabályozás kisebb károsanyag-kibocsátás megtakarítást eredményezett, mint a kombinált, eljutási időt is figyelembevevő irányítás.

2.3.3 Makroszkopikus forgalom és emisszió modellezés – járműegységre számított kibocsátás

Ezen munkában (*Liping Xia et al.: Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong Island [8]*) szerzők közúti forgalommodellezést végeztek, mely a forgalom lefolyása alapján az emisszió várható megjelenési idejét és helyét határozza meg.

A modellezéshez adatbázisokat használtak, mely több szintű: a legfelső szinten található a hálózati térkép, és a levegőminőségi mérőberendezések adatbázisa, a következő szinten a lehetséges útvonalak, majd a járműtípusok adatbázisa, legalsó szinten pedig a járműosztályokra jellemző emissziófüggvények, az egyes kipufogógázokra.

A forgalom modellezésére makroszkopikus, Lagrange-i megközelítésű modellt használtak, mely a forgalomban résztvevő legkisebb egység, egy jármű mozgását követi. A járműsűrűség a követési távolságokból, a makroszkopikus forgalom nagyság a járműegyedeken mért sebesség alapján számítható: ezzel a mérésekből makroszkopikus adatokat állít elő, melyeket később a szimuláció során a hálózatra bocsát.

A szimulációt megkönnyítő adottság, hogy Hong Kong szigetét három ponton, három kikötői alagúton át lehetséges megközelíteni. Az itt végzett fogalomfelvétel alapján ismert a hálózat határán ki és belépő forgalom nagysága, a hálózaton belül zajló folyamatokról pedig az útvonal-modellezés ad információt. Az útvonalakat a forrás-cél adatokból, illetve egy választott útvonal generálásával végzi. Minden útvonalra három változatot ismer: preferált, leggyorsabb, legrövidebb útvonalú. Ennek eredményeként ismert lesz a forgalom lefolyása hétköznapi és hétvégi forgalom esetén, a nap 24 órájában. Mivel a forgalomfelvétel során a hálózathatárokat átlépő járműosztályokat is regisztrálták, így a forgalom összetétele is modellezhető.

Az így modellezett forgalom kibocsátása makroszkopikus megközelítésű emissziómodell segítségével számítható. A Lagrange-i megközelítésnek köszönhetően a makroszkopikus változókat az egyenként szimulált forgalomelemekből, a járművekből számítja. A kibocsátás modellezéséhez üzemleleg járműre vonatkozó kibocsátási függvényeket használ, mely a széles körben használt Copert emissziós modellt használja, mely egy sebességváltozós emissziófüggvény. Az ismert összetételű és útvonalú forgalom károsanyag kibocsátása így valós időben szimulálható.

A cikk a makroszkopikus forgalmi modell alapján számított forgalom nagysággal alapján számítja az egész forgalomra vonatkozó, de egy járműre számított emissziót. Ezt összehasonlítja a város különböző pontjain elhelyezett légminőségi mérőberendezésekkel szolgáltatott adatokkal, és megállapítja, hogy a makroszkopikus forgalommodellre alapuló közútforgalmi emissziómodellezés megfelelő pontosságú.

3 Emissziós modell felállítása és ellenőrzése

Az emissziós modellekről el kellett dönteni, hogy melyik és milyen formában kerülnek felhasználásra a rendszermodellben. A választást több, eltérő modell összehasonlítása és kiértékelése előzte meg.

Az emisszió-idő függvény abban az esetben határozható meg a legpontosabban, ha mikroszkopikus leírással rendelkezünk a forgalomról, tehát a forgalomban résztvevő járművek pontos sebesség-idő és gyorsulás-idő függvényei rendelkezésre állnak. Ezzel szemben a valóságban a mérések és a beavatkozás makroszkopikus szinten zajlanak: az áramló folyadékhoz hasonló forgalomra jellemző változókat tudjuk mérni, és a beavatkozó jelek is a homogén forgalomra jellemző változóként írhatók le. A cél tehát az volt, hogy mindkét elvárásnak megfelelően a rendszermodell: reprodukálja a mikroszkopikus járműdinamikai függvényeket minden járműre úgy, hogy az károsanyag kibocsátásukat a lehető legpontosabban modellezze; mindehhez makroszkopikus változókat, vagy abból származtatott jellemzőket felhasználva.

Emiatt a modellek összevetéséhez olyan szimulációra van szükség, amellyel egyaránt nyerhető mikroszkopikus és makroszkopikus adatok a vizsgált forgalomról. A makroszkopikus mért értékeket felhasználva mezoszkopikus leírást alkalmazva adtam becslést a forgalom károsanyag kibocsátására. Mivel a vizsgálatához felhasznált emissziófüggvény kétváltozós, kétféle – egy- és kétváltozós mezoszkopikus modellre végeztem el a vizsgálatot.

Ez a fejezet azt vizsgálja, hogy ezen változóknak milyen hatása van az emisszió-idő függvényre. Mivel zárt alakban nem lehet lemodellezni egy autópályán felbukkanó járműmennyiség várható viselkedését sebességkorlátozás esetén, így szimulációt készítettem. A szimuláció segítségével összehasonlíthatóvá válik a kétféle – egy- és kétváltozós – mezoszkopikus emissziófüggvény és megállapítható, hogy a változók száma hogyan befolyásolja a mezoszkopikus modellezett emisszió-idő függvény pontosságát.

3.1 Meglévő emissziós modellek alkalmazása

3.1.1 Köztes forgalmi modell létrehozása

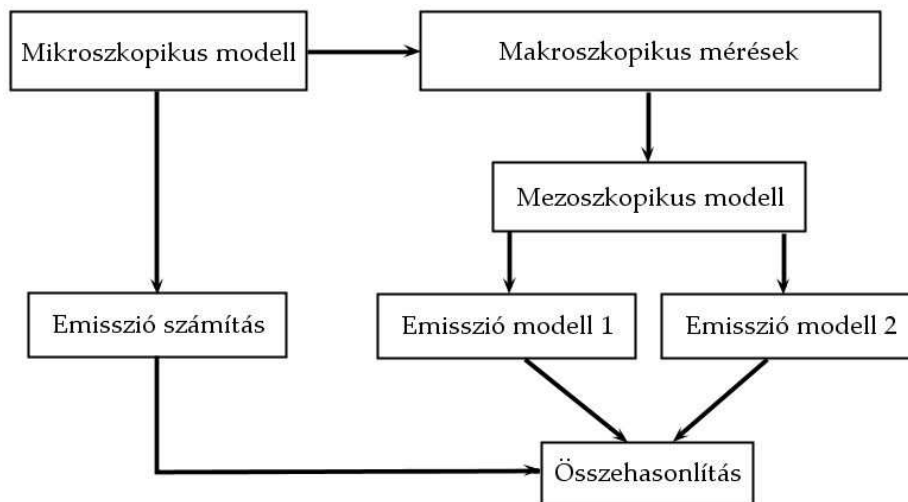
Az összehasonlíthatóság miatt szükséges egy mezoszkopikus forgalmi modell létrehozása. A mezoszkopikus forgalmi modell [11], [18] magában hordozza mind a makroszkopikus, mind a mikroszkopikus megközelítés előnyeit. A makroszkopikus forgalmi változókat használja fel az egyedi járművek mikroszkopikus jellemzéséhez, tehát az $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$ függvényeik felírásához. A görbék meghatározása a diszkrét méréseken alapul: a diszkrét hely-és időtartományban a forgalmon mért átlagos sebességet rendel a járműegyedhez a jármű hely-és időkoordinátájának megfelelően. Így diszkrét lépésekből közelíthető a forgalomban résztvevő valamennyi jármű $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$ függvénye, miközben ezek összegzésével a makroszkopikus forgalom modellel ekvivalens leírást kapunk. Az ezt felhasználó emisszió modell továbbiakban a mezoszkopikus emisszió modell (1. ábra).

A köztes modellre épülő, mezoszkopikus megközelítésű emissziómodellek

- Kétváltozós modell, változók: gyorsulás, sebesség. $E_2 = f(a(t), v(t))$. A fent ismertetett módon az egyes járművek mezoszkopikus $a(t)$, $v(t)$ függvényeit figyelembe véve. A gyorsulás elsősorban pozitív értelmezési tartományán befolyásolja az emissziót. A negatív értelmezési tartományon a motor technológiai fejlettségétől függően hat a károsanyag kibocsátásra. A modellezés során a VT-Micro modell (lásd 2.2.3 fejezet) által használt emissziófüggvényt alkalmazom.

- Egyváltozós modell, változó: sebesség. $E_1 = f(v(t))$.
A fent ismertetett módon az egyes járművek mezoszkopikus $v(t)$ függvényeit figyelembe véve, $a(t)=0$ gyorsulást feltételezve.

A későbbiekben annak megállapítása a cél, hogy az $a(t)$ függvény közelítő ismerete milyen mértékben befolyásolja a mezoszkopikus emissziófüggvény mikroszkopikus emissziófüggvényhez viszonyított pontosságát. Mivel analitikus alakban nem lehet modellezni egy autópályán felbukkanó járműegyedek várható viselkedését sebességkorlátozás esetén, így szimuláció készítése vált szükségessé. A szimuláció segítségével megállapítható a kétféle – egy- és kétváltozós – mezoszkopikus emissziófüggvény és összevethető a valóságosnak tekinthető mikroszkopikus szimulációs adatokkal. Így számszerűsíthető, hogy az egyes változók hogyan befolyásolják a mezoszkopikusan modellezett emisszió-idő függvény pontosságát.



1. ábra Emissziós modellek vizsgálati módszere

A vizsgálat során a VT-Micro modellt alkalmazom a változók hatásainak vizsgálatához, ugyanakkor egy későbbi szabályozáshoz a Copert modell használata indokolt, több okból is. A VT-micro modell exponenciális regresszióval közelített, míg a Copert modell polinomiális regresszióval közelített függvény, melynek linearizálása így egyszerűbb.

Mindazonáltal a két modell által számított értékeket nem hasonlítom össze, mivel nem áll rendelkezésre olyan járműosztály, melynek emisszióját mindkét modell közelíti. Ennek oka az amerikai és európai járműflotta közti különbség.

3.1.2 Ismert modellek felhasználása

Az vizsgálat során a VT-Micro modell két felhasználási módját hasonlítom össze – első esetben mindkét változót felhasználva; második esetben a gyorsulásváltozót elhagyva, így a Copert modellel egyenértékű sebességváltozós modellhez jutva. A vizsgálat alapján beláttam, hogy az egyváltozós modell alkalmazása indokolt.

Ezt követően a szabályozás során a Copert modellt használom, mely európai járművek kibocsátásáról korszerű adatbázissal rendelkezik, és polinomiális közelítésű.

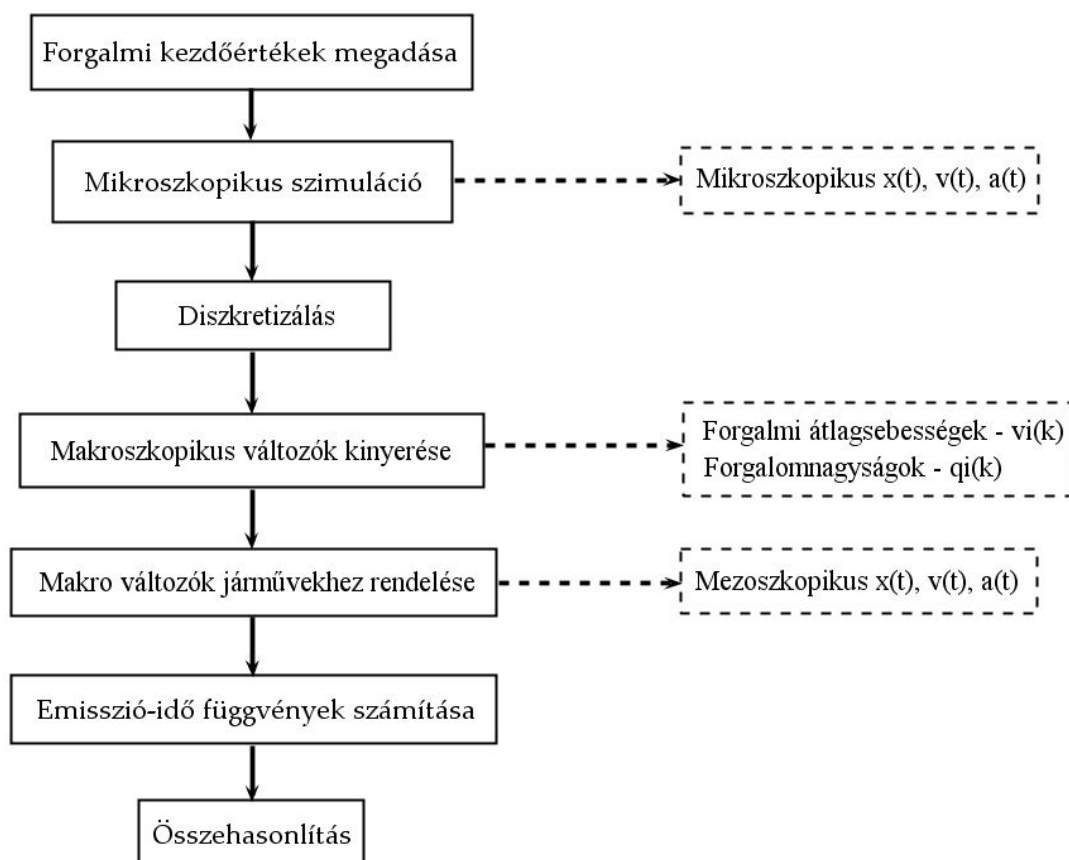
3.2 Szimuláció

A fenti modellek összehasonlításához szükség volt egy járműforgalom szimulátorra. Ehhez készítettem egy programot Matlab környezetben, amelyben a forgalom szimuláció zajlik (2. ábra).

A szimulációban egy előre meghatározott forgalmi szituáció modellezése zajlik. Ennek során egy adott járműmennyiség adott sebességhatárolt szakaszhoz érkezik, ezen a szakaszon áthalad, majd elhagyja azt. A szimulációban részt vevő járművek károsanyag kibocsátásának változása modellezhető, és megállapítható a sebességhatárolt befolyásának hatása. A sebességhatároltáshoz érkező konvoj lassításának, áthaladásnak, és a feloldás utáni gyorsításoknak vizsgálata lehetővé teszi a változók tág értelmezési tartományban való vizsgálatát, valamint az autópálya forgalomszabályozás egyik eszközéről, a főpálya dinamikus sebességhatároltásának a hatásáról is képet kaphatunk. A két forgalomszabályozási módszer közül azért választottam a sebességhatároltást, mert a szabályozás másik eszköze, a felhajtószabályozás nem bír ekkora hatással a teljes áramlat sebességváltozására. Így célszerű a nagyobb hatású beavatkozás esetén számszerűsíteni a modellezésekből adódó különbségeket.

3.2.1 Szimulációs környezet

A szoftver több, önállóan is használható modulból épül fel: először a vizsgált járművek $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$ görbéit számítja és rajzolja meg egymás után. Ezután a makroszkopikus adatok kinyerése következik. Végül az emissziós modellek számítását végzi a makroszkopikus mérések és a valós, mikroszkopikus adatok alapján, melyek összehasonlítása a cél.



2. ábra A szimuláció lépései

A szimuláció minden esetben állandó mennyiségű jármű, adott időtartamon való vizsgálatát jelenti, nem szakaszon áthaladó forgalomét. Ennek oka az, hogy az alapul vett modell mikroszkopikus leírás adja a legpontosabb eredményt, és így hasonlítható vele össze a mezoszkopikus megközelítés.

3.2.2 Algoritmus

1. lépés: kezdőértékek megadása.

A vizsgálandó járműszám és a szimulációs időtartam megadása után, a megadott járműszámból álló forgalom tetszőleges makroszkopikus kezdeti értékekkel felruházható (forgalomnagyság, forgalomsűrűség). Ennek jelentősége a különböző forgalmi szituációk által okozott különböző mértékű emisszióterhelések vizsgálatában rejlik. A betáplált, 0. másodpercben jellemző forgalomnagyság és forgalomsűrűség alapján a konvojra kezdetben jellemző átlagos követési távolság és átlagsebesség ismert. Emellett minden jármű számára véletlenszerű kívánt sebességet generál a program. A járművezető a kívánt sebességre fog törekedni minden olyan esetben, amikor nincs érvényes sebességkorlát, illetve nem kényszerül egy előtte haladó jármű alacsonyabb sebességét követni. Mivel ezek véletlenszerűen generált adatok, a valós forgalomra jellemzően a kívánatos sebességek megfelelő szórással rendelkeznek.

2. lépés: mikroszkopikus szimuláció

A kezdeti értékek megadása után a járművek trajektóriáit, sebesség és gyorsulás görbéit egymás után, az élen haladóval kezdve számítja ki a program: az 1.3.1 pontban ismertetett egyenletekkel.

A szimuláció során az algoritmus időmátrixok elemeit számítja: ezért szükséges a szimulációs időtartam megadása, és ezért nem modellezhető jelen elgondolás szerint végtelen számú jármű, mivel ezen két adat határozza meg a mátrixok dimenzióit.

A szimuláció első szakaszának eredményeként ismert az összes jármű $a(t)$, $v(t)$, $x(t)$ függvénye.

Járműtrajektóriák meghatározása: mikroszkopikus járműkövetési modell

A mikroszkopikus megközelítés a forgalomban résztvevő járműveket egyenként vizsgálja. Az egyes járművek tér-idő, sebesség-idő, gyorsulás-idő függvényét a forgalomban résztvevő járművek közti kölcsönhatások alapján írja le.

A legelterjedtebben használt mikroszkopikus leírás a 'járműkövetési modell' [20],[21]. A modell szerint a járművezető a megválasztott sebességet egyedül a végrehajtott gyorsuláson keresztül képes elérni, így a gyorsulást meghatározva a $v(t)$ és $x(t)$ függvény származtatható. A gyorsulás megválasztásakor a járművezető egy referenciasebességhez (előtte haladó jármű, sebességkorlát, vagy kívánatos sebesség) viszonyítja saját sebességét, és ezek alapján dönt.

A modell megkülönbözteti a járműegyed szabadáramlási módban jellemző viselkedését és a járműkövetési módot. Az előbbi esetben a járművezető egy referencia sebességre törekszik: ez lehet az elérni kívánt haladási sebesség, vagy egy esetleges sebességkorlátozás által felállított referencia érték. Utóbbi esetben a jármű a közvetlenül előtte haladó jármű mozgását követi.

A haladási mód megállapítása a követési idő függvénye:

$$t_i^{köv}(t) = \frac{x_{i-1}(t) - x_i(t)}{v_i(t)} \quad (6)$$

ahol: $x_{i-1}(t)$ az i. jármű előtt haladó helye az idő függvényében [m],
 $x_i(t)$ az i. jármű helye az idő függvényében [m],
 $v_i(t)$ az i. jármű sebességfüggvénye [km/h].

Ha $t_{köv} > 4s$, szabadáramlási módban („free-flow mode”) halad a jármű, $t_{köv} < 4s$ esetén követési módról („follow-the-leader mode”) beszélünk.

Gyorsulás értéke szabadáramlási módban:

$$a_i^{free}(t) = F \cdot (v_{ref}(t - \tau) - v_i(t - \tau)) \quad (7)$$

ahol F : érzékenységi paraméter [-],
 τ : reakcióidő [s].

Gyorsulás értéke járműkövetési módban:

$$a_i^{follow}(t) = \alpha \cdot v_i^\beta(t) \frac{v_{i-1}(t - \tau) - v_i(t - \tau)}{[x_{i-1}(t - \tau) - x_i(t - \tau)]^\gamma} \quad (8)$$

ahol α, β, γ : modellparaméter [-],
 τ : reakcióidő [s],
 $x_{i-1}(t)$ az i. jármű előtt haladó jm. út-idő függvénye [m],
 $x_i(t)$ az i. jármű út-idő függvénye [m],
 $v_{i-1}(t)$ az i. jármű előtt haladó jármű sebesség-idő függvénye [km/h],
 $v_i(t)$ az i. jármű sebesség-idő függvénye [km/h].

A pillanatnyi gyorsulás ((7),(8)) alapján – a kezdősebesség és a kezdőpont ismeretében – meghatározható a jármű sebesség-idő és út-idő függvénye.

$$v_i(t) = v_i(0) + a_i(t) \cdot t \quad (9)$$

$$x_i(t) = x_i(0) + v_i(0) \cdot t + \frac{a_i(t)}{2} \cdot t^2 \quad (10)$$

A lépés eredménye: $i=1..n$ jármű $v_i(t)$, $a_i(t)$, $x_i(t)$ görbéi.

3. lépés: diszkretizálás térben és időben

A járművek által befutott útszakaszon egyenlő távolságokban ($L=500m$) virtuális hurokdetektorokat jelölünk ki, így 500 méteres szakaszokra bontjuk a vizsgált szakaszt. Ezen detektorokhoz meghatározott időközönként jellemző makroszkopikus változók rendelése a cél. A mintavételi időközt (T_{sample}) megválasztva a T_{sim} szimulációs időt T_{sim}/T_{sample} számú azonos hosszúságú időbeli lépésre bontjuk. A Courant-Friedrichs-Lewy feltétel szerint a diszkretizálás során ügyelni kell arra, hogy a vizsgált forgalom hullámsebessége ne lépje túl a diszkretizáció során felbontott egységek által biztosítható maximális követhető sebességet.

Minden i -re:

$$v_{i,max} \leq \frac{L}{T_{sample}} \quad (11)$$

Így, $L=500\text{m}$ méteres térköz mellé $T_{\text{sample}}=10$ másodpercet választottam, így a maximális terjedési sebesség, melyet a diszkretizált rendszer követni képes:

$$\frac{T_{\text{sample}}}{L} = \frac{500}{10} = 50\text{m/s} = 180\text{km/h} \quad (12)$$

(T_{sample} csökkentésével a kontinuum dinamikája jobban követhető, a gyorsulások pontosabban számíthatóak.)

4. lépés: makroszkopikus változók kinyerése

Az első szimulációs lépés eredményeként kapott görbék a valóság olyan részét modellezzik, amelyből makroszkopikus mérések is reprodukálhatók. Mindazonáltal a valóságos mérésektől eltérően nem valós idejű mérésekről van szó, voltaképpen „utólagos leolvasása” történik a szükséges információknak.

A való életben realizált hurokdetektoros mérésekből makroszkopikus változók nyerhetőek: forgalomnagyság, átlagsebesség, forgalomsűrűség. Adott mérési időközök alatt mért értékekből állapítja meg az időközre jellemző forgalomnagyságot, forgalomsűrűséget, valamint a forgalmi átlagsebességet. A forgalomnagyság egy mérési időegység alatt elhaladó járművek számából állapítható meg. Az átlagsebesség az időintervallum alatt elhaladó járművek sebességeinek számtani átlaga (időbeli átlagsebesség) vagy harmonikus átlaga (térbeli átlagsebesség, a fundamentális egyenlet sebességváltozója). Az egyes járművek sebességeit a detektor foglaltsági idejéből lehet megállapítani. Fenti két változó megállapítása után a forgalomsűrűség már számítható.

Ezzel szemben a program nem az időben haladva, valós idejű mérésekkel jut hozzá az egyes hurokdetektorokhoz tartozó mért értékekhez, hanem fordított megközelítéssel: az elhaladt forgalom trajektóriáin haladva a járműnek a hurokdetektor helykoordinátájához tartozó elhaladási idejét keresi, és az elhaladási időhöz tartozó értéket a $v(t)$ görbén. Ebből kifolyólag rendkívül fontos, hogy a szimulációs időegység minél kisebb legyen. 1 másodperces időköz esetén – autópályán jellemző sebességeket figyelembe véve – 30 méter pontossággal, 0,1 másodperces időközzel 3 méteres pontossággal közelíthető a hurokdetektor valós helye, így a szimuláció is ez utóbbi értéket használja.

Makroszkopikus változók

Makroszkopikus mérések: átlagsebesség

Az egyes járművek detektor elhaladási időpontját és az ott jellemző sebességét ismerve, számítható a makroszkopikus forgalmi sebesség az egyes mintavételi időközökben. Az így kiszámított sebesség nem a fundamentális egyenletben szereplő térbeli átlagsebesség, hanem az időbeli átlagsebesség. Míg az előbbi változó a hullám terjedési sebességének jellemzésére használatos, addig az utóbbi változóval közelíthető a forgalmat kitevő járművek utazási átlagsebessége (angolul trip-based average speed). Mivel jelen esetben az így nyert makroszkopikus változókat az egyes járművek $v(t)$, $a(t)$ görbéinek felírásához használjuk, ezért az időbeli átlagsebesség használata indokolt.

Makroszkopikus gyorsulás:

A mezoszkopikus modellezés pontosítása céljából a makroszkopikus gyorsulás számítása célszerű. A fent ismertetett trajektóriák mezoszkopikus megközelítése szakaszonként különböző („piecewise”) elvet követ: a járműveket szükségszerűen felruházza azzal az átlagsebességgel, amelyet a detektor a jármű adott szakaszon való tartózkodása során a szakaszon mér, és feltételezi hogy ezt a szakaszt végig konstans sebességgel teljesíti, majd a következő szakaszba

lépve áttér az ott jellemző forgalmi átlagsebességre. Ugyanakkor ismeretlen marad a sebességváltozás dinamikája. A makroszkopikus gyorsulás felírásával megállapítható, hogy az átlagos forgalomsebesség hogyan változik a diszkrét térbeli és időbeli egységek között.

A makroszkopikus gyorsulás számítása [18]:

$$a_i(k) = \frac{v_i(k+1) - v_i(k)}{T} + v_i(k) \frac{v_i(k) - v_{i-1}(k)}{L_i} \quad (13)$$

ahol: $a_i(k)$: k. lépésben, i szektorra jellemző gyorsulás [m/s^2],
 $v_i(k)$: k. lépésben i szektorra jellemző forgalmi átlagsebesség [m/s],
T: szimulációs időköz [s],
L: szektor hossza [m].

5. lépés: mezoszkopikus változók képzése

A mezoszkopikus reprezentáció céljából minden járműegyedre vonatkozóan meg kell állapítani, mely szakaszon tartózkodik az egyes szimulációs lépésekben. Ezt követően minden az egyes járművekre ismert lesz a diszkrét hely-idő függvénye. A jármű mezoszkopikus, diszkrét sebesség-idő függvényét a forgalmi átlagsebesség diszkrét hely-idő függvényének megfelelő helyettesítési értékének hozzárendelésével kapjuk.

Így a makroszkopikus leírással ekvivalens modellt kaptunk, mivel minden járműre az adott hely-idő inkrementumban jellemző átlagos sebességet rendeljük a járműhöz, nem saját egyéni sebességét tesszük térben és időben diszkrét, konstansfüggvényé.

A mezoszkopikus leírású változók alkalmazása a VT-Micro modellre még így sem lenne teljesen kielégítő, mivel a makroszkopikus változók között nem szerepel a gyorsulás. Mindazonáltal számítható, Luspay Tamás 2009-ben megjelent [18] cikkében található makroszkopikus gyorsulás összefüggését felhasználva az emissziófüggvény mindkét változója ismert.

6. lépés: forgalomra jellemző emisszió-idő függvények számítása

A korábban ismertetett forgalmi modelleket felhasználó emissziómodellek alapján megvalósuló emissziószámítás. A létrehozott függvények:

- Mikroszkopikus ($E_{\text{mik}}(t)$) függvény: a további összehasonlítások alapjául szolgál, a valós idejű összes károsanyag kibocsátást modellelzi.
- Kétváltozós mezoszkopikus ($E_{\text{mez2}}(t)$) függvény: a forgalmi átlagsebesség, továbbá az ott a kontinuumra jellemző számított gyorsulást illesztése egyéni járművekre, a diszkrét hely-idő koordináta alapján.
- Egyváltozós mezoszkopikus ($E_{\text{mez1}}(t)$) függvény: a forgalmi átlagsebesség egyéni járművekre illesztése, a diszkrét hely-idő koordináta alapján.

A lépés eredménye: emisszió-idő görbék minden egyes járműre; teljes forgalom összesített emisszió görbéi: mikroszkopikus, valamint kétféle mezoszkopikus modell szerint. A későbbiekben ezek kerülnek összehasonlításra.

7. lépés: emisszió-idő függvények összehasonlítása, értékelése

A meglévő mikroszkopikus, illetve a két, képzett mezoszkopikus modell által reprezentált $v(t)$, $a(t)$, $x(t)$ függvények összehasonlítása.

Az összehasonlítás három szakaszon zajlik: lassítási, konstans sebességű, és gyorsítási szakaszon. A lassítási időszak az első jármű sebességkorlát miatti lassításának kezdetétől tart a konvojban utolsó jármű lassításának befejezéséig.

Az értékeléshez szükséges a mezoszkopikus modellek relatív hibájának számítása az alábbi egyenlet alapján:

$$h_i^{T_1 T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} E_{mez,i}(t) dt - \int_{T_1}^{T_2} E_{mik}(t) dt}{\int_{T_1}^{T_2} E_{mik}(t) dt} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (14)$$

Ahol: T_1, T_2 : vizsgálati időszak [s],

h_i^j : j. időszak, i. mezoszkopikus modell relatív hibája [-],

E_{mik} : mikroszkopikus $v(t), a(t), x(t)$ -t használó emisszió-idő függvény [g/h],

$E_{mez,i}$: mezoszkopikus $v(t), a(t), x(t)$ -t használó i. típusú emisszió-idő függvény [g/h].

3.3 Az elvégzett szimulációs futtatások

Különböző erősségű forgalmakra jellemző emisszió-idő függvényeik összehasonlítását végeztem különböző forgalmi változójú forgalmak esetén. A négyféle szennyező esetre összesen 20 szimulációt végeztem; 8 esetben alacsony forgalom, 4 esetben közepes forgalom, 2 esetben pedig torlódott forgalom esetén, háromféle sebességkorlátnál (100, 80, 60 km/h). Valamennyi esetben állandó számú (100 db) és összetételű (80% személygépkocsi, 20% tehergépjármű) járműből álló forgalmat vizsgáltam.

Az összehasonlítás három szakaszon zajlott: lassítási, konstans sebességű, és gyorsítási szakaszon. A lassítási időszak az első jármű sebességkorlát miatti lassításának kezdetétől tart a konvojban utolsó jármű lassításának befejezéséig. A konstans sebességű időszak minden jármű a sebességkorlátot betartva halad, míg a gyorsítási időszak akkor kezdődik, mikor az első jármű a sebességkorlátozás feloldását elérve gyorsítani kezd, és mindaddig tart, amíg az utolsó jármű is eléri a referenciasebességet gyorsítása után.

A továbbiakban egy mintaszimulációt mutatok be; a lefuttatott szimulációk eredményeit a mellékletben található táblázatok foglalják össze.

3.4 Szimuláció bemutatása egy valós forgalmi szituáción

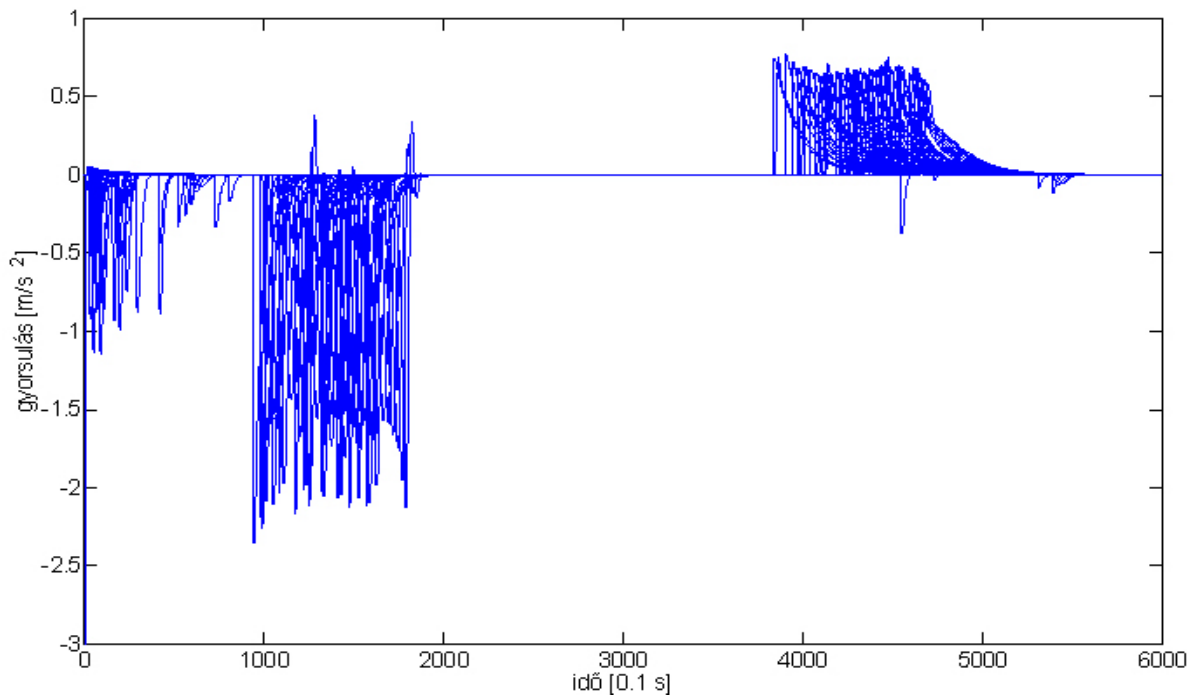
Az algoritmus szemléltetése érdekében tekintsünk egy valós forgalmi szituációt egy autópályán: 50 járművet vizsgáltam 10 percen keresztül. A járművek kezdetben a saját kívánt sebességükkel haladnak, mivel nincs sebességkorlátozás érvényben. Az első jármű az 100. másodpercben elér egy 70 km/h sebességkorlátozású szakaszt, mely 5500 m-rel később oldódik fel. A szimuláció során nem történik előzés. A következő diagramok (3. ábra, 4. ábra, 5. ábra) ezen járműkonvoj út-idő, sebesség-idő, gyorsulás-idő diagramjait ábrázolják.

Szimulációs paraméterek

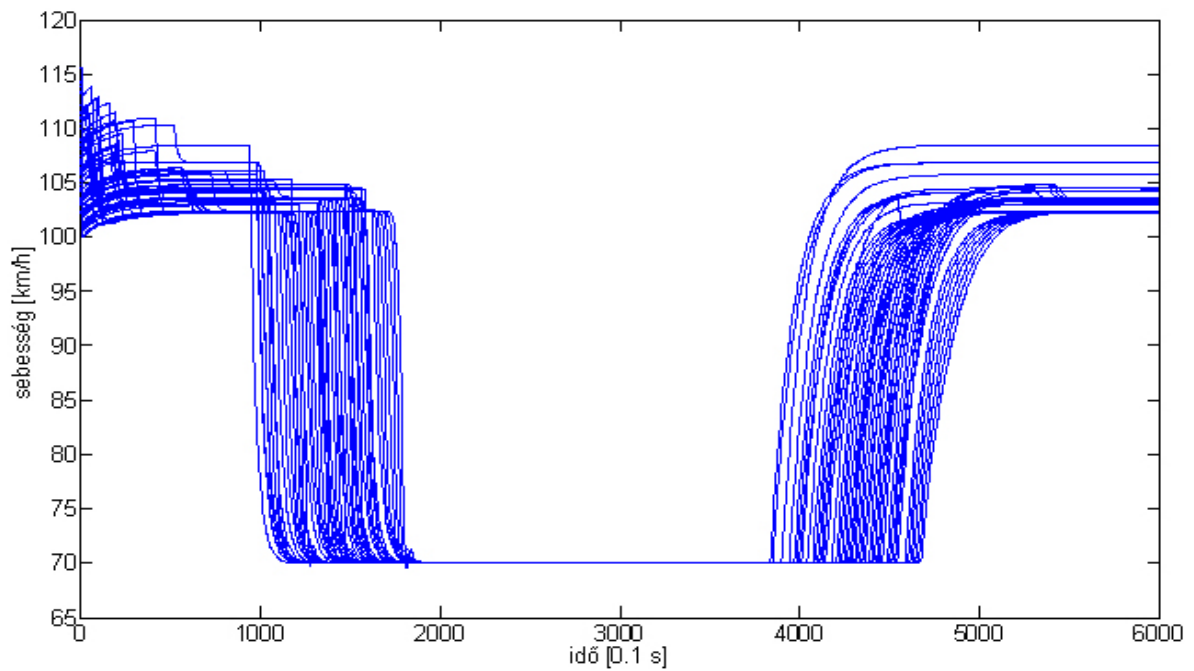
Járműszám: 50 jm

Forgalomnagyság kezdetben: 2200 jm/h

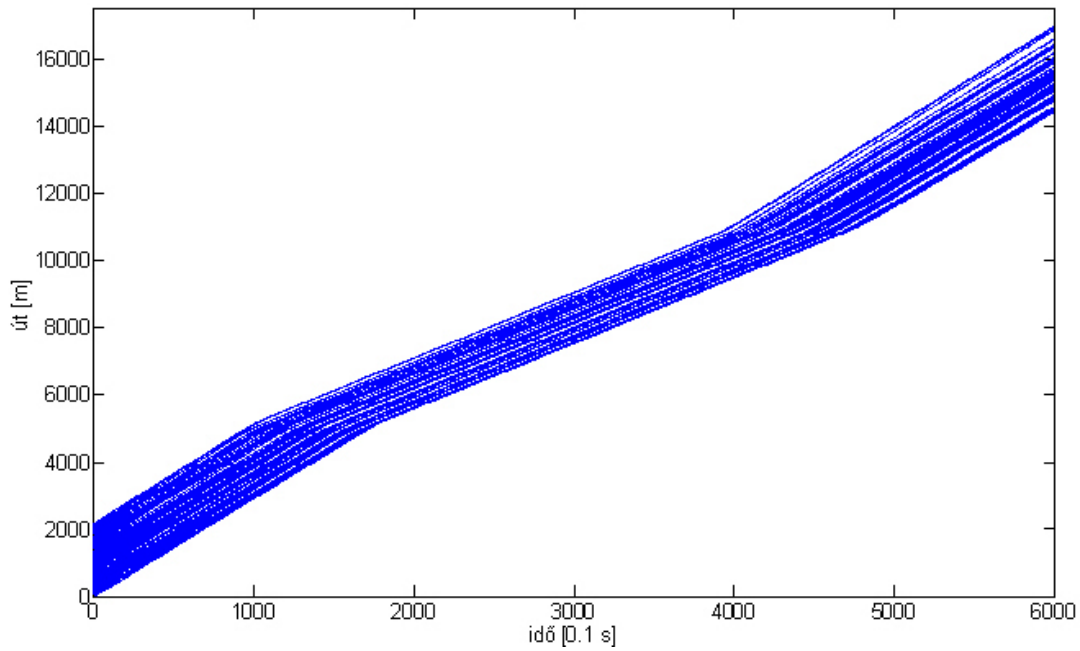
Járműsűrűség kezdetben: 24 j/m/km
Sebességkorlátozási zóna: 3000-8500 m
Szimulációs idő: 600 sec
Sebességkorlát értéke: 70Km/h



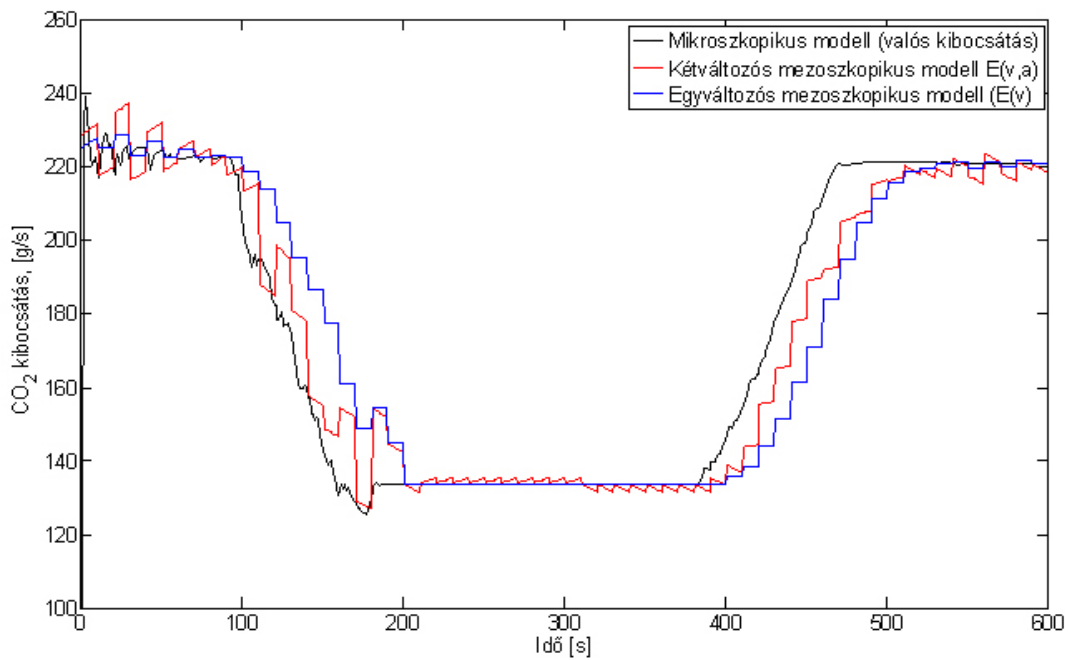
3. ábra Gyorsulás-idő függvény egy szimuláció esetén



4. ábra Sebesség-idő függvény



5. ábra Út-idő függvény



6. ábra Szimuláció eredménye: emisszió-idő függvény. (járműszám: 50; sebességkorlát: 70 km/h).

A 6. ábra a 2. lépésben ismertetett forgalmi szimulációs futtatás eredményét, az emisszió-idő függvényeket mutatja be. A szimulációs időtartam első szakaszában a forgalomban résztvevő járművek a rájuk jellemző „kívánt” sebességekre törekszenek, ez a 100. másodpercig tart. Ekkor éri el az első jármű a sebességkorlátozást, és a konvoj lassítani kezd: lassítási időszak (100-200. mp). Az 6. ábraán látható, hogy ezen időszakban van motorikus károsanyag kibocsátás, noha a járművek mindegyike lassul: ez a VT-Micro modell által modellezett kibocsátásfüggvény sajátossága: a kibocsátásfüggvény negatív gyorsulás esetén is nullától eltérő, pozitív értéket vesz fel. A teljes forgalom a sebességkorlátot betartva halad a 200. másodperctől a 400. másodperig, ez a konstans sebességű időszak. A gyorsítási időszak a sebességkorlá-

tozást feloldó tábla elérésétől az egyéni „kívánt” sebességek elérésig tart, a forgalom ezidő alatt ismét gyorsul (500. mp). A szimuláció utolsó szakaszában ismét konstans sebességgel haladnak a járművek (500-600. mp).

A szimuláció során mért relatív hibák:

Lassítási időszak:

$$h_{\text{mez2}}^{\text{lass}} = -6.85\%$$

$$h_{\text{mez1}}^{\text{lass}} = -17.32\%$$

Gyorsítási időszak:

$$h_{\text{mez2}}^{\text{gyors}} = 8.16\%$$

$$h_{\text{mez1}}^{\text{gyors}} = 13.29\%$$

3.5 Eredmények

A 2. táblázatban a mezoszkopikus modellek mikroszkopikus reprezentáció alapján számított károsanyagkibocsátáshoz mért relatív hibája olvasható, az egyes szennyezők szerint.

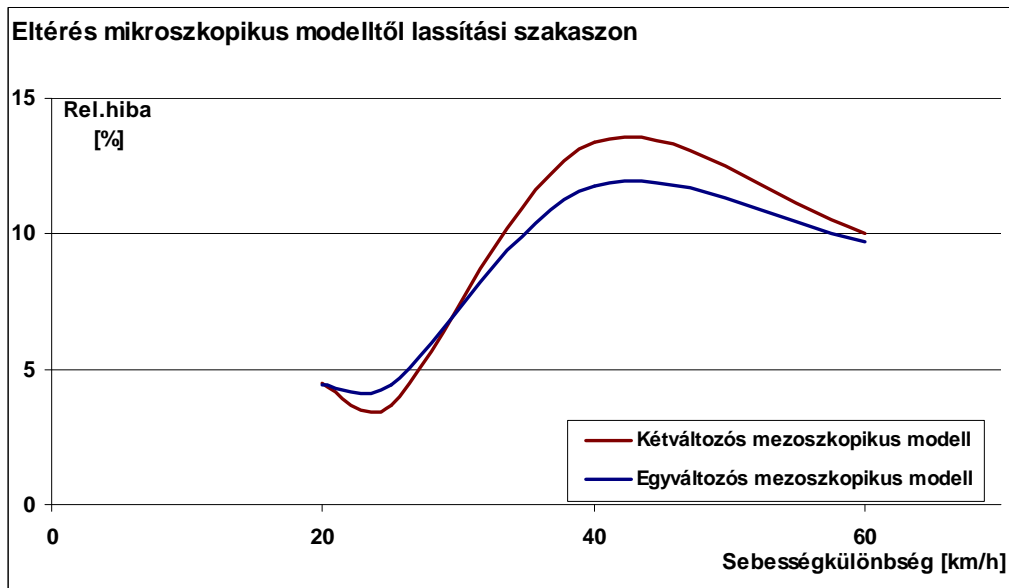
Számítási hibák az egyes szennyezőknél [%]

	Lassítási szakasz		Gyorsítási szakasz	
	Kétváltozós mez.	Egyváltozós mez.	Kétváltozós mez.	Egyváltozós mez.
HC	5,58	5,37	-1,40	-2,77
CO	8,67	7,12	-3,17	-6,09
CO ₂	3,59	4,67	-2,38	-3,44
NO _x	7,78	11,30	-5,89	-7,54

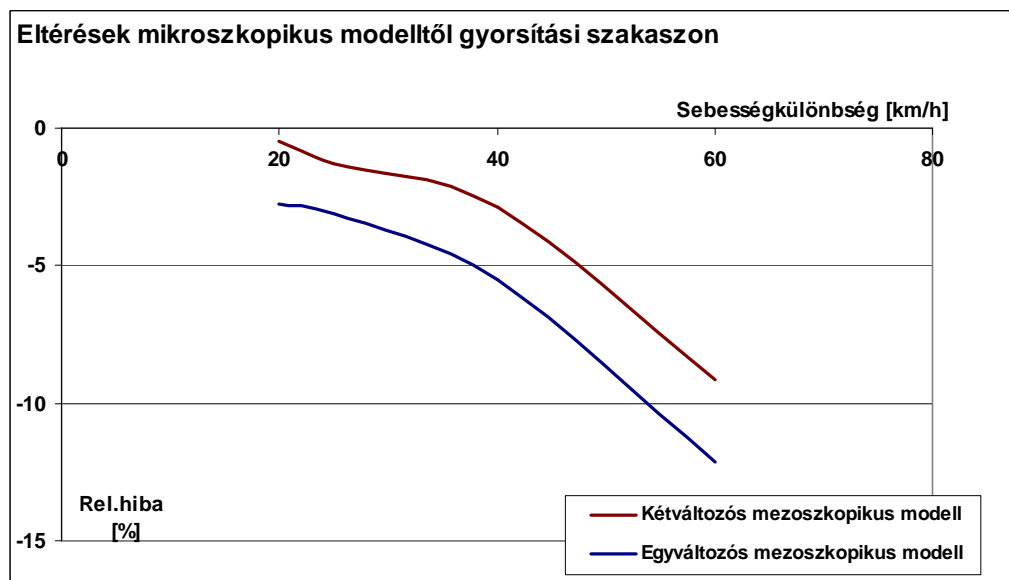
2. táblázat Mezoszkopikus modelltől való eltérések

Látható, hogy a legnagyobb hibát a NO_x kibocsátás számításoknál kapjuk, míg a legkisebbet a HC kibocsátásnál. A CO és CO₂ kibocsátás becslése a többi szennyezőénél pontosabb. Ennek több oka is lehet: az egyes szennyezők gyorsulástól való függése eltér, emellett más nagyságrendben keletkeznek.

A 7. ábra és 8. ábra a modellek a sebességkülönbség (forgalmi átlagsebesség és a sebességkorlátozás különbsége) függvényében ábrázolják a mezoszkopikus modellek által számított emissziófüggvények relatív hibáit, az összes szennyező átlagát véve. (Megjegyzés: a sebességkülönbségek a forgalmi átlagsebesség és sebességkorlátozás között különbségek - a min 60 km/h, maximum 100 km/h dinamikus sebességkorlátozást feltételezve.)



7. ábra Mezoszkopikus modellek relatív hibája - gyorsítási szakasz.



8. ábra Mezoszkopikus modellek relatív hibája - lassítási szakasz.

3.6 Értékelés

A szimulációk során kiderült, hogy a gyorsulással jellemzett szakaszokon mind a másod-, mind az egyváltozós mezozkopikus leírás hibával közelíti a mikroszkopikus modellt. A konstans sebességű szakaszon a modellek között nincs különbség.

A gyorsítási szakaszokon a mezozkopikus modellek jellemzően alulbecsülik a kibocsátás mértékét, míg a lassítási szakaszokon túlbecsülik a valós kibocsátást.

A hiba függ az áramlási sebesség és a sebességkorlát különbségétől: ahogy nő a különbség, úgy nő a számítási hiba. Az egyváltozós modell hibája kis különbségnél kisebb, mint a kétváltozósé, a különbség növelésével azonban nő.

A modellek közti jelentős különbségek a pozitív gyorsulású szakaszokon figyelhetőek meg. A mikroszkopikus modell által számított emisszió-idő függvény időbeli integráljánál mindkét mezoszkopikus modell kisebb volt, ez az egyszerűsített modellek sajátosságaiból adódik. A fő szempont a valósnak tekinthető mikroszkopikus modell által számított értéktől való eltérések.

Látható, hogy a legnagyobb hibát a NO_x kibocsátás számításoknál kapjuk, míg a legkisebbet a HC kibocsátásnál. A CO és CO₂ kibocsátás becslése pontosabb a többi szennyezőnél. Ennek több oka is lehet: az egyes szennyezők gyorsulástól való függése eltér, emellett más nagyságrendben keletkeznek.

Az összehasonlításokból egyértelműen kiderül, hogy az egyváltozós modell ugyan pontatlanabb becslést ad, mint a kétváltozós mezoszkopikus leírást alkalmazó emissziómodell, de ez a különbség soha nem nagyobb 5%-nál.

Ezek alapján az egyváltozós modell megfelelő pontosságúnak tekinthető egy későbbi szabályozási célú modellek megalkotásához.

A kiértékelés során kiderült, hogy a létrehozott mezoszkopikus modellek pontos közelítést adnak az emisszió mértékéről, a különböző gyorsulási fázisokban. Az egyváltozós és kétváltozós modellek között csak maximum 5%-os relatív hiba különbség volt, így az egyváltozós modell használata megfelelő választás lehet egy későbbi szabályozótervezés során.

4 Szabályozás tervezése

A fejezetben egy modell alapú szabályozó tervezését mutatom be, melyet egy 1,5 km hosszú autópálya szakaszon vizsgálók a későbbi szimulációk során. A szabályozási cél az összes eljutási idő (TTS) és összes károsanyag kibocsátás (TE) optimalizálása. A rendszert leíró formalmi modell a másodrendű makroszkopikus modell, az emissziót a Copert modell írja le (mivel ez a változókat illetően kielégítő pontosságú, és az európai járműparkot jobban jellemzi mint a VT Micro), az előző fejezetben ismertetett mezoszkopikus adatokat felhasználva. A számítás egyszerűsítése végett a szabályozótervezést egy szennyezőre (HC) végeztem el, további szennyezők esetén a tervezés hasonlóan történik, a költségfüggvény és a munkapontok módosításával.

Az autópálya forgalom szabályozója a felhajtó-szabályozás (RM – Ramp Metering), melyet a 2. szakaszon található autópálya felhajtó dinamikus szabályozásával valósítottam meg. A felhajtó-szabályozás [30] az Egyesült Államokban és Nyugat-Európa egyes országaiban elterjedten használt modern forgalomirányító stratégia. A szabályozás lényege, hogy az autópálya felhajtósáv mellett elhelyezett forgalomirányító jelzőlámpa határozza meg a főpályára belépő járművek számát, és ez befolyásolja (a [32] egyenlet utolsó tagján keresztül) a sebességmomentumot. Túl magas főpályán mért járműsűrűség (túl alacsony főpálya sebesség) esetén kevesebb járművet enged fel a jelzőlámpa, így javul a főpálya forgalomáramlása, és csökken az eljutási idő. Ez a forgalomirányítási módszer azonban az eljutási idő optimalizálásán kívül más optimum elérését is célozhatja.

A szabályozás során háromféle stratégiát vizsgáltam: a csak eljutási időt minimalizáló (TTS) stratégia mellett az időbeli emissziót minimalizáló (TE) és ezek közös optimumát célzó szabályozót hasonlítottam össze a szabályozás nélküli esettel.

A szabályozó tervezéséhez először a nemlineáris autópálya forgalmi modellt linearizáltam munkapont körül. Az így nyert DLTI rendszerre olyan LQR szabályozót terveztem, mely bemenőjel korlátok betartására alkalmas. Ehhez szükséges volt a módszer átültetése diszkrét rendszerekre. Ezután vizsgáltam a modell robusztusságát, és az állapotok olyan tartományát kerestem, melyben a munkapont körül perturbálva a zárt hurok robusztusan stabil marad. A szabályozó tervezése során ezt a kiindulási tartományt vettem figyelembe.

A továbbiakban először a nyílt hurkú rendszert tekintem át: ismertetem a nemlineáris forgalmi modellt, ennek linearizálását. Ezt követően a zárt hurkú rendszert ismertetem: a diszkrét idejű korlátos LQR szabályzó tervezését, a szabályzó robusztusságának vizsgálatát.

4.1 Makroszkopikus forgalom modell

Egy adott forgalom modellezése során megkülönböztetünk mikro- és makroszkopikus forgalomleíró modelleket. A mikroszkopikus modell ismertetése a 3.2.2 fejezetben olvasható.

A makroszkopikus forgalmi modell az úton felbukkanó forgalmat homogén kontinuumnak tekinti, a kontinuumra jellemző makroszkopikus változókkal írja le a forgalmat.

Egy adott szakaszra jellemző makroszkopikus változók: q_i , v_i , ρ_i .

q_i : forgalomnagyság. Adott keresztmetszeten időegység alatt elhaladó járműmennyiség. [jm/h]

ρ_i : járműsűrűség: adott pillanatban, hosszegység alatt megszámlálható járműmennyiség. [jm/km]

v_i : térbeli átlagsebesség [km/h].

A makroszkopikus modell alapegyenlete az áramlástanban használatos, áramló folyadékok megmaradási egyenletét veszi alapul. A járműsűrűség adott idő alatti változásának és a forgalom nagyság adott térben mért változásának összege egyenlő az adott szakaszon található forrás/nyelő adott időegység alatt mérhető forgalom nagyság kibocsátásával.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = s(x, t) \quad (15)$$

A folytonossági (megmaradási) egyenlet kimondja, hogy két mintavételi idő között egy adott szakaszból kilépő járműmennyiség egyenlő a szakaszba adott idő alatt behaladó járműszám és az ott maradó járműszám különbségével.

A megmaradási egyenlet térben és időben való diszkretizálásával, és numerikus megoldásával az alábbi alakra jutunk:

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{T}{L \cdot \lambda} [q_{be}(k) - q_{ki}(k) + r(k) - s(k)] \quad (16)$$

ahol T : mintavételi időköz [s].

L : szakaszhossz [m].

λ : sávok száma [darab].

r : szakaszra felhajtó járművek forgalom nagysága [jm/h].

s : szakaszból lehajtó járművek forgalom nagysága [jm/h].

A kontinuum modellezése a mozgó folyadékok dinamikájának leírásához hasonló. Eszerint a forgalomra jellemző sebesség a sűrűség függvénye: $v(k) = f(\rho(k))$ alakú.

A sebesség-sűrűség függvényre számos modell létezik:

Greenshields [22]:

$$V(\rho) = v_{free} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{2\rho_{krit}}\right) \quad (17)$$

Papageorgiou [32]:

$$V(\rho) = v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{krit}}\right)^a\right) \quad (18)$$

A fundamentális egyenlet teremt kapcsolatot a három forgalmi változó között:

$$q_i = \rho_i \cdot v_i \quad (19)$$

Megkülönböztetünk elsőrendű és magasabb rendű makroszkopikus modelleket. Az elsőrendű modellek kevés változóval, ugyanakkor pontatlanabban jellemzik a forgalmi folyamatot: az általuk leírt forgalmi változók ki kell elégítsék az egyensúlyi $V(\rho)$ függvénykapcsolatot, míg a valóságban ettől eltérő $v(\rho)$, és ebből kifolyólag $q(v)$ állapotok is előfordulhatnak.

A magasabb rendű modellek megengednek az egyensúlyi sebéségen kívüli értékeket.

A Metanet [32] másodrendű modell sebességmomentum egyenlete:

$$\begin{aligned}
v_i(k+1) &= v_i(k) + \frac{T}{\tau} [V[\rho_i(k)] - v_i(k)] \\
&+ \frac{T}{L} \cdot v_i(k) \cdot [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{T \cdot \eta}{\tau \cdot L} \cdot \frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa} - \frac{\delta \cdot T}{L} \cdot \frac{r_i(k) v_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa}
\end{aligned} \tag{20}$$

ahol: $V[\rho_i(k)]$ az egyensúlyi sebesség-sűrűség összefüggés az i. szakaszon.

$\tau, \eta, \delta, \kappa$: paraméterek

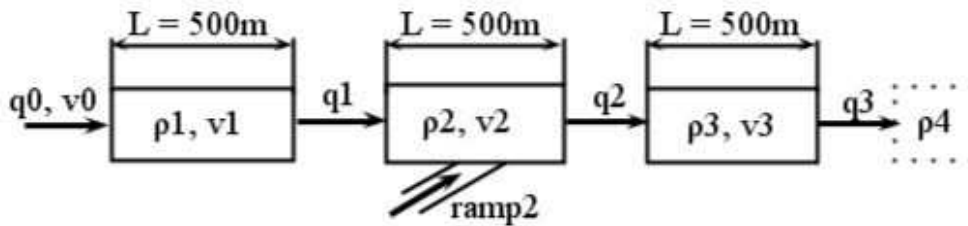
T: mintavételi idő

L: szakasz hossza

Az egyenlet jobb oldalának első tagja az úgynevezett relaxációs tag, mely a forgalomnak az egyensúlyi sebességre való törekvését fejezi ki. A második (konvekciós) tag a megelőző szakaszból továbbított sebességi jellemzőt tartalmazza. A harmadik tag az úgynevezett anticipációs (előrelátási) tag, mely a következő szakaszon jellemző forgalomsűrűség hatását fejezi ki. Az utolsó tag a főpályára felhajtó forgalom lassító hatását számszerűsíti.

4.2 Vizsgált szakasz modellje

A szabályozni kívánt rendszert egy három szegmensből álló autópálya szakasszal modelleztük (9. ábra). Egy szegmens hossza $L=500$ m. A második szakaszon található egy felhajtó, melyet a későbbiekben szabályozni fogunk. A többi szakaszon nincs sem le-, sem felhajtó sáv.



9. ábra A vizsgált autópálya szakasz modellje.

Állapotok meghatározása

A folyamat jellemzéséhez állapotként az egyes szakaszokra jellemző térbeli átlagsebességet és járműsűrűséget használom. A bemenőjel a középső szakaszon lévő felhajtón átengedett forgalom nagyság. A szakaszra ható zavarásnak tekintjük a szakaszra a „0.” szegmensről érkező forgalmat, illetve a szakasz utáni virtuális „4.” szegmens járműsűrűségét.

$$x = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ v_1 \\ \rho_2 \\ v_2 \\ \rho_3 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad u = [r_2] \quad d = \begin{bmatrix} q_0 \\ v_0 \\ \rho_4 \end{bmatrix}$$

ahol x: állapot.

u: bemenő jel.

d: zavaró jel.

A (18,19, 20) egyenletek helyettesítése után belátható, hogy a rendszer nemlineáris függvénye az állapot-, bemenőjel és zavarójel vektornak:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k)) \quad (21)$$

Célunk egy lineáris állapotter alapú leírás:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) + H \cdot d(k) \quad (22)$$

A következő fejezetben a rendszer linearizálását mutatom be.

4.3 Forgalom modell linearizálása

A makroszkopikus forgalmi modell egy nemlineáris, időinvariáns rendszer (NLTI). Ahhoz, hogy egy lineáris, időinvariáns (LTI) rendszerre alkalmazható szabályozást tervezhessünk, linearizálni kell a rendszert leíró egyenleteket, így a makroszkopikus forgalmi modellen munkapont körüli linearizálást végeztem.

A munkapontok körüli linearizálás során a nemlineáris $f(x)$ függvényt Taylor-sorral közelítjük:

$$f(x^* + \Delta) \approx f(x^*) + \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (23)$$

A centrált rendszer a munkapont (x^*) környezetében lineárisnak tekinti a rendszert, és $\Delta(k)$ val jellemzi a dinamikát:

$$\Delta(k) = x(k) - x^*(k) \quad (24)$$

A nemlineáris állapotdinamikai egyenlet:

$$x(k+1) \approx f(x^*) + \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (25)$$

Centrált állapotdinamika:

$$x(k+1) = x^*(k+1) + \Delta(k+1) \quad (26)$$

Állapotdinamika a munkapontban:

$$x^*(k) = f(x^*) \quad (27)$$

(25) és ((26) miatt

$$x^*(k+1) + \Delta(k+1) = f(x^*) + \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (28)$$

(27) miatt

$$\Delta(k+1) = \frac{\partial f(x^*)}{\partial x} \cdot \Delta(k) \quad (29)$$

Tehát a nemlineáris A, B, C, D, H mátrixokból képzett Jacobi mátrixok segítségével írhatjuk fel a lineáris állapotter-reprezentációt:

Tekintsük (31) alapján:

$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot u(k) + H \cdot d(k) = f(x(k), u(k), d(k)) \quad (30)$$

így:

$$A_{lin} = \frac{\partial f}{\partial x_{x^*, u^*, d^*}} \quad B_{lin} = \frac{\partial f}{\partial u_{x^*, u^*, d^*}} \quad H_{lin} = \frac{\partial f}{\partial d_{x^*, u^*, d^*}} \quad (31)$$

Az így kapott reprezentáció állapotdinamikai egyenlete a munkaponttól való eltérést jellemzi (centráltnál dinamika).

4.4 Szabályozók tervezése

A linearizálás eredményeként egy centráltnál rendszerhez jutottunk. Ezen rendszer által leírt állapotok értéke a munkapontoktól való eltérést jellemzi, tehát ha egy adott állapot a rá jellemző munkapontban van, értéke 0, ettől pozitív és negatív irányban is eltérhet. A későbbiekben az lesz a szabályozási cél, hogy az optimum kritériumként megválasztott munkapontokba vigyük a rendszert. Erre a célra a legalkalmasabb szabályzó a lineáris kvadratikusan szabályzó, mely úgy juttatja a rendszert a kijelölt állapotba, hogy közben a rendszer összenergiáját (jelen esetben a munkaponttól való eltérést) minimalizálja. (4.5 fejezet).

Így tehát a szabályozók nem ugyanazon munkapontok körül linearizált rendszerre készültek, hanem magukat a munkapontokat is az optimum elérését szem előtt tartva választottam meg.

Az alábbi szabályozókat terveztem, és hasonlítom össze:

- teljes eljutási időt (TTS) optimalizáló tervezés.
- összes károsanyag kibocsátást (TE) optimalizáló tervezés.
- A fenti kettő közös optimumát célzó (TTS+TE) szabályzó

Így az LQ tervezés során az állapotsúlyok mellett meg kell határozni a munkapontokat a különböző szabályozási stratégiák esetére.

4.4.1 Ismeretlen munkapontok számítása

A munkapontok meghatározásához a nemlineáris állapotdinamikai egyenletek állandósult állapotát használjuk fel, ugyanis ekkor teljesül (34). Nem lehetséges tehát mind a 10 változóra (x, u, d állapot, bemenet és zavarás változók) tetszőleges munkapont körüli linearizálást végrehajtani, ugyanis szükséges kielégíteni az állandósult állapotbeli dinamikát. Mivel 6 állapotdinamikai egyenlet van, és 10 változó, minden egyes linearizálási esetben 4 változóra tudunk munkapontot szabadon megválasztani. Ezt a 4 változót minden szabályozás esetében a szabályozási célt figyelembe véve állapítom meg. (A költségkritériumok – TTS és TE – csak bizo-

nyos állapotokban lesznek minimálisak. Ha a szabályozás során ettől eltérő pontba szeretnénk bevinni a rendszert, nem érjük el az optimumot.)

Emiatt az egyes szabályozási stratégiáknál nem csak a szabályozó, hanem maga a szabályozott rendszer is eltér, a munkapontok, és ebből kifolyólag az A,B,C,D mátrixok miatt. Így a szabályozók közvetlenül nem lesznek összehasonlíthatóak egymással, ugyanakkor a feladat megoldás „teljesítménye” – az optimum elérése – lemérhető a költségkritériumokon keresztül.

A fennmaradó hat munkaponthoz az alábbi egyenletrendszer megoldásával jutottam:
Állandósult állapotok adott i-re:

$$\rho_i(k+1) - \rho_i(k) = 0 \quad (32)$$

és

$$v_i(k+1) - v_i(k) = 0 \quad (33)$$

Így a következő egyenletrendszert oldottam meg:

$$0 = \frac{T}{L} [q_0(k) - q_1(k)] = \frac{T}{L} [q_0(k) - \rho_1(k)v_1(k)] \quad (34)$$

$$0 = \frac{T}{L} [q_1(k) - q_2(k) + r_2(k)] = \frac{T}{L} [\rho_1(k)v_1(k) - \rho_2(k)v_2(k) + r_2(k)] \quad (35)$$

$$0 = \frac{T}{L} [q_2(k) - q_3(k)] = \frac{T}{L} [\rho_2(k)v_2(k) - \rho_3(k)v_3(k)] \quad (36)$$

$$0 = \frac{T}{\tau} [V[\rho_1(k)] - v_1(k)] + \frac{T}{L} \cdot v_1(k) \cdot [v_0(k) - v_1(k)] - \frac{T \cdot \eta}{\tau \cdot L} \cdot \frac{\rho_2(k) - \rho_1(k)}{\rho_1(k) + \kappa} \quad (37)$$

$$0 = \frac{T}{\tau} [V[\rho_2(k)] - v_2(k)] + \frac{T}{L} \cdot v_2(k) \cdot [v_1(k) - v_2(k)] - \frac{T \cdot \eta}{\tau \cdot L} \cdot \frac{\rho_2(k) - \rho_1(k)}{\rho_i(k) + \kappa} - \frac{\delta \cdot T}{L} \cdot \frac{r_2(k)v_2(k)}{\rho_2(k) + \kappa} \quad (38)$$

$$0 = \frac{T}{\tau} [V[\rho_3(k)] - v_3(k)] + \frac{T}{L} \cdot v_3(k) \cdot [v_2(k) - v_3(k)] - \frac{T \cdot \eta}{\tau \cdot L} \cdot \frac{\rho_4(k) - \rho_3(k)}{\rho_3(k) + \kappa} \quad (39)$$

Ahol $V(\rho) = v_{free} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{2\rho_{krit}}\right)$, (Greenshields összefüggés).

Azért választottam a Greenshields összefüggést, mert így a hat ismeretlenes egyenletrendszer megoldását számítógéppel végezhettem. A pontosabb, de exponenciális függvényt tartalmazó Papageorgiou összefüggés alkalmazása esetén az egyenletrendszer megoldásakor a program komplex gyököket eredményezett (mivel a szoftver közelítő megoldást keres, folyamatos iterációval: az exponenciális függvényt pedig sorba fejtéssel közelíti).

4.4.2 A kiválasztott munkapontok

Felhajtó: az r_2 felhajtó munkapontja minden esetben megegyezik. A munkapontot forgalomtechnikai megfontolások alapján választottam meg. Az egy keresztmetszeten fizikailag áthaladni képes maximális járműszám: 1800 j/m/km. Feltételeztem, hogy ennél nagyobb forgalomnagyság nem tud igényként megjelenni a felhajtón. Továbbá feltételeztem, hogy percenként legalább 10 másodperc zöldidő kiadható a felhajtón, tehát $10/60 \cdot 1800 = 300$ jármű/óra

forgalomnagyság minimum. A munkapontot ennek számtani középértékére választottam (1050 jm/h). A későbbiekben (4.6.3. fejezet) látni fogjuk, hogy ennek szabályozótervezési okai is voltak.

TTS optimális szabályzás

A fundamentális összefüggés és az egyensúlyi sebesség összefüggése alapján levezethető, hogy a maximális járműszám akkor bocsátható át egy keresztmetszeten, ha a szegmensben jellemző járműsűrűség éppen a kritikus sűrűséggel egyenlő.

$$V(\rho) = v_{free} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{2\rho_{krit}}\right) \quad (40)$$

$$q = \rho \cdot v = \rho \cdot v_{free} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{2\rho_{krit}}\right) \cdot \rho = v_{free} \cdot \rho - v_{free} \frac{\rho}{2\rho_{krit}} \cdot \rho \quad (41)$$

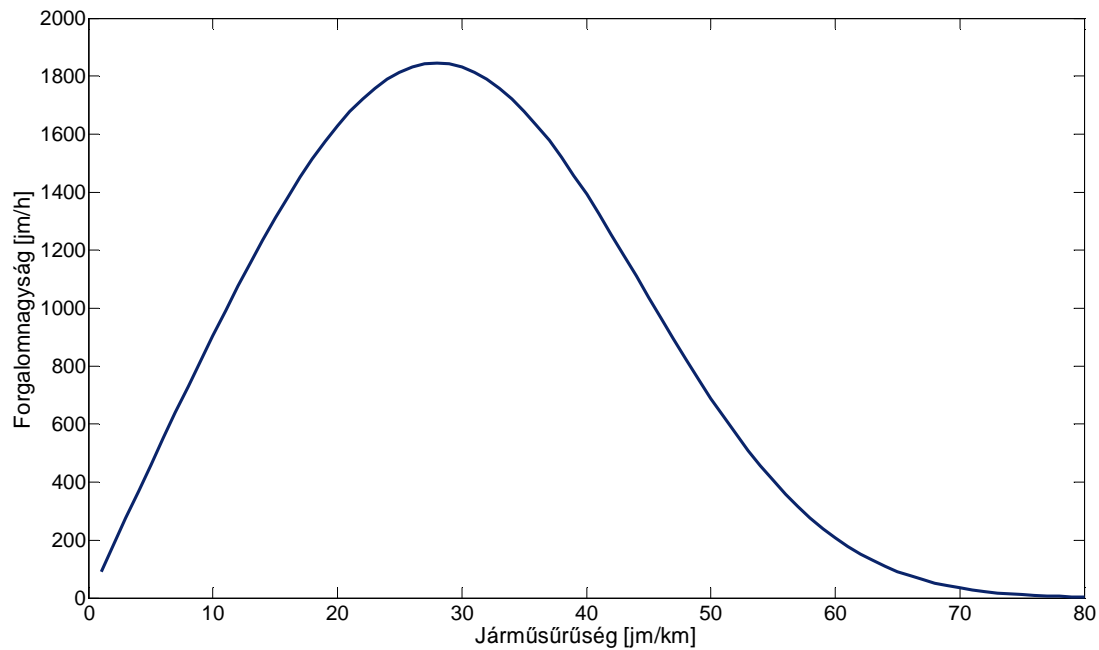
A függvény maximuma ott található, ahol

$$\frac{\partial q}{\partial \rho} = 0 \quad (42)$$

$$\frac{\partial q}{\partial \rho} = \frac{\partial(v_{free} \cdot \rho - v_{free} \frac{\rho}{2\rho_{krit}} \cdot \rho)}{\partial \rho} = v_{free} - v_{free} \frac{\rho}{\rho_{krit}} \quad (43)$$

$$v_{free} - v_{free} \frac{\rho}{\rho_{krit}} = 0 \quad (44)$$

Így látható, hogy $\rho = \rho_{krit}$ esetén maximális a keresztmetszeten áthaladó járművek száma. Ezt szemlélteti a 10. ábra is, mely a $q(\rho)$ diagram.



10. ábra Fundamentális (q(ρ)) diagram

A fenti levezetés eredményeként a választható munkapontokat a ρ_{krit} értékbe célszerű helyezni.

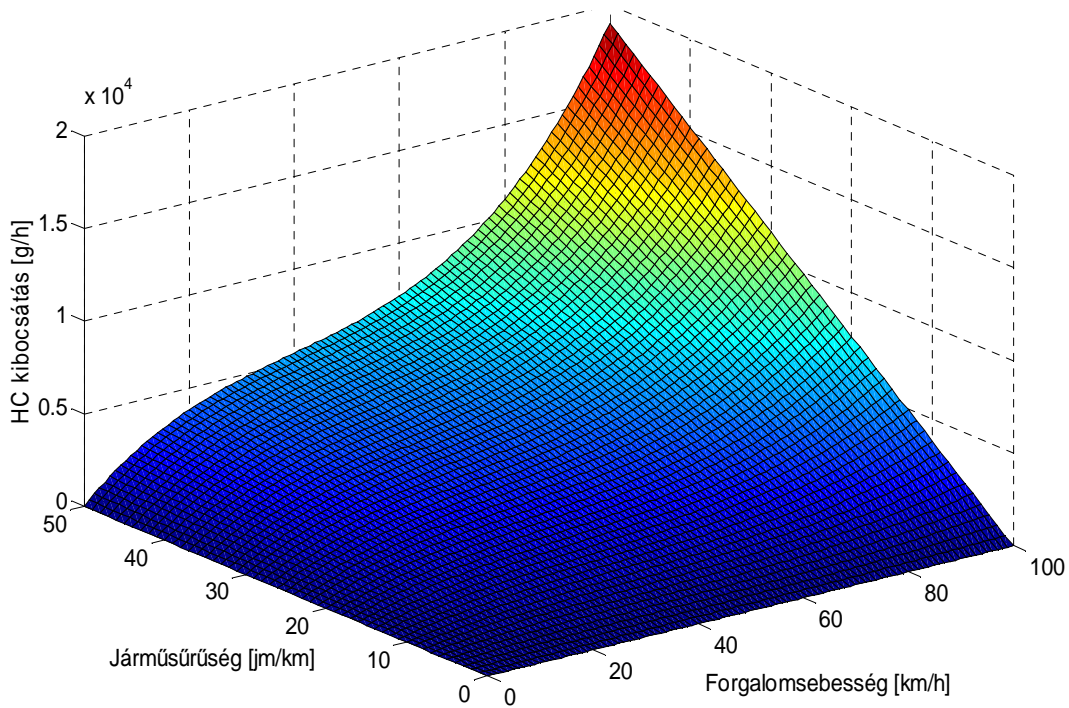
TE optimális szabályzás

A munkapontok meghatározásához szükséges a kétféle emissziófüggvény definiálása:

Időfajlagos emisszió-idő függvény: adott járműmennyiség által egységnyi időtartam alatt kibocsátott károsanyag mennyisége. $E_{time}=[g/h]$ (11. ábra)

Számítása:

$$E_{time,i} = q_i \cdot v_i (\alpha_2 \cdot v^2 - \alpha_1 \cdot v + \alpha_0) = v_i^2 \cdot \rho_i (\alpha_2 \cdot v_i^2 - \alpha_1 \cdot v_i + \alpha_0) = [jm \cdot g/h] \quad (45)$$

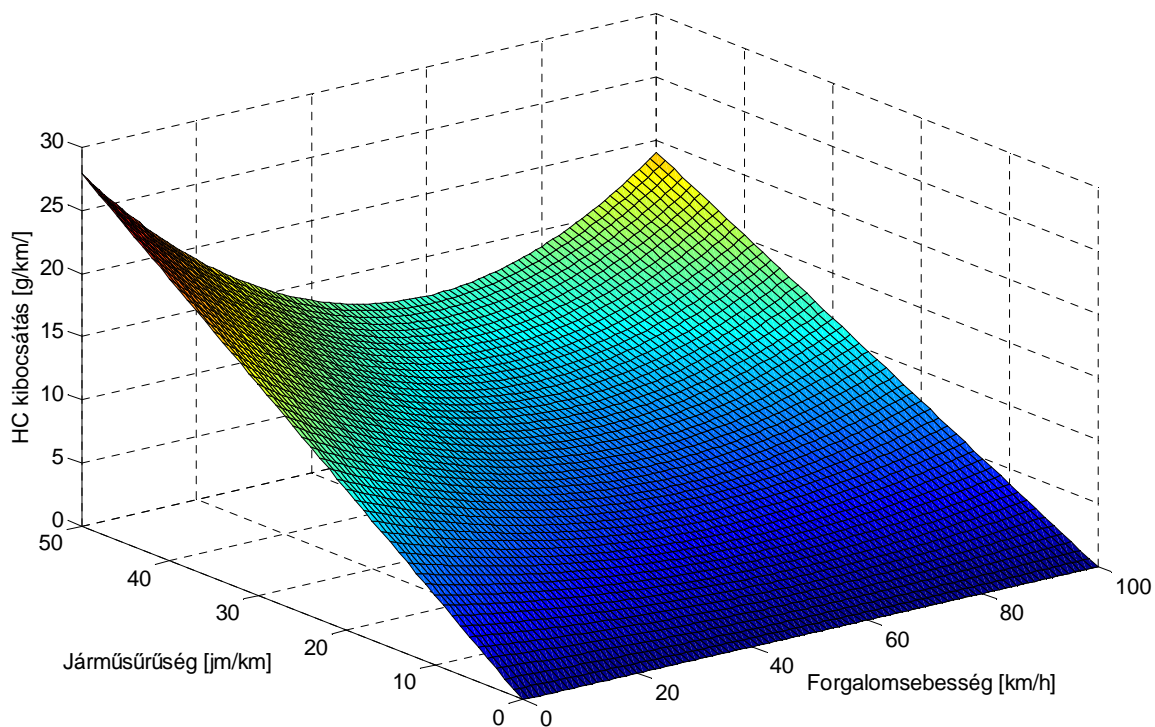


11. ábra Időfajlagos emisszió-idő függvény

Távolságfajlagos emisszió-idő függvény: adott járműmennyiség által egységnyi szakaszon kibocsátott károsanyag mennyisége. $E_{trip}=[g/km]$ (12. ábra)

Számítása:

$$E_{trip,i} = q_i \cdot (\alpha_2 \cdot v_i^2 - \alpha_1 \cdot v_i + \alpha_0) = v_i \cdot \rho_i (\alpha_2 \cdot v_i^2 - \alpha_1 \cdot v_i + \alpha_0) = [jm \cdot g/km] \quad (46)$$



12. ábra Távolságfajlagos emisszió-idő függvény

Összefüggés az emissziófüggvények között:

$$E_{time} = E_{trip} \cdot v_{trip} \quad (47)$$

ahol

$$v_{trip} = \frac{\int_0^T v(t) dt}{T} \quad (48)$$

v_{trip} -et a forgalmi átlagsebességgel közelítjük.

A munkapont meghatározásához a távolságfajlagos kibocsátást használtam fel. Időfajlagos kibocsátást tekintve az optimum a $v=0$, $\rho=0$ pontban található, ez azonban nem értelmezhető cél. A távolságfajlagos emissziófüggvényt tekintve azonban a sebesség függvényében található olyan minimum, mely forgalomtechnikailag megvalósítható és LQ szabályozás során a rendszer energiaminimumaként tekinthető. A járműsűrűségnek lineáris függvénye a távolságfajlagos kibocsátás, így csak $f(v)$ t vizsgálom.

TTS és TE optimumot célzó szabályzás

A közös optimumot célzó szabályozásnál ugyan célszerű lenne egyszerre kijelölni TTS és TE ideális munkapontokat (ρ és v értékeket), ez azonban nem lehetséges, mert csak négy olyan munkapontot jelölhetünk ki, amelyek alapján a többi, számított munkapont forgalomtechnikai szempontból értelmezhető.

Így kiválasztottam az utolsó szegmens sűrűségét (ρ_3) és az utolsó kettő szakasz átlagsebességét (v_2 , v_3). Ezzel lehetséges elérni, hogy a kimenő forgalom a kritikus sűrűség közelében legyen (maximális kimeneti forgalomnagyság), és az autópálya szakasz nagy részén a kibocsátás minimumára törekedjen a szabályzás.

Összefoglalva, az egyes szabályozások tervezése során megválasztott munkapontok:

Szabályozatlan	TTS optimális	TE optimális	TTS és TE optimális
$r_2 = 1050 \text{ jm/h}$	$r_2 = 1050 \text{ jm/h}$	$r_2 = 1050 \text{ jm/h}$	$r_2 = 1050 \text{ jm/h}$
$\rho_2 = 28 \text{ jm/km}$	$\rho_2 = 28 \text{ jm/km}$	$v_1 = 61 \text{ km/h}$	$v_2 = 61 \text{ km/h}$
$\rho_3 = 28 \text{ jm/km}$	$\rho_3 = 28 \text{ jm/km}$	$v_2 = 61 \text{ km/h}$	$v_3 = 61 \text{ km/h}$
$\rho_4 = 28 \text{ jm/km}$	$\rho_4 = 28 \text{ jm/km}$	$v_3 = 61 \text{ km/h}$	$\rho_3 = 28 \text{ jm/km}$

A (34)-(39) egyenletek megoldásával számított munkapontok:

Szabályozatlan	TTS optimális	TE optimális	TTS és TE optimális
$q_0 = 723 \text{ jm/h}$	$q_0 = 723 \text{ jm/h}$	$q_0 = 876 \text{ jm/h}$	$q_0 = 658 \text{ jm/h}$
$v_0 = 74,3 \text{ km/h}$	$v_0 = 74,3 \text{ km/h}$	$v_0 = 62,65 \text{ km/h}$	$v_0 = 66,9 \text{ km/h}$
$\rho_1 = 11 \text{ jm/km}$	$\rho_1 = 11 \text{ jm/km}$	$\rho_1 = 14,4 \text{ jm/km}$	$v_1 = 64,5 \text{ km/h}$
$v_1 = 68,8 \text{ km/h}$	$v_1 = 68,8 \text{ km/h}$	$\rho_2 = 28 \text{ jm/km}$	$\rho_1 = 10,2 \text{ jm/km}$
$v_2 = 63,3 \text{ km/h}$	$v_2 = 63,3 \text{ km/h}$	$\rho_3 = 28 \text{ jm/km}$	$\rho_2 = 28 \text{ jm/km}$
$v_3 = 63,3 \text{ km/h}$	$v_3 = 63,3 \text{ km/h}$	$\rho_4 = 28 \text{ jm/km}$	$\rho_4 = 29,9 \text{ jm/km}$

4.5 LQ szabályozás

4.5.1 Diszkrét idejű LQ szabályozó

Az optimális irányítási feladatok egyik legismertebb formája a lineáris kvadratikus értelemben optimális irányítás.

Az LQ szabályzás az

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (49)$$

$$y(k) = C \cdot x(k) \quad (50)$$

állapotegyenletek által leírt rendszer irányításához az alábbi kvadratikus funkcionált definálja:

$$J(y, u) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} y^T Q y + u^T R u \quad (51)$$

ahol Q és R pozitív definit tervezési paraméterek, C = I egységmátrix: azaz a kimenetek maguk a forgalmi állapotok.

A funkcionálban szereplő $y^T Q y$ tag a kívánt állapottól (jelen esetben munkaponttól) való eltérést, az $u^T R u$ tag az irányításhoz felhasznált energiát bünteti.

Az LQR probléma a következőképp írható le: tervezzük meg azt az $u(k)$ irányítást, mely minimalizálja a $J(y, u)$ funkcionált az állapotegyenlet, mint explicit feltétel figyelembe vétele mellett.

Az optimális visszacsatolást az ún. Riccati egyenlet megoldásával kapjuk. Diszkrét esetben a Control Algebrai Riccati Egyenlet (Dare) a következő:

$$P = A^T P A - (A^T P B)(R + B^T P B)^{-1} (B^T P A) + Q \quad (52)$$

Az egyenlet pozitív definit megoldása P ismeretében számítható az optimális állapotvisszacsatolás:

$$K = (R + B^T P B)^{-1} (B^T P A) \quad (53)$$

4.5.2 Költségfüggvények, állapot súlyozás

TTS költségfüggvénye: Járműfajlagos teljes eljutási idő

i. szakaszon, a fősávban töltött idő:

$$\begin{aligned} TTS_i &= N_i(k) \cdot T_i(k) \cdot \frac{1}{q_i(k)} = T_s \cdot (q_{be}(k) - q_{ki}(k)) \cdot \frac{L_t}{v_i} \cdot \frac{1}{q_i(k)} = \\ &= T_s \cdot (q_{i-1}(k) + r_i(k) - q_i(k)) \cdot \frac{L_t}{v_i} \cdot \frac{1}{\rho_i(k) \cdot v_i(k)} \\ &= T_s \cdot (\rho_{i-1}(k) \cdot v_{i-1}(k) + r_i(k) - \rho_i(k) \cdot v_i(k)) \cdot \frac{L_t}{v_i} \cdot \frac{1}{\rho_i(k) \cdot v_i(k)} \end{aligned} \quad (54)$$

Felhajtón várakozó járművek:

$$TTS_{ramp} = N_{ramp}(k) \cdot T_s = (r_i(k) - r_{controlled}(k)) \cdot T_s \cdot T_s \cdot \frac{1}{v_i(k) \cdot \rho_i(k)} \quad (55)$$

$$TTS = \sum_{i=1}^3 TTS_i + TTS_{ramp} = [s] \quad (56)$$

ahol T_i : i. szegmens teljesítésének ideje
 N_i : i. szegmensben k. lépésben tartózkodó járművek száma
 N_{ramp} : felhajtón tartózkodó (ottmaradt) járművek száma
 i : szegmens sorszáma.

Emisszió költségfüggvénye: egy járműre jutó távolságfajlagos emissziófüggvény

$$TE_i = \alpha_2 \cdot v^2 - \alpha_1 \cdot v + \alpha_0 = [g/km] \quad (57)$$

A kiválasztott szennyező, melyre az optimalizálást végeztem: HC (elégtelen szénhidrogének).

$$TE_i^{HC} = 0,089261 \cdot v_i^2 - 10,7 \cdot v_i + 558.6 = [g/km] \quad (58)$$

Állapotsúlyok

Az állapotsúlyokat a költségfüggvények alapján számítottam. Ez úgy lehetséges, hogy a költségfüggvényt tekintetem a tág értelemben vett rendszer kimenetének, y' jelöléssel (a forgalmi állapotváltozókat jelölő y helyett). Ebben az esetben a mérési egyenlet is nemlineáris lett:

$$y' = \begin{bmatrix} TTS_1 \\ TE_1 \\ TTS_2 \\ TE_2 \\ TTS_3 \\ TE_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2) \\ g_2(x_1, x_2) \\ g_1(x_3, x_4) \\ g_2(x_3, x_4) \\ g_1(x_5, x_6) \\ g_2(x_5, x_6) \end{bmatrix} \quad (59)$$

ahol

$$\begin{aligned} g_1 &= TTS \quad (55) \\ g_1 &= TE \quad (56) \end{aligned} \quad (60)$$

A linearizálást (48)-ra elvégezve kaphatjuk a lineáris mérési egyenletet (50):

$$(y = C \cdot x)$$

Így a költségfüggvénybe helyettesítve:

$$y^T Q y = x^T C^T Q' C x \quad (61)$$

Legyen (51) egyenletben $Q' = I$, azaz hatdimenziós egységmátrix. Ekkor írható:

$$y^T Q y = x^T C^T C x, \text{ azaz} \quad (62)$$

$$Q = C^T C \quad (63)$$

Így felírhatóak az állapotsúlyok a linearizált rendszerre. Az egyes szabályozók tervezése az állapotsúlyok megválasztásában is különbözik: az eljutási idő optimális szabályzásnál $y' = [TTS_1 \ 0 \ TTS_2 \ 0 \ TTS_3 \ 0]^T$ alakú, kibocsátás optimális tervezéskor $y' = [0 \ TE_1 \ 0 \ TE_2 \ 0 \ TE_3]^T$ alakú, míg többkritériumú tervezés esetén $y' = [TTS_1 \ TE_1 \ TTS_2 \ TE_2 \ TTS_3 \ TE_3]^T$ alakú. Eszerint számíthatóak Q súlyozások is.

4.5.3 Zavarások kezelése

A rendszer állapotdinamikai egyenletben található zavarást nagyságrendje miatt szükséges figyelembe venni az optimális állapotvisszacsatolás tervezése során.

Tegyük fel, hogy a zavarás (q_0, v_0, ρ_4) mért és ezáltal ismert. A mérést ξ mérési zaj terheli:

$$d(k+1) = d(k) + \xi(k) \quad (64)$$

Tekintsük a mért $d(k)$ zavarást társállapotváltozónak. Az így módosított állapotdinamikai egyenlet:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & H \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(k) = A' \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + B' u(k) \quad (65)$$

Az LQ szabályzó tervezésének feltétele, hogy a rendszer irányítható legyen. A Kálmán-féle rangfeltétel értelmében egy rendszer akkor irányítható, ha az irányíthatósági mátrix ($\zeta = [B', A'B, A'2B', \dots, A'^{n-1}B]$) rangszáma megegyezik a rendszer dimenziójával (n).

Mivel jelen esetben A' mátrix rangja 6, így könnyen belátható, hogy ζ rangja is 6 lesz, ami kisebb a kibővített rendszer dimenziójánál (9), így a rendszer nem irányítható.

Nem irányítható rendszerek esetén a stabilizálhatóságot vizsgáljuk. Állapotvisszacsatolás, így LQR szabályzó tervezhetőségének szükséges feltétele a stabilizálhatóság. Egy rendszer stabilizálható, ha a nem irányítható állapotokhoz stabil pólusok tartoznak.

A nem irányítható állapotok a zavarások ($d(k)$), a hozzájuk tartozó pólusok – A' mátrix ezen része (I egységmátrix) diagonális – a sajátértékek értéke pedig éppen 1.

Egy DLTI rendszer aszimptotikusan stabil akkor és csak akkor, ha pólusai a komplex sík egységkörén belül helyezkednek el. (A pólusokba mutató vektorok abszolútértéke < 1). Válasszuk tehát I mátrix helyett az azt közelítő $0,95 * I$ mátrixot. Ekkor teljesül az aszimptotikus stabilitás feltétele, és a stabilizálhatóság is. Így már tervezhető szabályzó a kibővített rendszerre.

Az LQ szabályzó tervezését így a kibővített állapotdinamikai egyenlet alapján végeztem.

Megjegyzés: az általánosan használt LQ szabályzás nem használható pozitív rendszerek esetén: nem tartja be a bemeneti jelre vonatkozó korlátokat, bizonyos esetekben az engedélyezhető felhajtó járművek zöldidejére negatív értéket ad. (Pozitív rendszer: olyan rendszer, melynek állapotai, bemenetei és kimenetei csak pozitív értéket vehetnek fel.)

Ezen probléma kezelésére két megközelítés lehetséges: a negatív értékek maszkolása, illetve olyan szabályozás tervezése, mely betartja az input korlátokat. Munkám során a második megközelítést választottam. Egy ilyen szabályozó a LQR egy kiterjesztése, az ún. PLC (Piecewise Linear Control – Szakaszonként Lineáris Szabályozás).

4.6 Szakaszonként lineáris szabályzó: kiterjesztett LQ szabályozás a bemenőjel korlátok betartására

LQ tervezés során a bemeneti jelre vonatkozó korlátok betartása a bemenő energia és a rendszer összenergiájának súlyozásával lehetséges, ez azonban nemkívánatos tulajdonságokhoz vezet. Nagy súlyozás (drága energia) esetén betartható a bemeneti korlátozás, viszont a rendszer performanciája jelentősen romlik. Kis súlyozás (olcsó energia) esetén megfelelő minőségi tulajdonságok érhetőek el, ugyanakkor a korlátot betartó állapotok halmaza erősen csökken. Megfelelő bemenet súlyozással kompromisszum érhető el a korlátozások betartása és a minőségi tulajdonságok között, így a Plc probléma a korlátozott bemenet megfelelő súlyozásának számításaként fogalmazható meg.

Aszimptotikusan stabil, autonóm rendszerek esetében a korlátozások betartása teljesíthető, ha a szabályozás során ún. invariáns halmazon belül marad a rendszer. Ekkor a bemenőjel súlyozását az invariáns halmaz paramétereinek alapján határozhatjuk meg.

Invariáns halmaz n dimenziós rendszerre: \mathbb{R}^n nemüres \mathcal{E} részhalmaza invariáns halmaz, ha tetszőleges $x(t_0)$ kezdőállapotra minden $t > t_0$ -ra $x(t) \in \mathcal{E}$.

Ezen halmazt n dimenziós rendszer esetén egy ellipszoid foglalja magába az \mathbb{R}^n térben, melyet a pozitív definit, szimmetrikus P mátrix és a pozitív skalár ρ jellemez.

Az invariáns halmaz egyenlete (Kalman, Bertram):

$$\mathcal{E}(P, \rho) = \{x : x^T P x \leq \rho\} \quad (66)$$

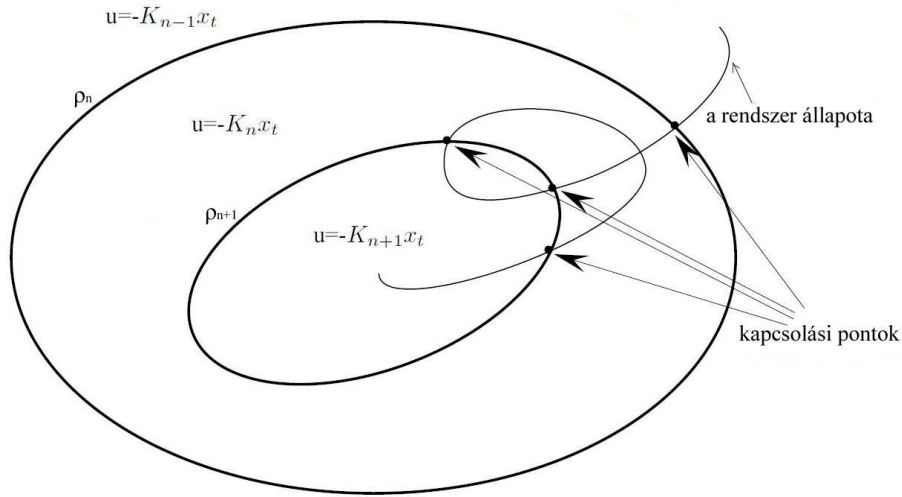
melyben az ellipszoid egyenlete:

$$x^T P x = \rho \quad (67)$$

Az invariáns halmaz fogalma a rendszer összenergiájának leírásán keresztül is megközelíthető. ρ tekinthető a rendszer Ljapunov függvénye által határolt energiaszintnek.

Az így meghatározott invariáns halmaz szerepe kettős. Egyrészt azon kezdőállapotokat tartalmazza, amelyekből kiindulva a szabályozás betartja a korlátozásokat; másrészt biztosítja, hogy a halmazban lévő állapotokra a rendszer stabil. (Mivel a rendszer aszimptotikusan stabil, elegendő a lehetséges kezdeti állapotokat definiálni.)

A fenti rendszerleírást illusztrálja a 13. ábra.



13. ábra Invariáns halmazok, és a Plc szabályzás kétdimenziós rendszer esetén

4.6.1 A korlátozásokat betartó szabályozás vizsgálata

Legyen x_i^* azon állapot, melynek visszacsatolásával a legnagyobb bemeneti érték norma érhető el az i . számú bemenetre:

$$x_i^* : k_i x_i^* = \max k_i x_i \quad (68)$$

A bemenőjel korlátot a maximális állapotvisszacsatolás nem érheti el:

$$\bar{u}_i \geq k_i x_i^* \quad (69)$$

A diszkrét control algebrai Riccati egyenlet:

$$P = A^T P A - (A^T P B) \cdot (R + B^T P B)^{-1} \cdot (B^T P A) + Q \quad (70)$$

Az így nyert visszacsatolás:

$$K = (B^T P B + R)^{-1} \cdot B^T P A \quad (71)$$

Tekintsük $K = [k_i^T]$ alakban, ahol „ i ” a bemenetek száma. Így az optimális bemenet:

$$u_i = -k_i x \quad (72)$$

A halmaz határán lévő állapotok (67)-ből:

$$x^{*T} P x^* = \rho \quad (73)$$

Mivel a rendszer pozitív, a gyökvonást elvégezve kifejezhető:

$$P^{1/2} x^* = \rho^{1/2} \quad (74)$$

$$x^* = \rho^{1/2} (P^{1/2})^{-1} \quad (75)$$

A maximális állapotvisszacsatolás:

$$k_i x_i^* = \rho^{1/2} (P^{-1})^{1/2} k_i \quad (76)$$

$$k_i x_i^* = \rho^{1/2} (k_i P^{-1} k_i^T)^{1/2} \quad (77)$$

Így beláttam, hogy „ k_i ” visszacsatolás számítható ρ és P alapján.

4.6.2 A „ k_i ” állapotvisszacsatolás levezetése diszkrét idejű Plc esetén

A szakirodalmat áttekintve a PLC szabályzást csak folytonos rendszerekre használták, elsősorban olyan mozgó szerkezetű berendezéseknél, ahol a bemeneten alkalmazott erő értékét a mozgó alkatrészek szilárdsága korlátozta. Ezen berendezések folytonos idejű rendszerként írhatóak le, ellentétben egy közlekedési folyamatot leíró rendszerrel.

A PLC szabályzás állapotvisszacsatolásának erősítését vezetem le diszkrét esetre a továbbiakban:

Tekintsük (71) egyenletet. R bemenőjel súlyozást felbontva:

$$R = \text{diag} (\epsilon_i) \quad (78)$$

A diszkrét CARE gyök „ P ” alapján (70):

$$k_i = (b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1} \cdot b_i^T P a_i \quad (79)$$

Visszahelyettesítve (77)-be:

$$k_i x_i^* = \rho^{1/2} \left[(b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1} b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot ((b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1} \cdot b_i^T P a_i)^T \right]^{1/2} \quad (80)$$

$$k_i x_i^* = \rho^{1/2} \left[(b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1} b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot a_i^T P^T b_i ((b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1})^T \right]^{1/2} \quad (81)$$

Mivel a bemenőjelek száma $i=1$:

$$(b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1} = ((b_i^T P b_i + \epsilon_i)^{-1})^T = \frac{1}{b_i^T P b_i + \epsilon_i} \quad (82)$$

További rendezéssel:

$$k_i x_i^* = \rho^{1/2} \left[\frac{1}{b_i^T P b_i + \epsilon_i} b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot a_i^T P^T b_i \frac{1}{b_i^T P b_i + \epsilon_i} \right]^{1/2} \quad (83)$$

$$\left(\frac{k_i x_i^*}{\rho^{1/2}} \right)^2 = \frac{1}{b_i^T P b_i + \epsilon_i} b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot a_i^T P^T b_i \frac{1}{b_i^T P b_i + \epsilon_i} \quad (84)$$

$$\left(\frac{k_i x_i^*}{\rho^{1/2}} \right)^2 (b_i^T P b_i + \epsilon_i)^2 = b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot a_i^T P^T b_i \quad (85)$$

ϵ_i -t kifejezve:

$$\epsilon_i = \frac{\rho^{1/2}}{k_i x_i^*} b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot a_i^T P^T b_i - b_i^T P b_i \quad (86)$$

A bemenőjel korlátot figyelembe véve (69):

$$\epsilon_i \geq \frac{\rho^{1/2}}{u_i} b_i^T P a_i \cdot P^{-1} \cdot a_i^T P^T b_i - b_i^T P b_i \quad (87)$$

A (87) egyenlet alapján adott ρ -hoz található olyan bemenőjel súlyozás, és tervezhető olyan visszacsatolás, mely kielégíti a bemeneti korlátozást.

A fent vázolt iterációs feltétel (87) során kapott bemenet súlyozással még nem biztosított a korlátok betartása minden lehetséges $x < x_0$ kezdőállapot esetén. A Ljapunov szintparaméter ρ megállapításához iterációs eljárás szükséges: külső feltételként az (66) egyenlet kezdőállapotok esetén való kielégítése (88):

$$\epsilon(P, \rho) : x_0^T P x_0 = \rho \quad (88)$$

Az iteráció külső (88) és belső feltételeként (87) a bemenőjel súly R , és a Ricatti gyök P ismert, ezt (79)-be helyettesítve K visszacsatolás számítható.

4.6.3 A szakaszonként lineáris szabályzás implementálása az autópálya modellre

A szakaszonként lineáris szabályzó tulajdonságainak megismerése után kapunk választ a felhajtó, mint bemeneti változó munkaponti értékének okára. A (4.4) fejezetben megállapítottam, hogy a bemeneten potenciálisan áthaladó forgalom nagyság 300 j/m/h és 1800 j/m/h között van. A munkapontot a minimális és maximális érték számtani középértékének (1050 j/m/h) választottam, így egy eltolt rendszeren megfelelően alkalmazható volt a bemenőjel korlátozás. A bemenőjel maximális értékeként így $u_{\max} = 750$ j/m/h-ra tervezhető szabályzás.

A szabályzó nem csupán a bemenőjel korlátok betartására alkalmazható. Az állapot pillanatnyi értékének változásával a visszacsatolás maximális megengedhető értéke is folyamatosan változik: emiatt célszerű egymásba ágyazott invariáns halmazokon különböző bemenőjel súlyozást és így különböző szabályzó-erősítést számítani. Egy halmazba lépve a bemenőjel garantáltan betartja a korlátot, és minél kisebb halmazban található a rendszer, annál nagyobb visszacsatolást enged a szabályzó. Az elkülönített halmazokra való tervezés eredménye: a rendszer minőségi tulajdonságai (beállási idő, és túllendülés mértéke) csökkennek. Ahogy nő az egymásba ágyazott halmazok száma, melyre új visszacsatolást számítunk, úgy gyorsul a rendszer.

A tervezést mindössze két halmazra végeztem el, ugyanis céltom a bemenőjel korlátok ésszerű minőségi tulajdonságokat biztosító betartásának elérése, nem pedig a rendszer minőségi tulajdonságainak további javítása volt. A külső halmazt a rendszer szélsőértékeire választottam meg: maximális áramlási sebesség (130 km/h), és maximális járműsűrűség ($\rho_{\text{dugó}} = 60$ j/m/km). Így a szabályzó az autópálya szakaszon előforduló valamennyi lehetséges szituációra használható. A kisebbik, beágyazott halmazt a fundamentális diagramon stabil-instabil átmeneti tartomány közelében választottam ($\rho_{\text{cr}} + 5$ j/m/h, $V(\rho_{\text{cr}}) + 10$ km/h).

4.7 Robusztusság vizsgálata

Egy szabályozás felhasználhatóságát aszerint mérhetjük fel, hogy valóságos körülmények között alkalmas-e szabályozásra. Képes egy, a valóságból leképezett modell alapján a valóságos folyamatokat megfelelően szabályozni?

A fenti kérdésre adja meg a választ a robusztusság vizsgálata. Egy szabályzás akkor robusztus, ha a modellezett rendszerre készített szabályzó a valóságos rendszert is stabilan szabályozni képes.

A szabályzott rendszer robusztusságát a kis erősítések tétele (Small Gain Theorem) alapján vizsgáltam.

4.7.1 Kis erősítések tétele (SGT - Small Gain Theorem)

Egy M - Δ struktúrában felírt rendszer robusztusan stabil, ha teljesül:

$$\|M\|_{\infty} \cdot \|\Delta\|_{\infty} \leq 1 \quad (89)$$

ahol $\|M\|_{\infty}$ a szabályozott rendszer átviteli függvényének végtelen normája,
 $\|\Delta\|_{\infty}$ a bizonytalanságot leíró Δ végtelen normája.

(Operátortartományban egy rendszer maximális erősítését a végtelen normával fejezhetjük ki: $\|G(z)\|_{\infty} = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(G(z))$, ahol $\bar{\sigma}(G(z))$ az $G(z)$ átviteli függvény legnagyobb szinguláris értéke. A Parseval-tétel kimondja, hogy az operátortartománybeli erősítés supremuma megegyezik az időtartománybeli erősítés supremumával.)

4.7.2 A kis erősítések tételének alkalmazása

Tekintsük a zárt, szabályozott rendszer átviteli függvényét M -nek, ekkor

$$M = \frac{G_{LQ}}{I + G_{LQ}} \quad (90)$$

Ahol

$$G_{LQ} = CK(sI - A)^{-1}B \quad (91)$$

A rendszer bizonytalanság a szimulációk során a kimeneteken állapítható meg, így a vizsgálatot is kimeneti csatornánként végeztem. A tételt az egyes kimeneti csatornákon a C mátrix megfelelő felírásával ellenőrizhetjük:

$C_{ii}=1$, amennyiben az i . kimenetet vizsgáljuk, minden egyéb elemére $C_{jk} = 0$.

„ M ”, mint zárt, szabályozott hurok forgalomtechnikai jelentését a következőképp fogalmazzhatjuk meg: minthogy „ M ” egy „SIMO” (single input, multiple output – egy bemenetű, több kimenetű) szabályzott rendszer, a felhajtón átmenő forgalom munkaponttól való eltérése, mint bemenőjel, és az egyes kimeneti csatornákon mérhető, munkaponti állapottól való különbség, mint kimenőjel közti erősítésként értelmezhető „ M ”.

A linearizált modell robusztusságát tekintve kijelenthető, hogy a névleges modell a munkapontokban áll a legközelebb a valóságnak tekintett nemlineáris modellhez, tehát itt a legkisebb a

modell bizonytalansága – ez a munkapont körüli linearizálás jellegzetessége. A tervezés során a változók azon értelmezési tartományát kerestem, ahol a bizonytalanság értéke kisebb az LQ szabályozás által megengedhető legnagyobb bizonytalanságnál. Az így meghatározott értelmezési tartomány adja meg a PLC tervezése során a kezdőállapotok felső határait és így azon invariáns halmaz méretét, ahol a szabályzó robusztusan stabil.

A kezdőállapotok szélsőértékei (x_0), melyek a legnagyobb invariáns halmazt definiálják, és robusztusan stabilan szabályozhatóak, iterációs algoritmus alapján határozhatóak meg. Első lépésként az x_0 kezdőállapotban a modellre jellemző legnagyobb bizonytalanságot (Δ) ismerjük meg a szimulációk alapján. (Mivel a nemlineáris rendszer nem írható le frekvenciatartományban, a bizonytalanság megállapítása csupán szimuláció segítségével lehetséges.) Második lépésként a PLC tervezést végezzük el ugyanezen kezdőértékekre, és meghatározzuk M értékét valamennyi kimeneti csatornán. Ezt követően ellenőrizzük a SGT tétel teljesülését. Addig csökkentjük a x_0 -t, amíg nem teljesül a kis erősítések tétele.

Jelen tervezés során nem szükséges elvégezni az iteráció minden lépését, az alábbi egyszerűsítések okán:

- a bizonytalanság értéke a munkapontoktól távolodva monoton növekszik.
- M értéke az invariáns halmaz csökkentésével monoton növekszik (ennek bizonyítását lásd alább).

Így tehát elegendő belátni, hogy a legnagyobb x_0 kezdőállapotban szimulált bizonytalanság (Δ) és a legkisebb x_0 kezdőállapotokra tervezett PLC erősítése (M) teljesíti a kis erősítések tételét. Mivel mindkettő monoton függvény, és a maximális értékükre végzett vizsgálat kielégítő, így minden egyéb helyettesítési értékük kielégíti a kis erősítések tételét.

4.7.3 Bizonyítás: $\|M\|_\infty$ monoton függvénye a kezdőállapotnak

Tekintsük x állapotot x_{01} és x_{02} , $x_{02} < x_{01}$ kezdőállapotokkal definiált invariáns halmazon. Ekkor $x \in \rho_1$ de $x \notin \rho_2$, mivel $x_{02} < x < x_{01}$ (ρ_1 az x_{01} , ρ_2 az x_{02} által definiált invariáns halmaz).

A PLC tervezés külső feltétele:

$$|u_{\max}| \geq |K \cdot x| \quad (92)$$

A PLC tervezés eredménye:

$$|u_{\max}| = |K \cdot x_0| \quad (93)$$

A két invariáns halmazt (x_{01} , x_{02}) tekintve:

$$|K_1 \cdot x_{01}| = |K_2 \cdot x_{02}| \quad (94)$$

$$\begin{aligned} |x_{02}| < |x_{01}|, \text{ így:} \\ \|K_2\| > \|K_1\| \end{aligned} \quad (95)$$

Ebből következik:

$$\|K_2(sI - A)^{-1}B\|_\infty > \|K_1(sI - A)^{-1}B\|_\infty, \quad (96)$$

$$\|G_{LQ1}\|_{\infty} > \|G_{LQ2}\|_{\infty}$$

Tehát

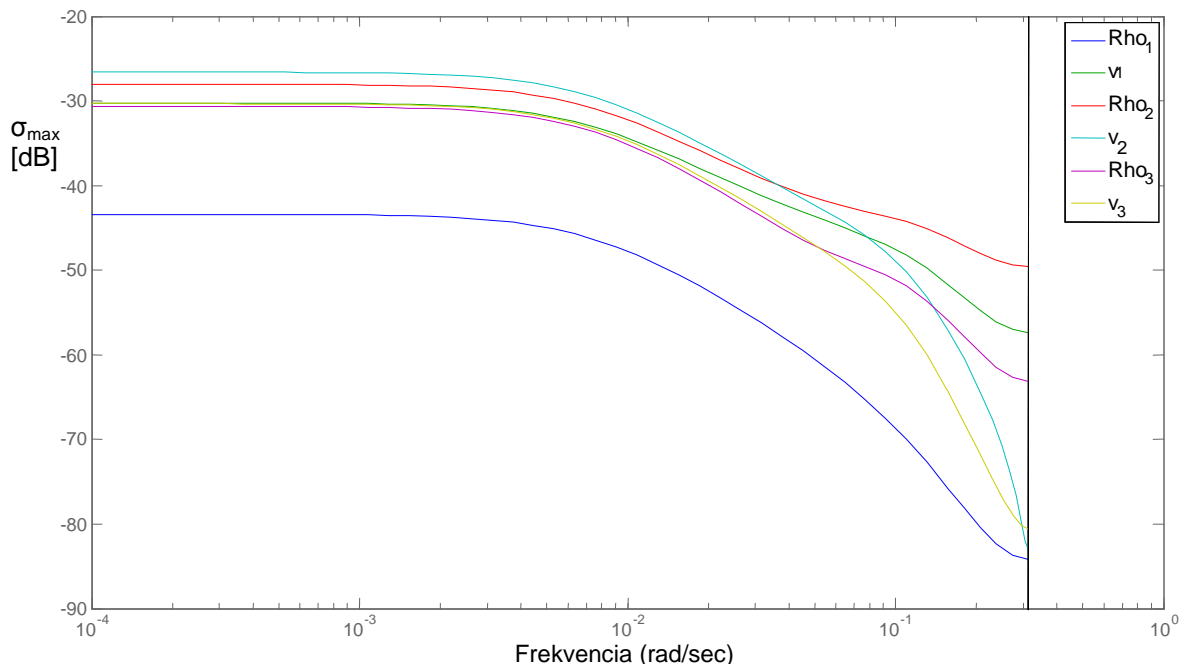
$$\|M_1\|_{\infty} < \|M_2\|_{\infty} \quad (97)$$

Tehát a zárt rendszer erősítése a kezdőállapot értékének csökkenésével nő, M normája a legkisebb kezdőértékekre tervezett szabályzónál a legnagyobb.

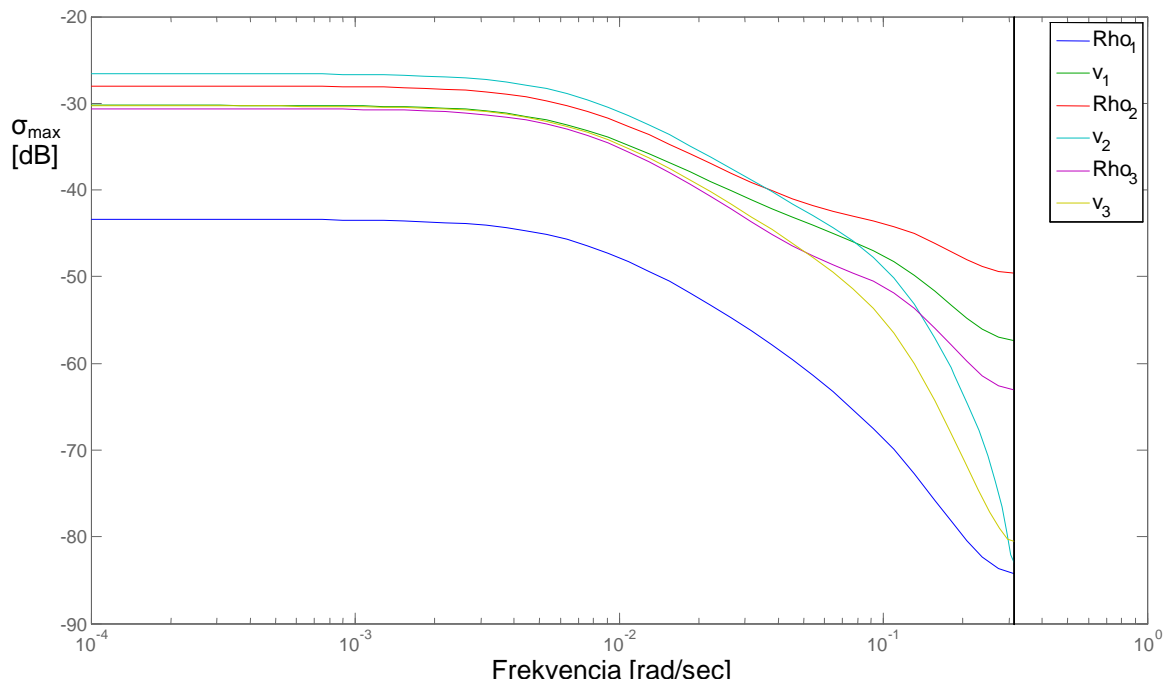
4.7.4 A szabályzások robusztusságának ellenőrzése az SGT tétel alapján

A legkisebb kezdőértékek, melyekre a PLC tervezés során invariáns halmazt definiáltam a fundamentális diagram stabil tartományának határa, tehát $\rho < \rho_{cr}$, $v < V(\rho_{cr})$. Az ehhez tartozó legnagyobb szinguláris értékek az egyes kimeneti csatornákon az alábbi ábrákon láthatóak.

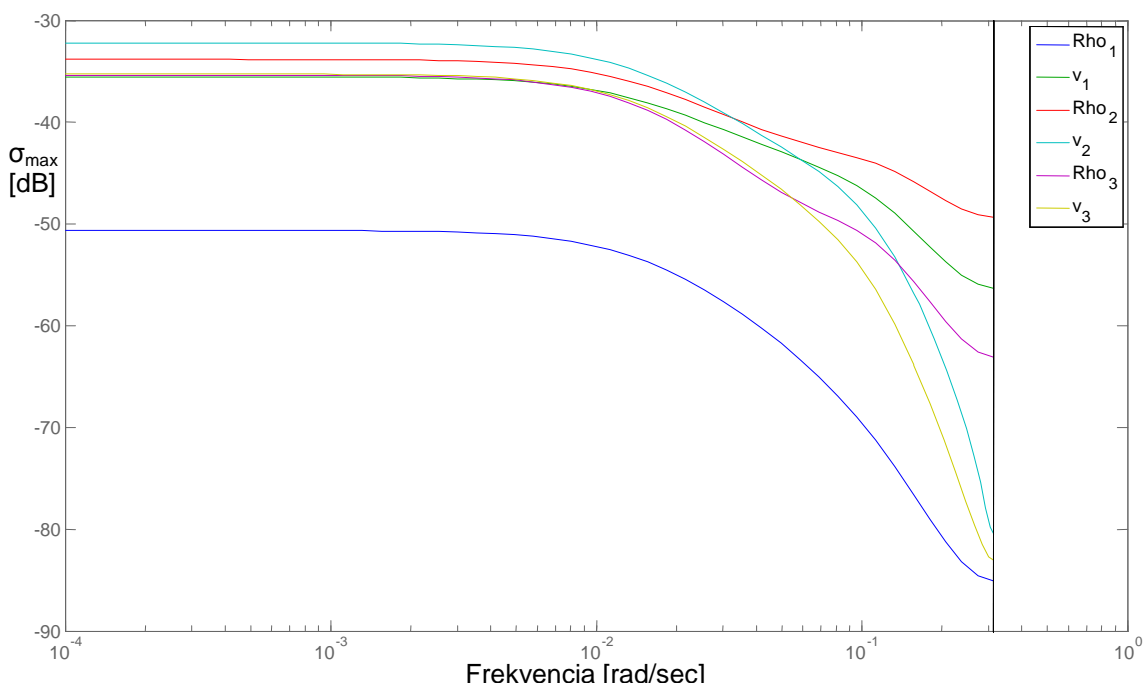
A zárt szabályozási körök legnagyobb szinguláris értékei ($\bar{\sigma}(M)$)



14. ábra Eljutási idő optimális szabályzás zárt hurkának legnagyobb szinguláris értékei az egyes kimeneteken



15. ábra Kibocsátás optimális szabályzás zárt hurkának legnagyobb szinguláris értékei az egyes kimeneteken



16. ábra Többkritériumú optimális szabályzás zárt hurkának legnagyobb szinguláris értékei az egyes kimeneteken

A 14. ábra 15. ábra 16. ábraákon látható, hogy a zárt hurkú rendszerek legnagyobb szinguláris értékei minden esetben $-26,6 \text{ dB}$ alatt maradnak. Így $\|M\|_{\infty} < -26,6 \text{ dB} = 0,047$

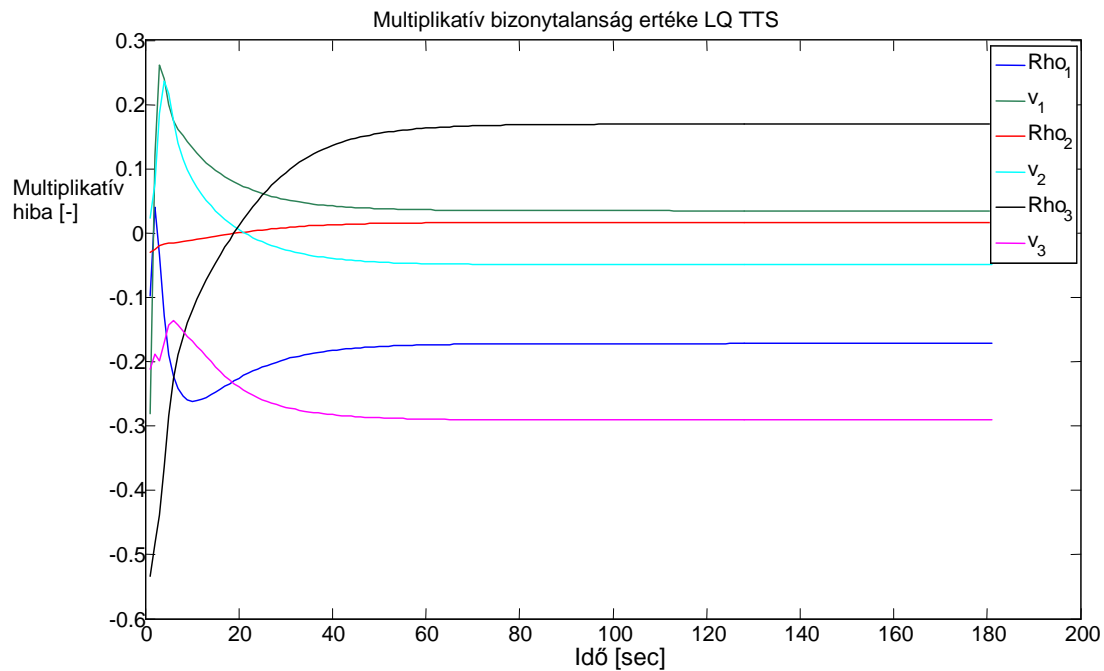
A továbbiakban elég ellenőrizni, hogy minden forgalmi szituációra teljesül:

$$\|\Delta_M\|_{\infty} < (\|M\|_{\infty})^{-1} = 21,36$$

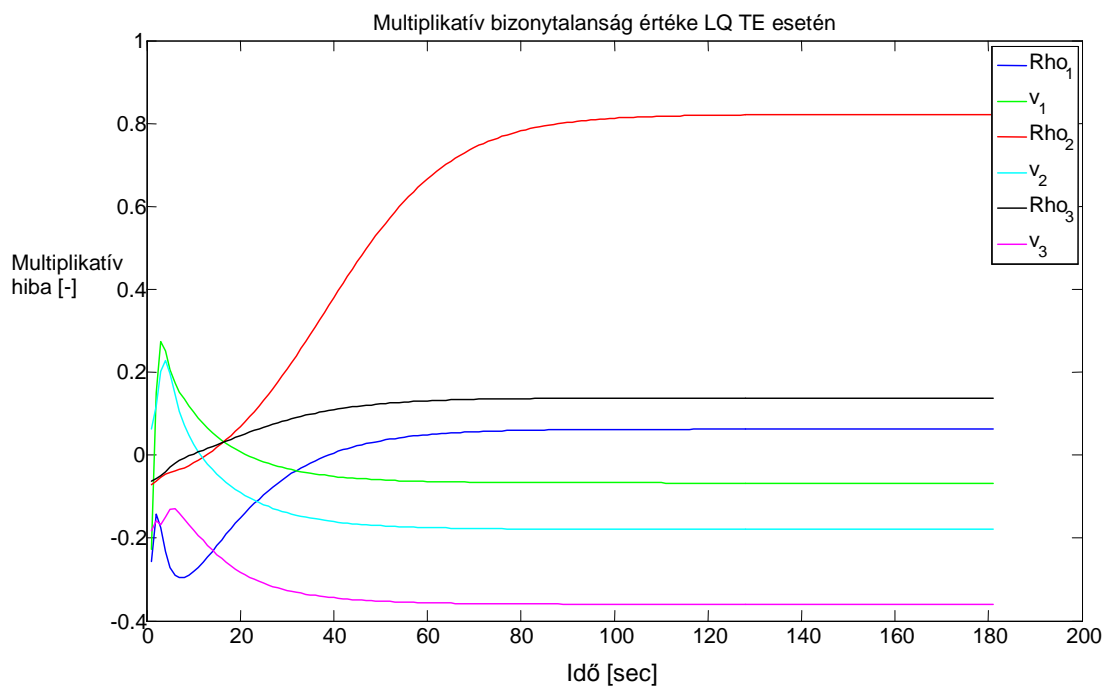
Legnagyobb multiplikatív bizonytalanság (Δ_M)

A nemlineáris és lineáris modell közötti bizonytalanságot egy torlódott forgalmi helyzetben vizsgáltam, szintén kimeneti csatornánként. A forgalmi szituáció: torlódás az autópálya szakaszt követő szegmensben ($\rho_4 = 62 \text{ jm/km}$), a bejövő forgalom ennek fényében igen lassú, és torlódó (kis forgalomnagyság): $q_0 = 250 \text{ jm/h}$; $v_0 = 20 \text{ km/h}$.

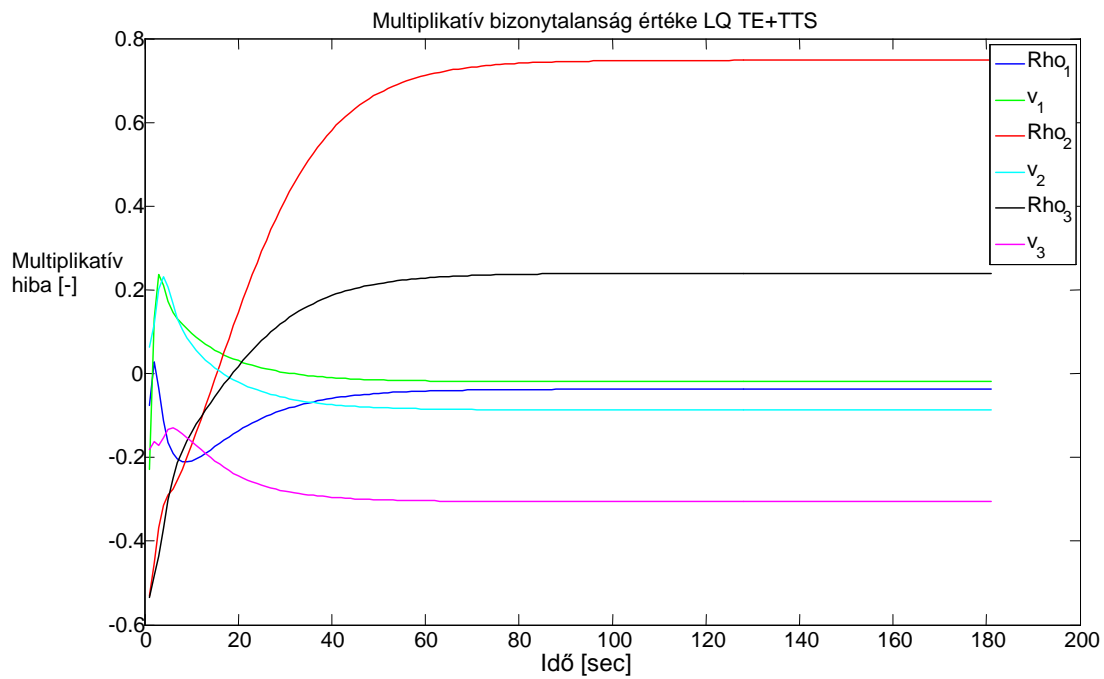
A (17. ábra, 18. ábra, 19. ábra) a három különféle munkapont körül linearizált rendszer (TTS optimális, TE optimális, TTS+TE optimális munkapontok) multiplikatív hibáit ábrázolják:



17. ábra Multiplikatív hiba a szimulált torlódás esetén – TTS optimális munkapontok



18. ábra Multiplikatív hiba a szimulált torlódás esetén – TE optimális munkapontok



19. ábra Multiplikatív hiba a szimulált torlódás esetén – TTS és TE optimális munkapontok

A legnagyobb multiplikatív hiba: $\Delta_M = 0,82$ – ez ρ_2 bizonytalansága TE optimális munkapont körül linearizált rendszer esetén.

SGT tétel ellenőrzése:

$$\|M\|_{\infty} \cdot \|\Delta\|_{\infty} = 0,039 < 1 \quad (98)$$

Tehát a szabályzás robusztusan stabilnak tekinthető minden forgalmi szituációra.

5 Szimulációk a szabályozott rendszeren

A szimulációk során a szabályzókat többféle forgalmi helyzetben hasonlítottam össze. A forgalmi situációkat a rendszeren zavarások és a bemenet nagyságával adtam meg: a virtuális negyedik szegmens (az autópálya szakaszt követő szegmens) járműsűrűsége (ρ_4), illetve a szakaszra belépő forgalom nagysága és átlagsebessége (q_0 és v_0) határozza meg a szakaszon jellemző forgalmi állapotot.

A főpályán három lehetséges forgalomerősséget vizsgáltam, három különböző felhajtón megjelenő forgalomnagysággal. Egy esetben a főpályán kialakuló torlódást szimuláltam: így összesen hét forgalmi helyzetre végeztem szimulációt.

A szabályzások összehasonlításához a zavarásokon és a bemeneten szinuszos jelet szimuláltam, így a fősávon és felhajtón jellemző, valóságban is meglévő dinamikát próbáltam modellezni. A szimuláció időtartama minden esetben fél óra, azaz 1800 másodperc volt.

A szabályzókat minőségi jellemzőik alapján hasonlítottam össze: az egy járműre jutó eljutási időket illetve az egy járműre jutó időfajlagos károsanyag kibocsátást elemeztem.

Szabad áramlás a fősávon, kis forgalomnagyság a felhajtón

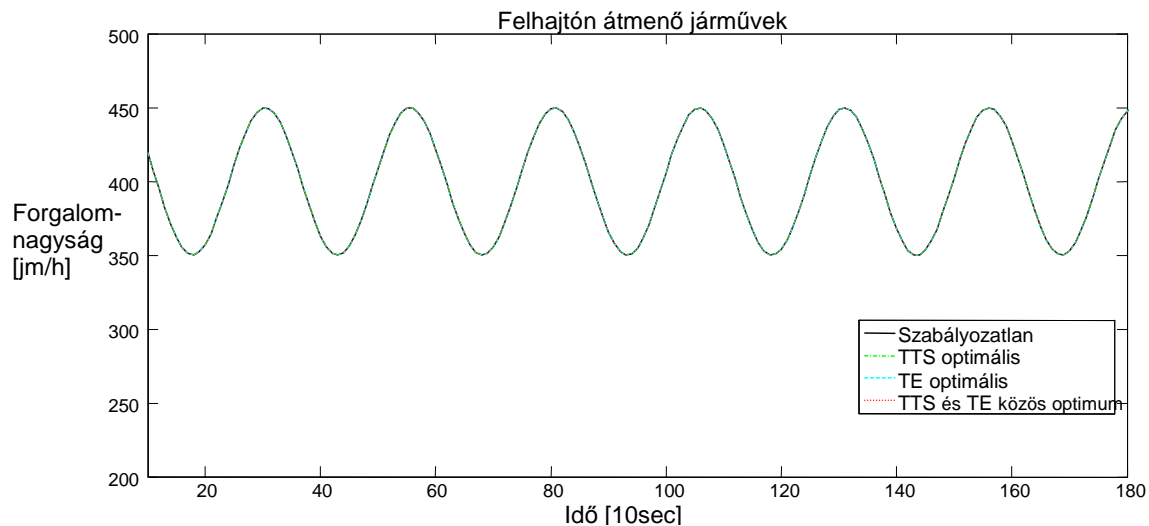
Forgalmi változók középértékei:

$$q_0 = 1000 \text{ j/m/h}$$

$$v_0 = 90 \text{ km/h}$$

$$\rho_4 = 12 \text{ j/m/km}$$

$$r_2 = 400 \text{ j/m/h}$$



20. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – gyenge forgalom esetén

Kis felhajtói és főpálya forgalomnagyság esetén (20. ábra) mindegyik szabályzó átengedi az összes, a felhajtón megjelenő járművet, így a szabályzók nem hasonlíthatók össze ebben a forgalmi helyzetben: a minőségi jellemzők minden szabályzóra megegyeznek, mivel a rendszer beavatkozás nélkül maradt. Így a minőségi jellemzők diagramon való ábrázolásától eltekintettem. Mindazonáltal kijelenthető, hogy mindhárom szabályzó az elvárásoknak megfelelően működik: kis forgalom esetén nem szólnak bele a folyamatba.

Szabad áramlás a főszávon, közepes forgalomnagyság a felhajtón

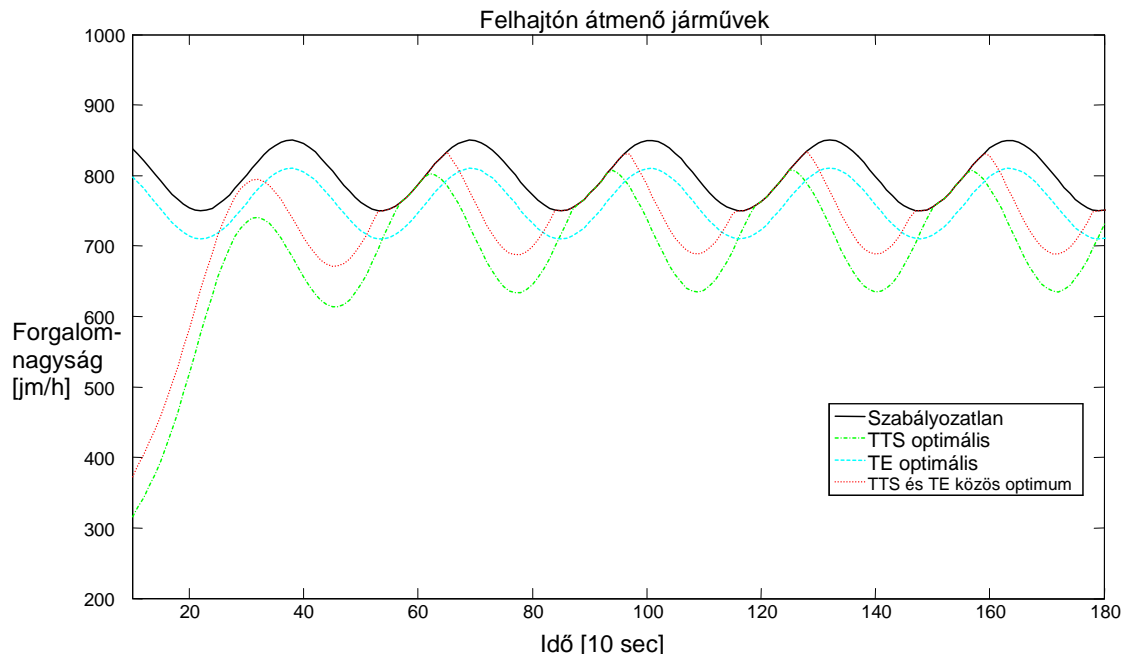
Forgalmi változók közéértékei:

$$q_0 = 1000 \text{ j\text{m}/h}$$

$$v_0 = 90 \text{ km/h}$$

$$\rho_4 = 12 \text{ j\text{m}/km}$$

$$r_2 = 800 \text{ j\text{m}/h}$$

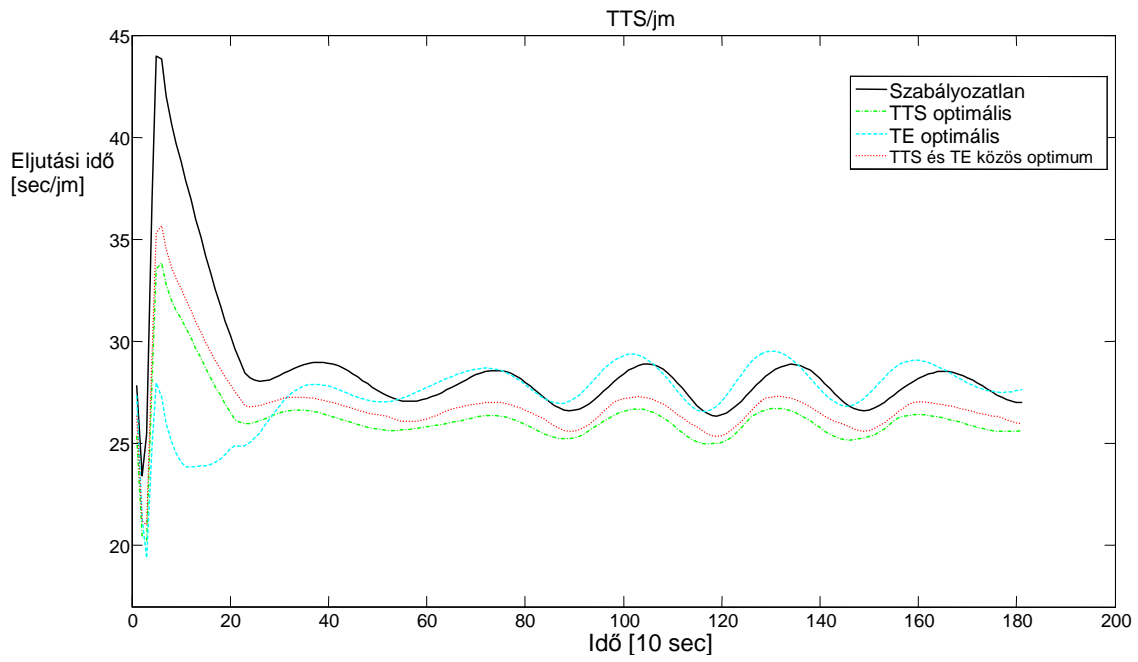


21. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – alacsony főpálya forgalom, közepes felhajtó forgalomnagyság esetén

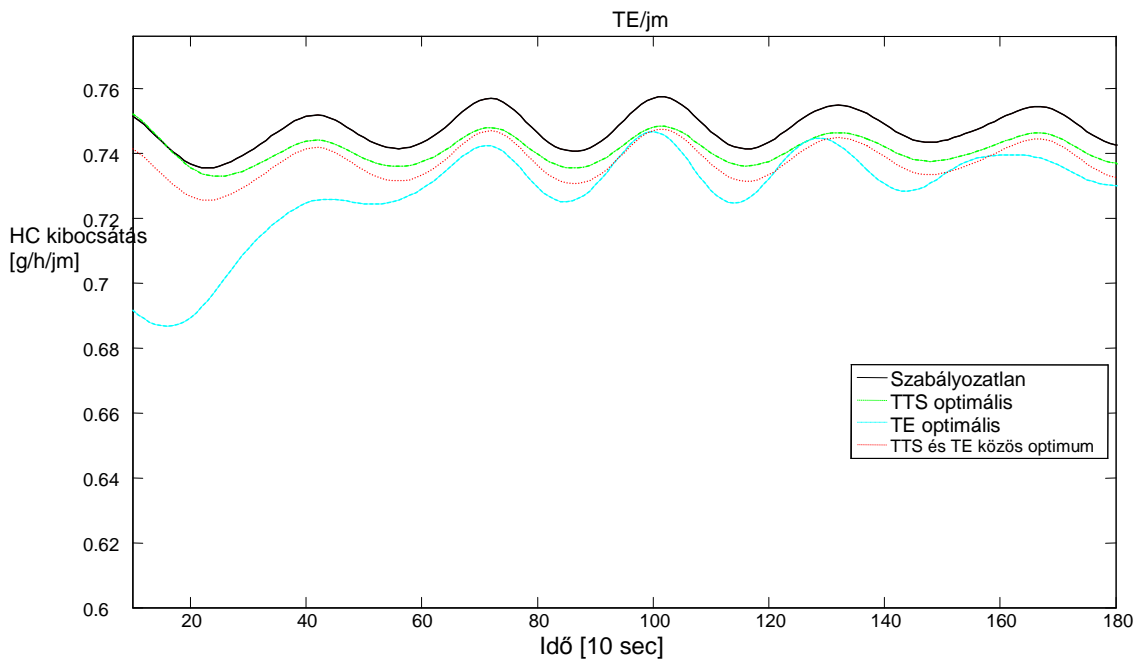
800 j/m/h közéértékű felhajtón megjelenő forgalomnagyság esetén (21. ábra) a szabályzók nem engedik a teljes forgalomnagyságot a főpályára. A legkisebb forgalomnagyságot az eljutási idő optimális szabályzó, míg a legnagyobbat az emisszió optimális szabályzás engedi. A későbbiekben is megfigyelhető, hogy az egyes szabályzók által engedett forgalomnagyság nincs fázisban az igényként jelenlévő felhajtó forgalomnagysággal (szabályozatlan eset): a bemenőjelet ugyanis a visszacsatolt állapotok alapján kapjuk meg, amelyek a felhajtón érkező forgalomtól eltérő frekvenciájú és fázisú szinuszos jelek: a forgalmi változók így nem lesznek azonos fázisban.

Az eljutási időket (22. ábra) vizsgálva látszik, hogy az emisszió optimális szabályozás a szabályozás nélküli esethez hasonló, illetve annál rosszabb értékeket eredményezett. Már ezen a szimuláción is látható, hogy egy költségfüggvényt optimalizáló szabályzó egy másik költségfüggvény felírásakor a legrosszabb eredményt éri el. Ezért célszerű olyan szabályzó tervezése, mely több kritériumot tart szem előtt (TTS és TE közös optimum).

A kibocsátás időbeli alakulását is tekintve (23. ábra) belátható, hogy az eljutási idő és a károsanyag kibocsátás egymással ellentétes szabályozási követelmények. Erre enged következtetni az eljutási idő optimális és a kibocsátás optimális szabályzók által eredményezett értékek fordított relációja a minőségi diagramokon.



22. ábra Járműegységre jutó eljutási idő – alacsony főpálya forgalom, közepes felhajtó forgalomnagyság esetén



23. ábra Járműegységre jutó időfajlagos HC kibocsátás – alacsony főpálya forgalom, közepes felhajtó forgalomnagyság esetén

Szabad áramlás a fősvávon, nagy forgalomnagyság a felhajtón

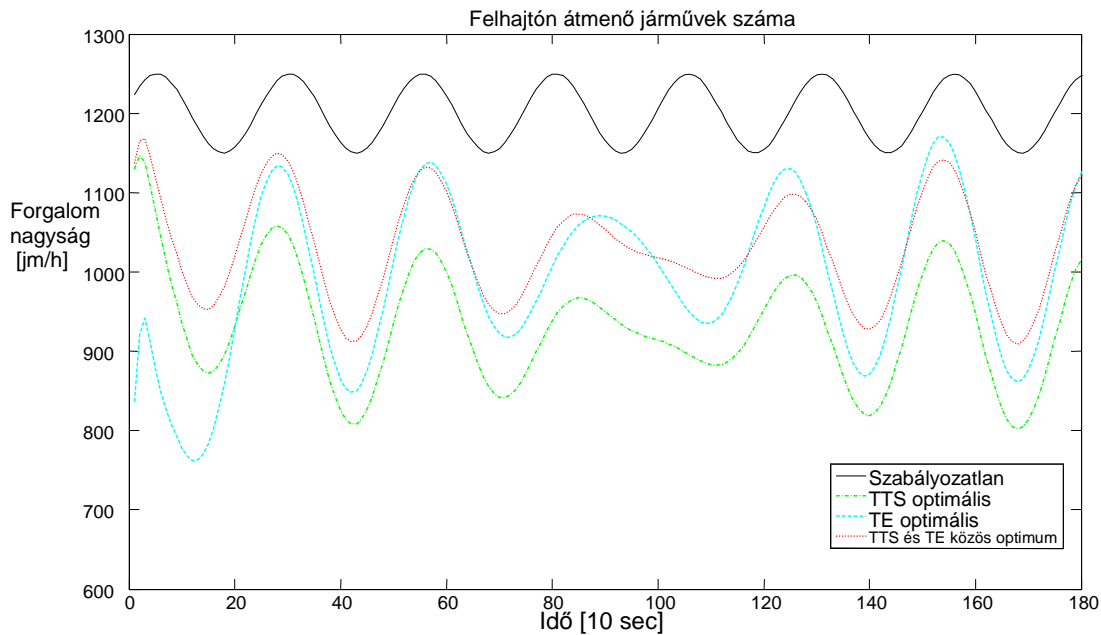
Forgalmi változók közéértékei:

$$q_0 = 1000 \text{ j/m/h}$$

$$v_0 = 90 \text{ km/h}$$

$$\rho_4 = 12 \text{ j/m/km}$$

$$r_2 = 1200 \text{ j/m/h}$$

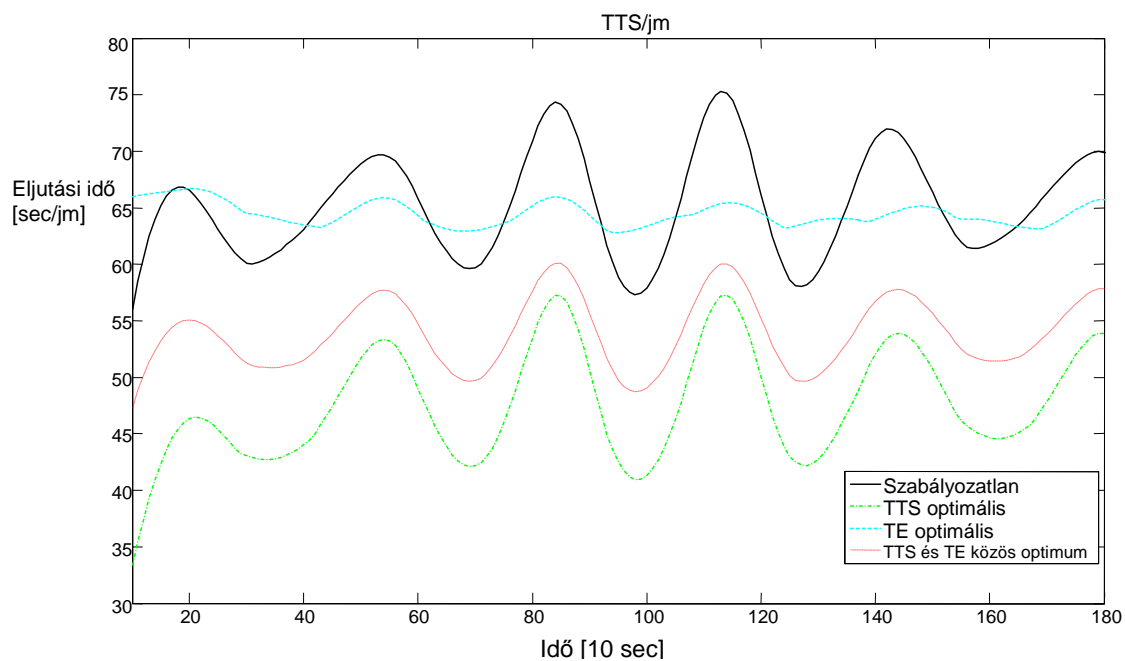


24. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – kis fősvávi forgalom, nagy felhajtó forgalomnagyság esetén

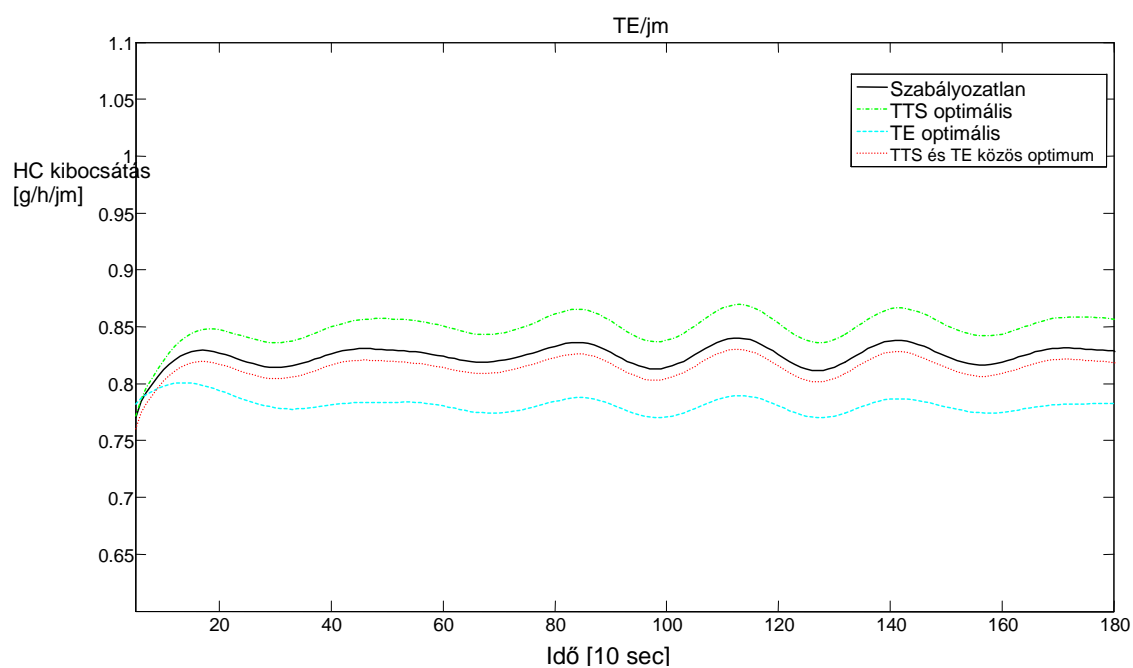
Ebben az esetben a szabályzók nagyobb forgalomnagyságot engednek át a felhajtón, mint az előző esetben (24. ábra). Ennek oka a bemenőjeli munkaponthoz közeli felhajtó forgalomnagyság: míg előző esetben a szabályzók a főpálya forgalom optimumhoz közeli értékeit (állapot munkapontok) biztosították, addig jelen esetben – mivel a bemenőjel közel található a bemenőjeli munkaponthoz (1050 j/m/h), így ennek közelében marad. Ez megfigyelhető a 21. ábraán is: az eljutási idő optimális és a többkritériumú szabályzó egyes esetekben a meglévő forgalomnagyságnál nagyobb, munkaponthoz közelebbi mennyiséget engedne a főpályára, ez azonban nem lehetséges.

A fajlagos eljutási idő alakulását tekintve (25. ábra) látható, hogy az emisszió optimális szabályzó a szabályozatlan eset eljutási idejét csak simítja, nem javítja, valódi javulást az eljutási idő optimális és a többkritériumú optimalizálás jelent.

A járműegységre jutó kibocsátás (26. ábra) a teljes eljutási időt optimalizáló szabályzás esetén romlik a szabályozatlan esethez képest – a szakaszon átmenő járművek száma nem sokkal nő, ugyanakkor átlagsebességük magasabb mint a másik két esetben, ez okozza a nem számottevő kibocsátás többletet.



25. ábra Járműegységre jutó eljutási idő – alacsony főpálya forgalom, nagy felhajtó forgalom nagyság esetén



26. ábra Járműegységre jutó időfajlagos HC kibocsátás – alacsony főpálya forgalom, nagy felhajtó forgalom nagyság esetén

Kritikus áramlás a főszávon, kis forgalomnagyság a felhajtón

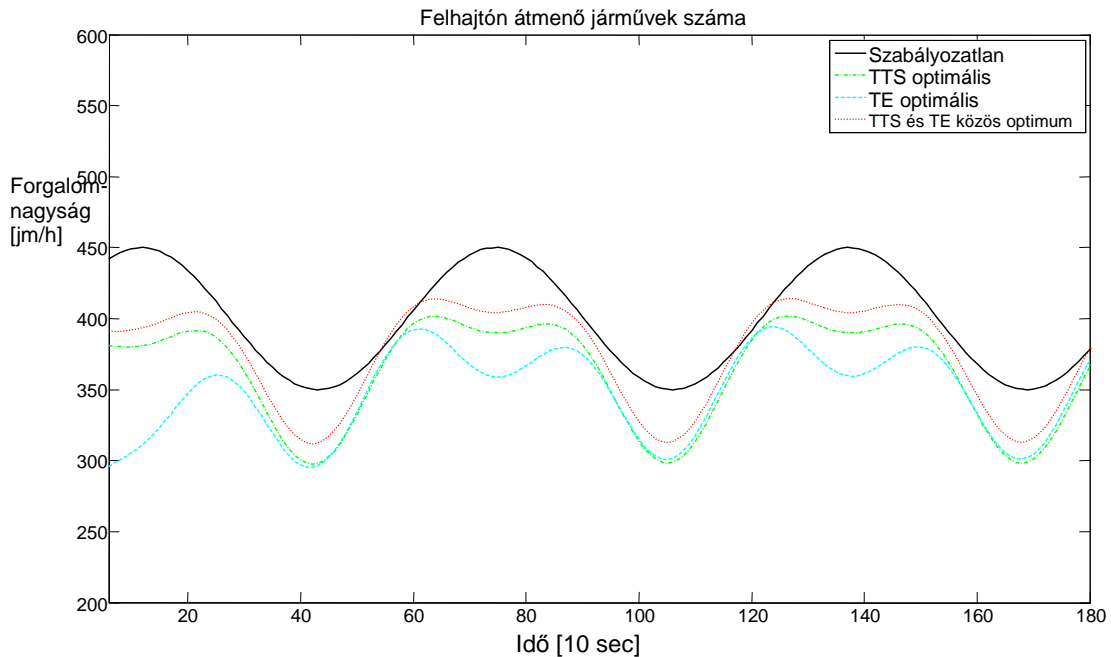
Forgalmi változók középértékei:

$$q_0 = 1790 \text{ j/m/h}$$

$$v_0 = 60 \text{ km/h}$$

$$\rho_4 = 29 \text{ j/m/km}$$

$$r_2 = 400 \text{ j/m/h}$$

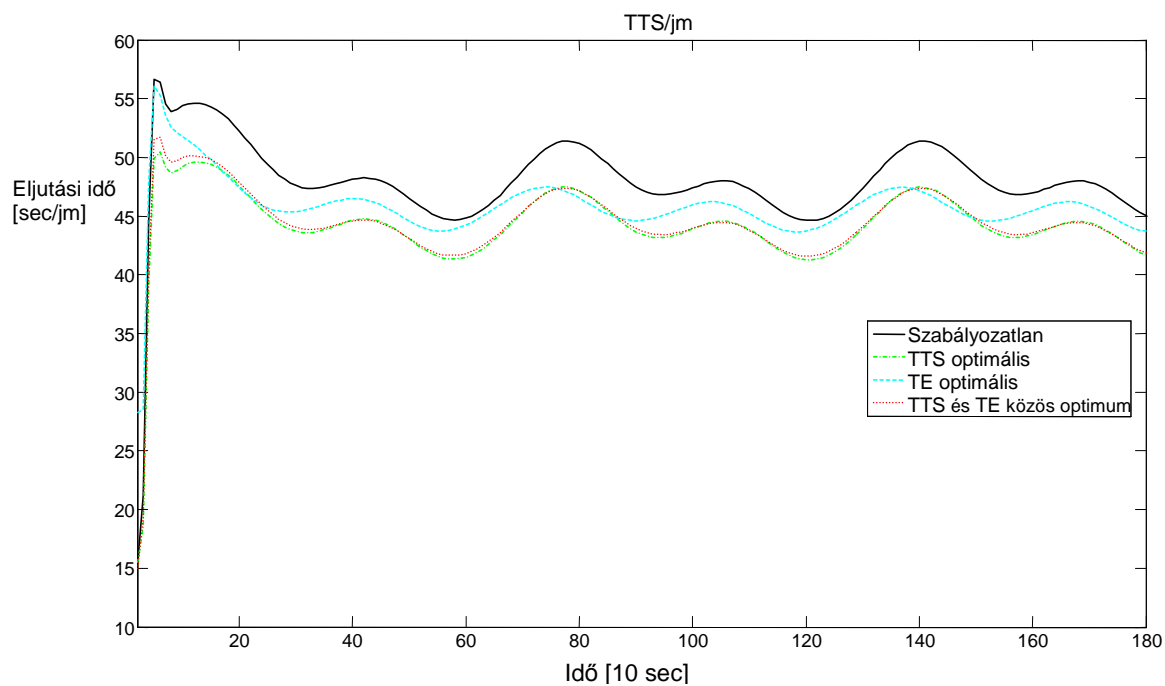


27. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – kritikus főszávi forgalom, kis felhajtó forgalomnagyság esetén

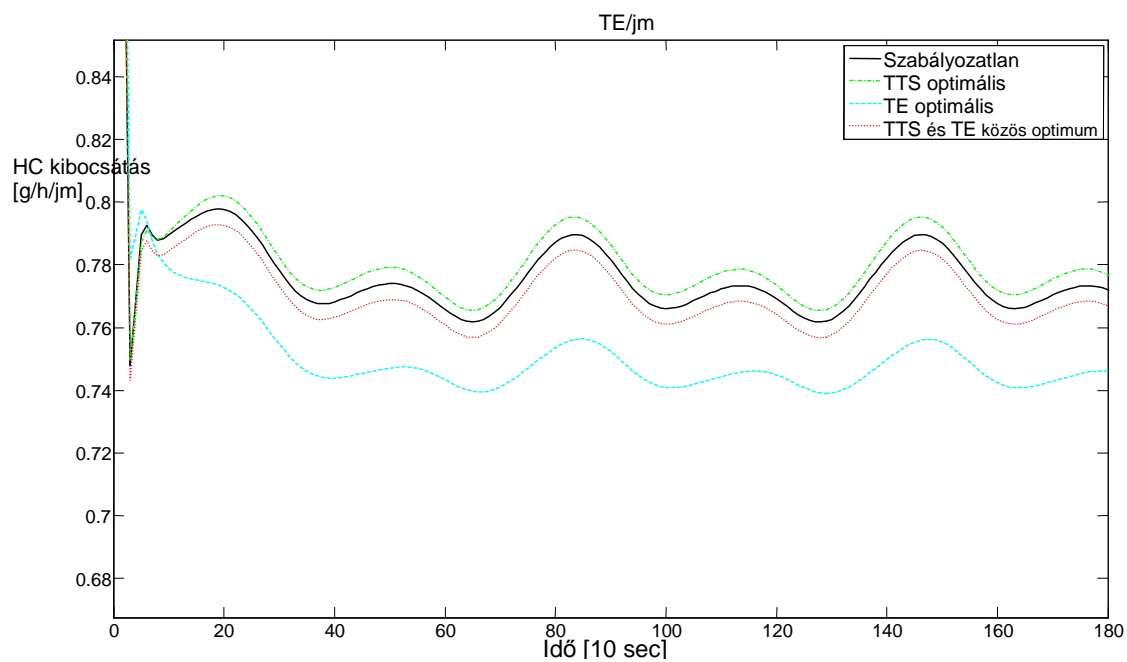
Kritikus áramlás esetén – ez átmeneti állapotot jelent a stabil és instabil forgalmi áramlás között – a forgalom sűrűsége a fundamentális diagram (10. ábra) ρ_{krit} értékéhez közel található. Ekkor a legnagyobb a szakaszon áthaladó forgalomnagyság. Amennyiben a forgalom sűrűsége a kritikusnál magasabb értéket ér el, a forgalom instabil állapotba kerül, és torlódás alakulhat ki.

Ezért célszerű a szabályzókat ebben a szituációban vizsgálni (27. ábra): aszerint hasonlítottam őket össze, hogy képesek-e stabilizálni a forgalmat. Ennek értékeléséhez elegendő az eljutási időket ellenőrizni (28. ábra): minthogy az eljutási idők csökkennek a szabályozatlan esethez képest, valamennyi szabályzó stabilizálni törekszik a forgalmi áramlatot a főpályán. A jelentéget a linearizált rendszerek munkapontjai magyarázzák: minden munkapontot úgy választottam meg, hogy az a fundamentális diagram stabil tartományán helyezkedjen el. Így az emisszió optimális szabályzás esetén is, mivel a választott sebesség munkapont ($v_{\text{opt}}=61 \text{ km/h}$, ahol a távolságfajlagos kibocsátás a minimális – lásd 4.4.2 fejezet), és $V(\rho_{\text{krit}}) < v_{\text{opt}}$. Amennyiben a sebesség munkapont $V(\rho_{\text{krit}})$ -nél kisebb érték lenne, úgy a szabályzó valószínűleg egy torlódó forgalmat okozna a főpályán, a kritikus sűrűségnél magasabb járműsűrűséggel, és ehhez társuló alacsony sebességgel.

A minőségi diagramokat tekintve ez a forgalmi szituáció is megerősíti, hogy a többkritériumú tervezés választásával egy stabil, de alacsonyabb kibocsátású forgalom érhető el (29. ábra).



28. ábra Járőmőegységőre jutó eljutási idő – kritikus őőpálya forgalom, kis felhajtó forgalomnagyság esetén



29. ábra Járőmőegységőre jutó időőfajlagos HC kibocsátás – kritikus őőpálya forgalom, kis felhajtó forgalomnagyság esetén

Kritikus áramlás a főszávon, közepes forgalomnagyság a felhajtón

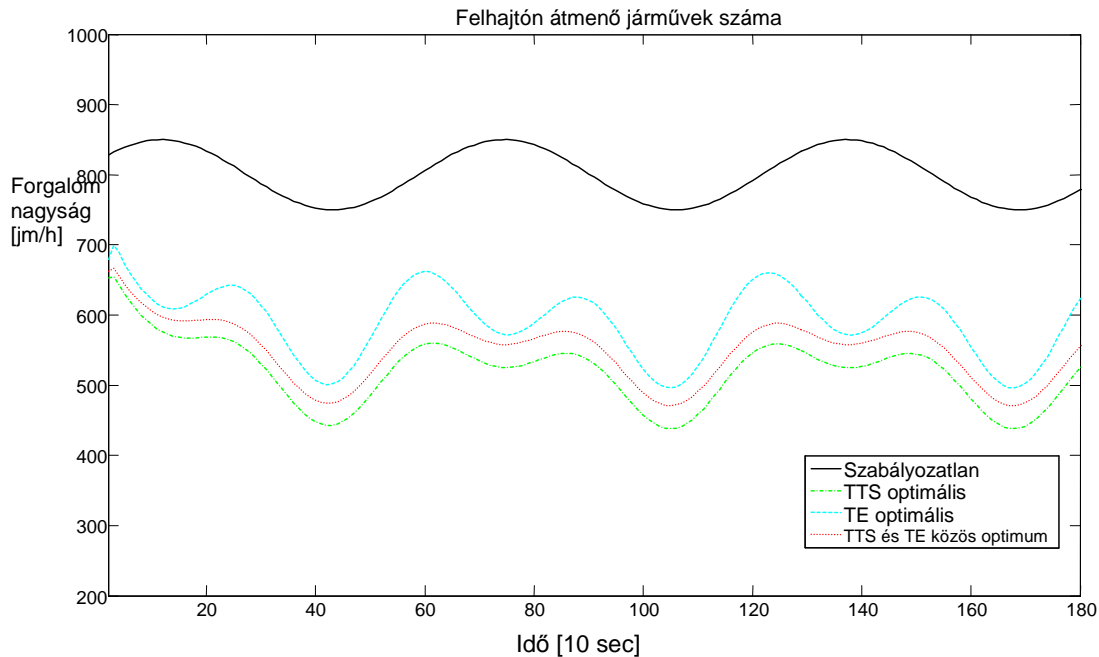
Forgalmi változók közéértékei:

$$q_0 = 1790 \text{ j/m/h}$$

$$v_0 = 60 \text{ km/h}$$

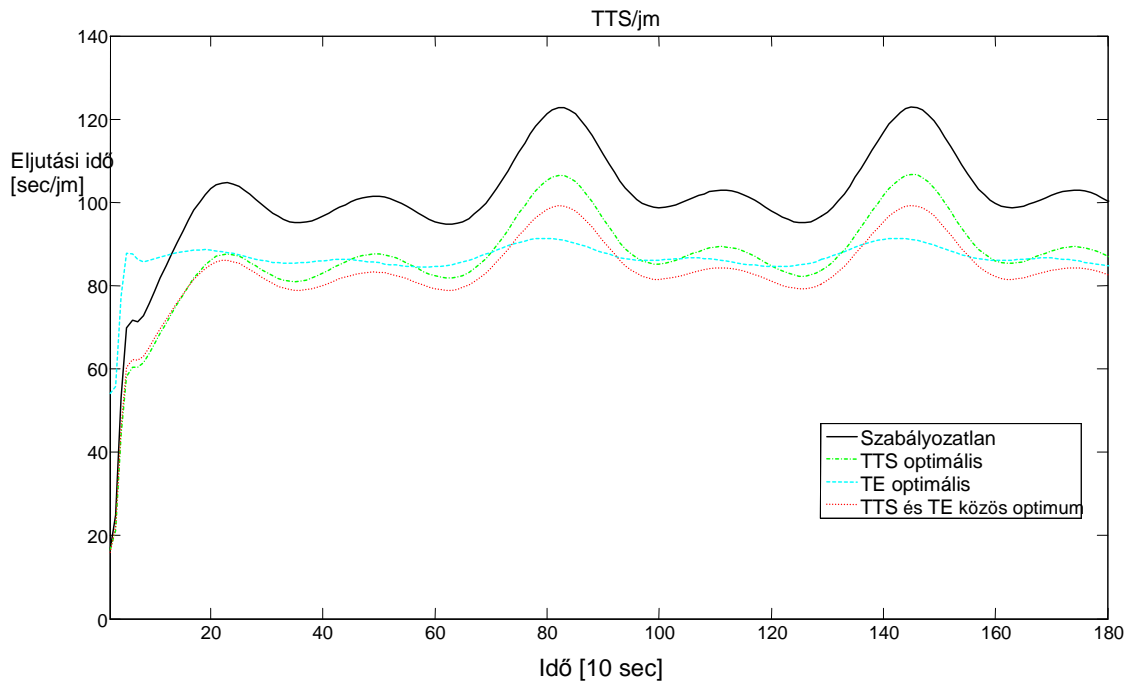
$$\rho_4 = 29 \text{ j/m/km}$$

$$r_2 = 800 \text{ j/m/h}$$

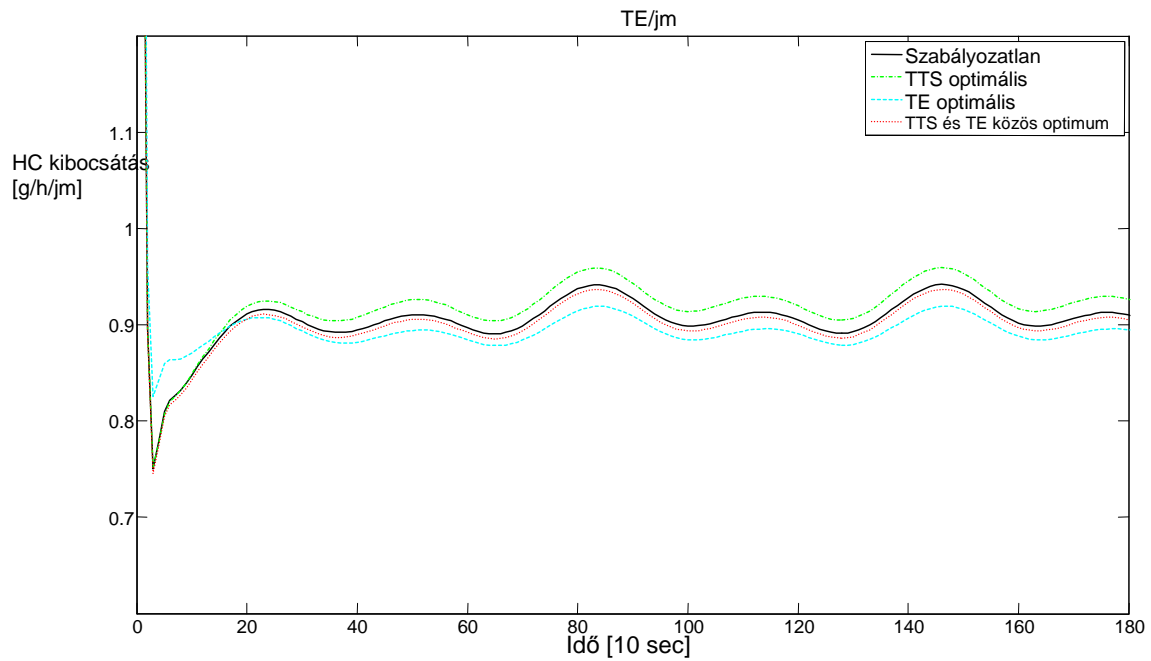


30. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – kis főszávi forgalom, közepes felhajtó forgalomnagyság esetén

A szabályzók viselkedése a korábbiakban megismertekhez hasonló: a bemenőjeli munkapont-hoz közeli felhajtó forgalomnagyság miatt mindegyik szabályzó többet enged a kis felhajtói forgalomnagyságnál (30. ábra). A szabályzók minőségi jellemzőit tekintve érdekes eredmény, hogy a többkritériumú szabályzó jobb fajlagos eljutási időt (31. ábra) ért el, mint a csak eljutási időre optimalizáló szabályzó, a különbség ugyanakkor rendkívül kicsi. Erre a kritikus forgalmi állapot körüli dinamika adhat magyarázatot: a $V(\rho_{krit})$ -nél nagyobb v_{opt} optimális távolságfajlagos emissziót adó sebesség mint munkapont megtalálható a többkritériumú szabályzó állapotsúlyozásában, és ez jobb reakciót eredményezhet a munkapont közelében.



31. ábra Járműegységre jutó eljutási idő – kritikus főpálya forgalom, közepes felhajtó forgalomnagyság esetén



32. ábra Járműegységre jutó időfajlagos HC kibocsátás – kritikus főpálya forgalom, közepes felhajtó forgalomnagyság esetén

Kritikus áramlás a főszávon, nagy forgalomnagyság a felhajtón

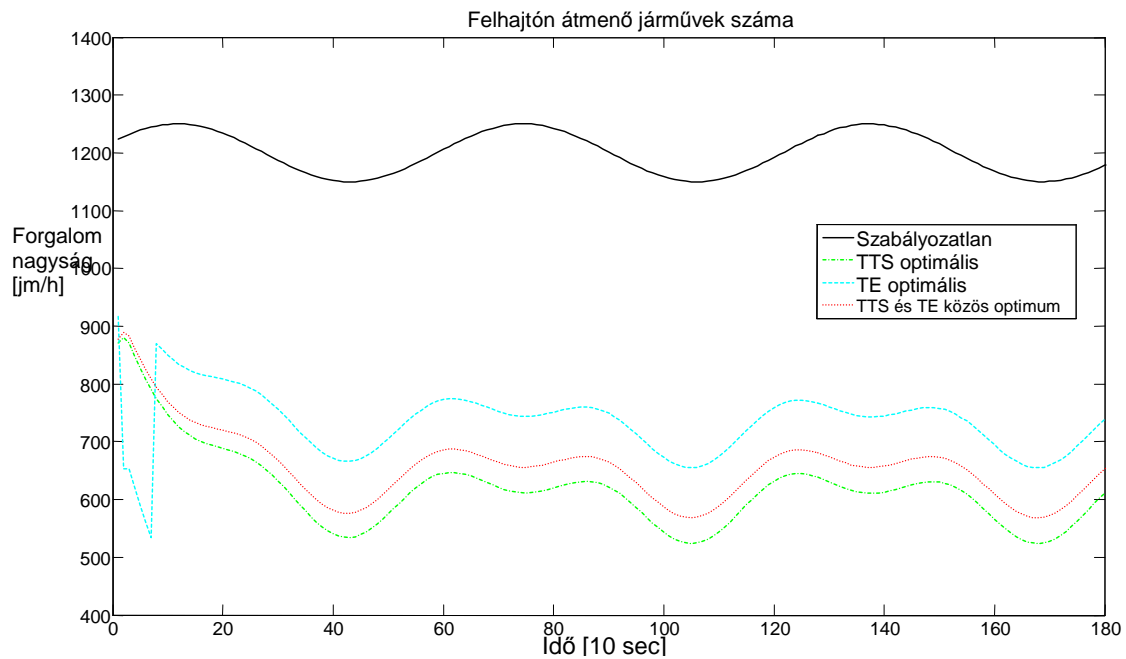
Forgalmi változók középértékei:

$$q_0 = 1790 \text{ j/m/h}$$

$$v_0 = 60 \text{ km/h}$$

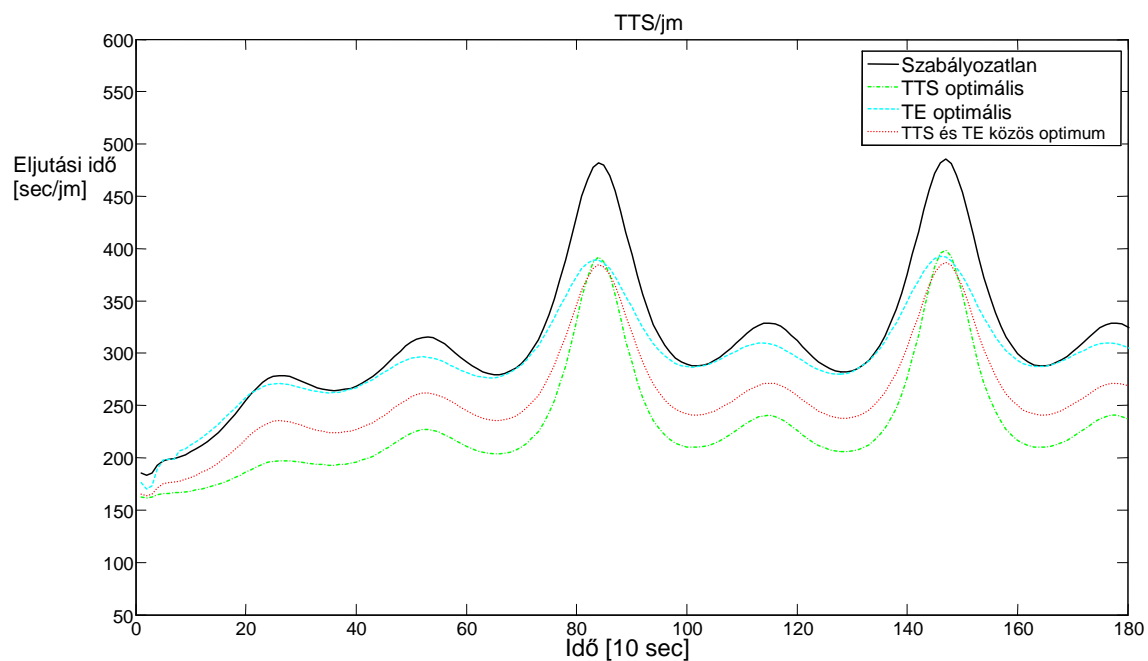
$$\rho_4 = 29 \text{ j/m/km}$$

$$r_2 = 1200 \text{ j/m/h}$$

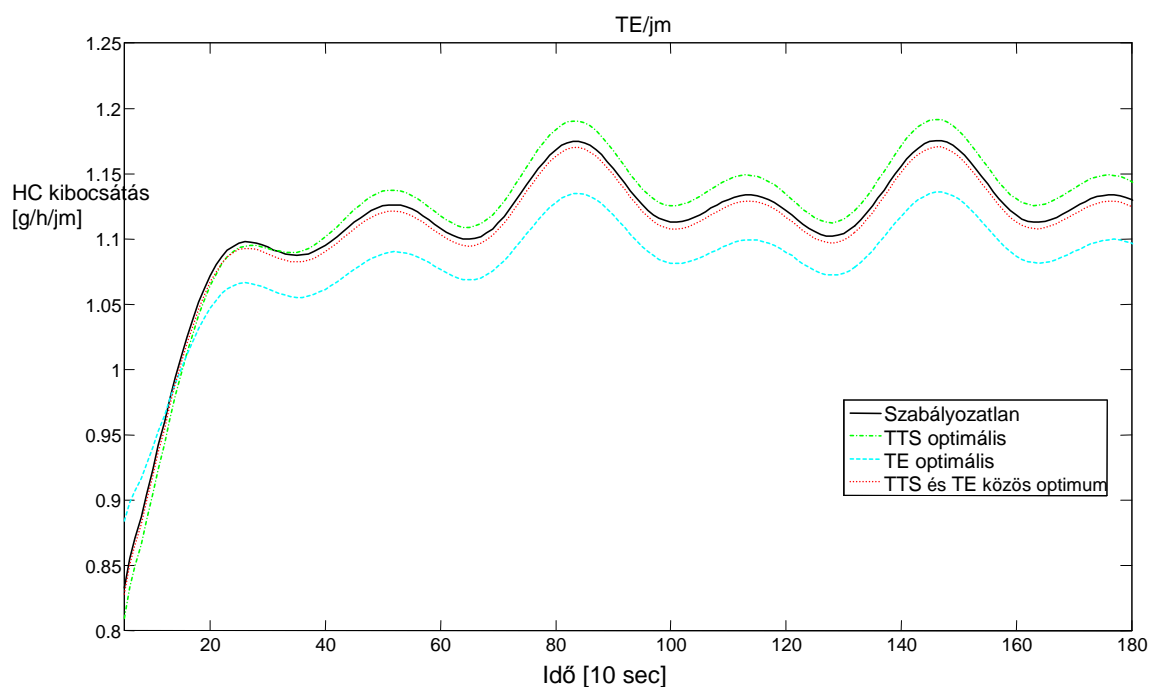


33. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – kis főszávi forgalom, nagy felhajtó forgalomnagyság esetén

Ezen szituáció vizsgálatával jól mutatja, hogy a felhajtó forgalomnagyság ugyan a bemenőjeli munkaponthoz közeli érték közelében perturbál, de a szabályzók nem eredményeznek a munkaponthoz közeli felhajtó forgalomnagyságot, mivel így torlódás alakulhatna ki a főpályán (33. ábra).



34. ábra Járműegységre jutó eljutási idő – kritikus főpálya forgalom, nagy felhajtó forgalomnagyság esetén



35. ábra Járműegységre jutó időfajlagos HC kibocsátás – kritikus főpálya forgalom, nagy felhajtó forgalomnagyság esetén

Torlódás

Forgalmi változók kezdetben:

$$q_0 = 1200 \text{ jm/h}$$

$$v_0 = 70 \text{ km/h}$$

$$\rho_4 = 22 \text{ jm/km}$$

$$r_2 = 800 \text{ jm/h}$$

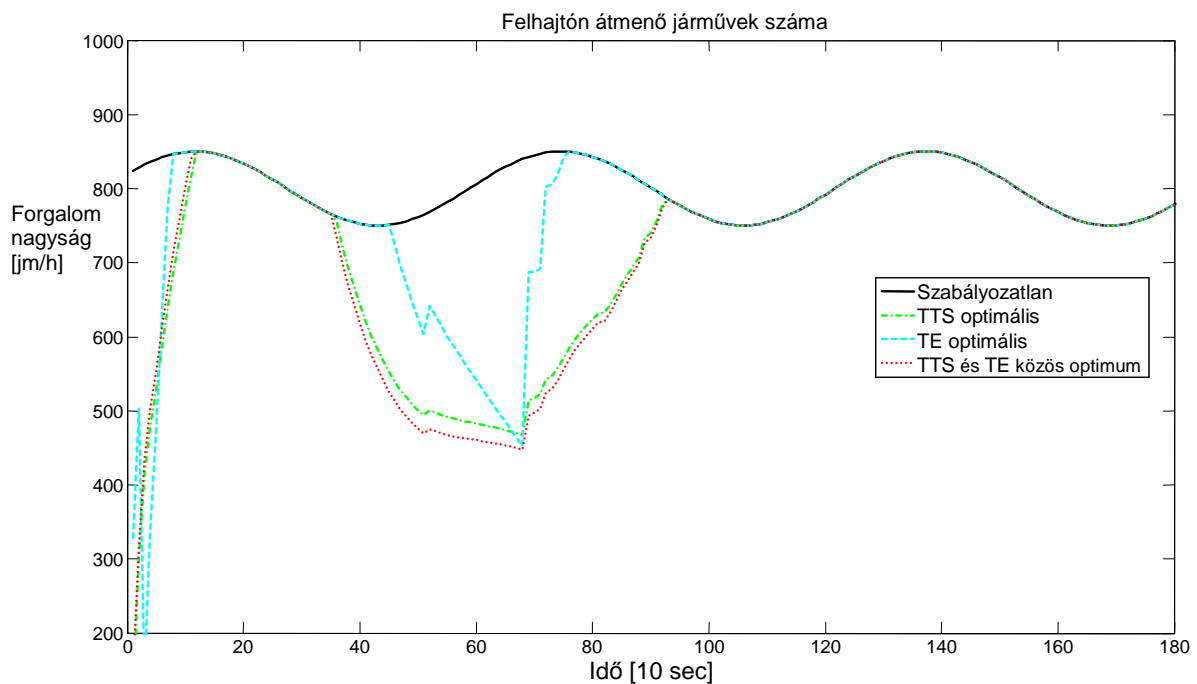
Forgalmi változók a torlódás alatt:

$$q_0 = 900 \text{ jm/h}$$

$$v_0 = 15 \text{ km/h}$$

$$\rho_4 = 60 \text{ jm/km}$$

$$r_2 = 800 \text{ jm/h}$$



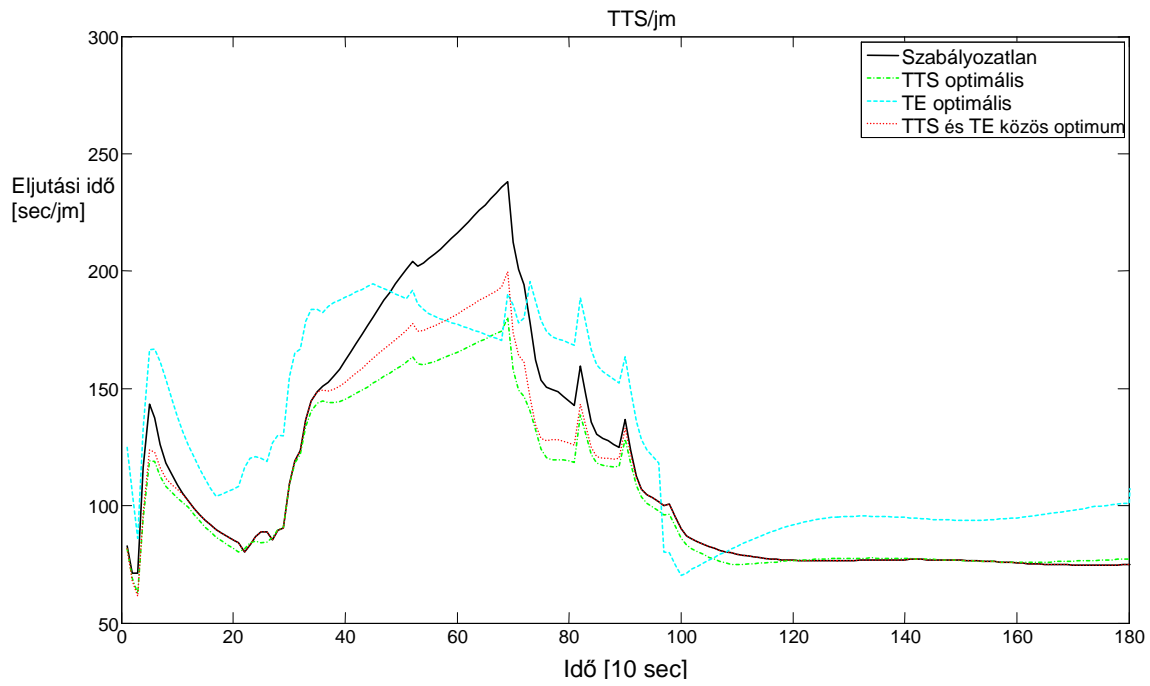
36. ábra Felhajtón átengedett járművek száma – torlódás

Egy összetett forgalmi szituációt vizsgáltam: a kezdetben szabadáramlási, stabil állapotban lévő főpálya forgalmon a 350. másodperctől kezdődően torlódás alakul ki (a szabályozott autópálya szakaszt követő szegmensben lévő útszűkület miatt, mely a 800. másodpercig tart). Ez idő alatt az egész autópálya szakaszon torlódott a forgalom, és a forgalmi sebesség 20 km/h alá lassul. Ehhez társul a felhajtón megjelenő közepes nagyságú felhajtani szándékozó forgalom (800 jm/h középértékű szinuszos gerjesztés). (36. ábra)

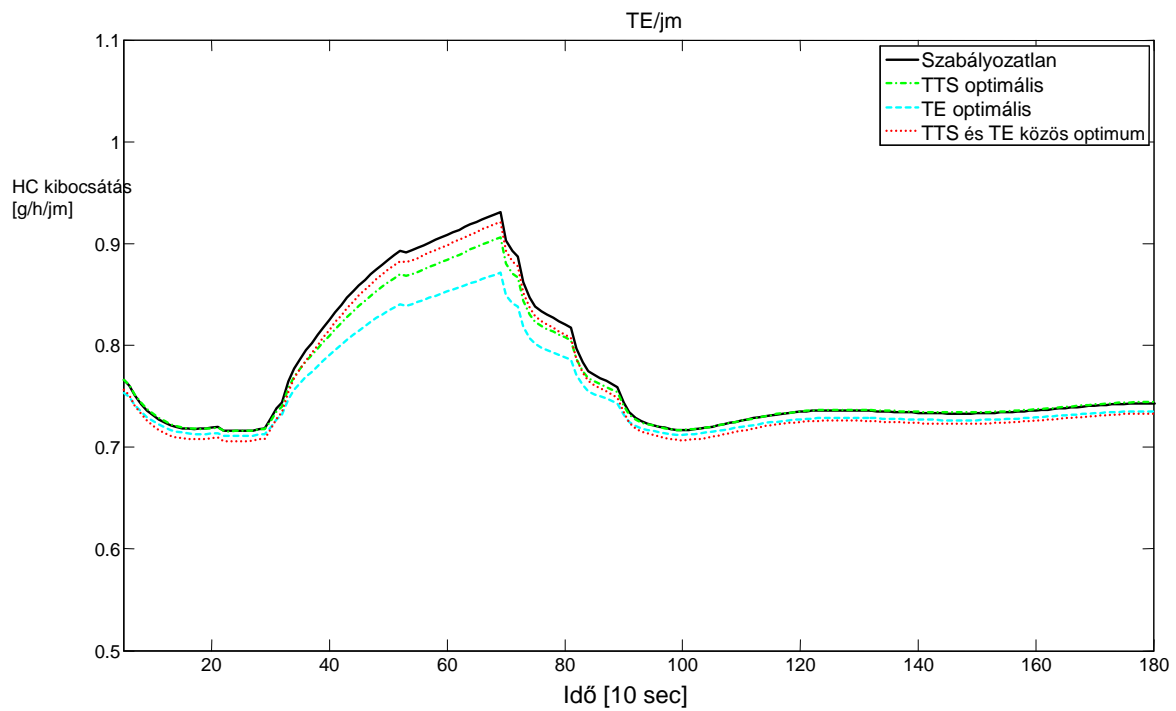
Az eset szimulációja segítségével vizsgálható a szabályzók dinamikája: reakciójuk a forgalmi helyzetre, és a költségfüggvények alakulása. A torlódást nem a szabályzók közbeavatkozása oldja fel, hanem magától szűnik meg: ugyanakkor az ez idő alatti változások tanulságosak.

A szabályzók reakcióját vizsgálva látható, hogy a leggyorsabb reagálású a többkritériumú szabályzó: ez a főpálya járműsűrűségét és forgalomnagyságát is optimalizálni törekszik. Ennél lassabban reagál a csak eljutási időt célzó szabályzó, ugyanakkor jobb fajlagos eljutási időket produkál: a felhajtón rekedő járműszám abban az esetben kisebb. A leglassabban rea-

gáló szabályzó az emissziót optimális szabályzó: csak akkor reagál, amikor már kialakult a torlódás, és a főpálya nagy járműsűrűsége jelentősen megnöveli a fajlagos kibocsátást.



37. ábra Járműegységre jutó eljutási idő – torlódás



38. ábra Járműegységre jutó időfajlagos HC kibocsátás – torlódás

6 Összefoglalás

Dolgozatomban az autópálya forgalomban keletkező károsanyag kibocsátást modelleztem, és a kibocsátást és eljutási időt optimalizáló szabályozót terveztem.

A szakirodalomban olvasott, kibocsátást optimalizáló szabályozók tervezését tekintve a szerzők nem számszerűen indokolták az emissziómodellezés megközelítését: bizonyos esetben makroszkopikus megközelítésű modellt alkalmaztak, más esetben mikroszkopikus, de a választás pontos indoklása minden esetben elmaradt. Dolgozatom első fejezetében egy olyan szimulációs programot készítettem, mellyel számszerűsíteni tudtam a különböző felbontású modellezések közötti különbségeket autópálya környezetben, és ezek eredményeként meg tudtam indokolni a későbbi szabályozás során használt emisszió modell választását. Beláttam, hogy az autópálya forgalom kibocsátását kellően pontosan jellemzi az egyváltozós modell. Ez ugyanakkor csak autópálya környezetben érvényes, szintbeli kereszteződésekből álló hálózatok (pl. város) esetén a gyorsulás mint változó elhanyagolása további vizsgálatot igényel.

Ezt követően a kiválasztott emissziófüggvény alkalmazásával modell alapú szabályozót terveztem. A nemlineáris autópálya modell linearizálását munkapont körül végeztem, így alkalmassá vált LQ szabályzásra. Az LQ szabályzás által potenciálisan bemenetre adható negatív bemenőjel elkerülése érdekében egy kiterjesztett LQ szabályzást, a szakaszonként lineáris szabályzót alkalmaztam. Mivel ezen szabályzó diszkrét rendszerekre való alkalmazásáról a szakirodalomban nem olvastam, levezettem az optimális állapotvisszacsatolást diszkrét rendszerekre. A szabályzott rendszert ellenőriztem robusztusság szempontjából: a szabályozatlan rendszer bizonytalanságát a nemlineáris és a linearizált rendszer közti multiplikatív hibával jellemeztem. A tervezett szabályzókat a kis erősítések tétele segítségével ellenőriztem.

A szabályozott rendszereken futatott szimulációkból kiderült, hogy a károsanyag kibocsátásban mérhető megtakarítás csupán néhány %-os nagyságrendű, de egy korszerű, gazdasági és társadalmi költségeket minimalizálni szándékozó közlekedésmérnöki tervezés során szükséges figyelembe venni egy többkritériumú optimalizálás során.

Jelen dolgozat – ami a forgalommodellezést és szabályozást illeti – szerény eszköztárat használt, ugyanakkor a tervezés megközelítésében és a problémák megoldásában igen fontos tapasztalatokat nyújtott.

A dolgozat témájához kapcsolódóan számos kutatási irány körvonalazódik: legközelebből tekintve a többkritériumú optimalizálás alkalmazása más szabályozástechnikai módszerekkel, más bemenőjelet alkalmazva; egy távolabbi megközelítésből a kibocsátás mértékének vizsgálata különleges forgalmi körülmények között (pl. lökéshullám); illetve, legtágabban vizsgálva a rendszer környezetének megváltoztatása: a kibocsátások vizsgálata városi környezetben.

Irodalomjegyzék

Bevezetés, I. fejezet

- [1] Tánczos Lászlóné, Török Ádám: A fenntartható közlekedés és a klímaváltozás kapcsolatának elemzése és értékelése. Környezetgazdaságtan PhD konferencia, Corvinus Egyetem, 2007.
- [2] Varga István; Kulcsár Balázs; Luspay Tamás; Tettamanti Tamás: Korszerű szabályozások a közúti forgalomirányításban. A Jövő Járműve - Járműipari Innováció 2008./1 34-36.
- [3] Az egyes légszennyezők legfontosabb egészségkárosító hatásai. ÁNTSZ, 2008.
- [4] WHO Air Quality Guideline – Global Update, 2005.
(www.euro.who.int/document/E87950.pdf)

II. fejezet

- [5] Hesham Rakha et al: Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions, Transportation Research Part D 9 (2004) 49–74
- [6] Kouridis, C., Ntzaichristos, L., Samaras, Z., 2000. Copert 3, Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport, User Manual (Version 2.1). European Environment Agency, Copenhagen.
- [7] Hesham Rakha et al: Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions, Transportation Research Part D 9 (2004) 49–74
- [8] Liping Xia et al.: Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong Island, Environmental Modelling & Software 20 (2005) 1175–1188
- [9] Solomon Kidane Zegeye, Bart De Schutter, Hans Hellendoorn, and Ewald Breunesse: Reduction of Travel Times and Traffic Emissions Using Model Predictive Control, 2009 American Control Conference June 10-12, 2009
- [10] Solomon K. Zegeye et al.: Model-based traffic control for balanced reduction of fuel consumption, emissions, and travel time, 12th IFAC Symposium on Transportation Systems, September 2-4, 2009
- [11] Turner-Fairbank: Traffic Flow Theory and Characteristics.
<http://www.tfhrc.gov/its/tft/tft.htm>
- [12] Coelho, Fariasa, Roupail: A methodology for modeling and measuring traffic and emission performance of speed control traffic signals. Atmospheric Environment, 39. 2367-2376. 2005.
- [13] Coelho, Fariasa, Roupail: Impact of speed traffic control signals on pollutant emissions. Transportation Research Part D, 10, 323-340. 2005.
- [14] Mustafa, Mohammed, Vougiaris: Analysis of pollutant emissions and concentrations at urban intersections. Institute of Transportation Engineers, Compendium of Technical Papers, Washington DC. 2003.
- [15] Joumard, Philippe, Vidon: Reliability of the current models of instantaneous emissions. The Science of the Total Environment 235, 133-142. 1999.

- [16] Rosquist, S.L.: Vehicular emission and fuel consumption for street characteristics in residential areas. Traffic Planning, Department of Technology and Society, Lund University. 2007.
- [17] Pandian, Gokhale, Ghoshal: Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections. Transportation Research Part D, 14, 180-196. 2009.

III. fejezet

- [18] L. Leclerq, S. Moutari: Hybridization of a class of second order models of traffic flow. Simulation Modelling Practice and Theory 15/2007. pp. 918–934
- [19] Tamás Luspáy, Balázs Kulcsár, István Varga: Macroscopic acceleration of traffic flow models. Draft material, 2009.
- [20] Mark Brackstone, Mike McDonald: Car-following: a historical review. Transportation Research Part F 2/1999. 181-196
- [21] Gazis, D.C., Herman, R. Rothery, R.W. Nonlinear follow the leader models of traffic flow. 1961. Opns. Res. 9, 545-567
- [22] S. P. Hoogendoorn and P. H. L. Bovy: State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 215(4):283–303, 2001.

IV. fejezet

- [23] Jozsef Bokor et al: Modern Control Theory, Lecture Notes. BUTE, 2010.
- [24] K.G Arvanitis, G. Kalogeropoulos: Guaranteed Stability Margins for Discrete-time LQ Optimal Regulators for the Performance Index with Cross-product Terms. Circuits Systems Signal Processing. Vol 16/1997, pp. 663-701.
- [25] K.G. Arvanitis, G. Kalogeropoulos and T.G. Koussiouris: Singular Value Properties of the Discrete-time LQ Optimal Regulator. Progress in system and robot analysis and control design, vol. 243/1999. pp 29-40
- [26] G.F. Wredenhagen, P.R. Belanger: Piecewise-linear control for systems with input constraints. Automatica, vol 36/1994. pp. 403-416.
- [27] K. Zhou, J.C. Doyle, K. Glover: Robust and Optimal Control. Prentice Hall, 1996. (ISBN: 0134565673 / 0-13-456567-3)
- [28] Jeffrey B. Burl: Linear Optimal Control, H_2 and H_{∞} Methods. Prentice Hall, 1998. (ISBN-10: 0201808684)
- [29] Michael Green, David Limebeer: Linear Robust Control. Prentice Hall, 1995. (ISBN 0-13-102278-4)
- [30] Zhang, Levinson: Ramp metering and freeway bottleneck capacity. Transportation Research Part A, Volume 44, Issue 4, May 2010.
- [31] Tamas Luspáy et al: Parameter-dependent modeling of freeway traffic flow. Transportation Research Part C, 2009. doi:10.1016/j.trc.2009.09.005

- [32] Markos Papageorgiou: Macroscopic modelling of traffic flow on the Boulevard Périphérique in Paris. Transportation Research Part B, Volume 23, Issue 1, February 1989, Pages 29-47.
- [33] Balázs, Németh: Control design of integrated adaptive cruise control system. Msc Thesis, 2009, BUTE.

Melléklet

Szimulációs eredmények: emissziómodellek összehasonlítása

HC

Gyenge forgalom – 1200 jm/h, 10 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
100 km/h	+4,49	+4,53	-0,63	-2,73
80 km/h	+14,54	+12,74	-3,15	-5,43
60 km/h	+11,65	+10,54	-9,19	-11,14

Sűrű forgalom, torlódás nélkül – 1800 jm/h, 24 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
80 km/h	+0,11	+0,13	-0,37	-0,14
60 km/h	+3,17	+4,07	-1,45	-2,77

Sűrű, torlódott forgalom – 1400 jm/h, 40 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
40 km/h	+0,74	+0,91	-0,45	-0,46

CO

Gyenge forgalom – 1200 jm/h, 10 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
100 km/h	+7,43	+6,10	-0,01	-3,86
80 km/h	+19,51	+15,46	-3,02	-7,35
60 km/h	+12,44	+10,36	-11,29	-15,44

Sűrű forgalom, torlódás nélkül – 1800 jm/h, 24 jm/km $v_{eq}=83$

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós

	zós			
80 km/h	+0,73	+0,03	-0,70	-0,06
60 km/h	+3,26	+3,67	-0,84	-3,76

Sűrű, torlódott forgalom – 1400 jm/h, 40 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
40 km/h	+0,45	+0,49	-0,24	-0,32

CO₂

Gyenge forgalom – 1200 jm/h, 10 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
100 km/h	+1,55	+2,59	-0,75	-1,59
80 km/h	+6,02	+7,07	-2,37	-3,78
60 km/h	+7,62	+9,07	-7,03	-8,82

Sűrű forgalom, torlódás nélkül – 1800 jm/h, 24 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
80 km/h	+0,22	+0,12	-0,10	-0,22
60 km/h	+2,52	+4,50	-1,65	-2,79

Sűrű, torlódott forgalom – 1400 jm/h, 40 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
40 km/h	+0,95	+1,15	-0,54	-0,64

NO_x

Gyenge forgalom – 1200 jm/h, 10 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
100 km/h	+2,23	+6,09	-1,15	-1,689
80 km/h	+11,22	+18,07	-5,63	-6,68
60 km/h	+15,63	+21,07	-14,15	-17,28

Sűrű forgalom, torlódás nélkül – 1800 jm/h, 24 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
80 km/h	+0,15	+0,18	-0,57	-0,26
60 km/h	+3,11	+4,42	-3,28	-6,03

Sűrű, torlódott forgalom – 1400 jm/h, 40 jm/km

Sebességkorlát	Eltérés mikroszkopikus modelltől [%]			
	Lassítási fázis		Gyorsítási fázis	
	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós	Mezo kétváltozós	Mezo egyváltozós
40 km/h	+2,01	+2,35	-1,20	-1,31

Matlab kódok

Mikroszkopikus forgalom és emisszió szimulátor

simulation_cf_allpollutants.m

A fájl a szimulációhoz szükséges fájlokat (lásd alább) hívja meg, és kirajzolja az eredményt.

init_cf_macrodata_onelimit.m

A fájl a szimuláció kezdeti értékeit, és bemenő paramétereit kérdezi le, és kiszámítja az első jármű $x(t)$, $v(t)$, $a(t)$ görbéit. (Algoritmus: 1. lépés.)

car_follow_small_simstep.m

A forgalom többi résztvevőjének trajektóriáit, $v(t)$, és $a(t)$ függvényét számítja ki. (Algoritmus: 2. lépés)

cf_LD_meas_NOX.m

Végrehajtja a térbeli és időbeli diszkretizációt: a lefutott szimulációt felbontja időbeli és térbeli szakaszokra. A diszkrét tér-idő kontinuumon megállapítja a járművek tartózkodási helyét, és ez alapján rekonstruálja a hurokdetektoros forgalomsebesség méréseket. Kiszámítja a makroszkopikus gyorsulást. (Algoritmus: 3-5. lépés.)

cf_LD_meas_NOX.m/cf_LD_meas_CO2.m/cf_LD_meas_CO.m/cf_LD_meas_HC.m

Kiszámítják az egyes szennyezők emisszió-idő függvényeit a forgalomra, illetve az egy-és kétváltozós mezoszkopikus mérések relatív hibáit. (Algoritmus: 6-7. lépés.)

LDV_CO.m/LDV_CO2.m/LDV_HC.m/LDV_NOX.m cd-n: 3.6ra vigyazni

Függvények; a VT-Micro modell emissziófüggvényei, a pillanatnyi sebesség és gyorsulás alapján számítják a pillanatnyi időfajlagos fogyasztást.

Szabályozók

inditas.m

A szabályozatlan, illetve az eljutási idő optimális szabályozáshoz szükséges linearizált rendszer munkapontjait és A, B, C, D mátrixait számítja ki. Meghívott függvények: myfun_rhorogz.m

inditas_emopt.m

Az emisszió optimális szabályozáshoz szükséges linearizált rendszer munkapontjait és A, B, C, D mátrixait számítja ki. Meghívott függvénye: myfun_emission.m

inditas_tradeoff.m

Az emisszió és eljutási idő közös optimumát célzó szabályozáshoz szükséges linearizált rendszer munkapontjait és A, B, C, D mátrixait számítja ki. Meghívott függvénye: myfun_TTS_em.m

myfun_rhorogz.m/myfun_emission.m/myfun_TTS_em.m

Függvények, melyek tartalmazzák a linearizált modell meghatározásához szükséges hat ismeretlenes egyenletrendszereket, melyekből az állandósult állapotbeli munkapontok számíthatóak. Az indítás kezdetű fájlok ezeket az egyenletrendszereket oldják meg az `fsolve` nevű beépített Matlab parancs segítségével.

LQ_TTS.m

Az optimális eljutási időt (TTS) célzó szakaszonként lineáris szabályozás állapotvisszacsatolásának erősítését számítja. Kiszámítja az állapot súlyokat, elvégzi a külső és belső iterációt, mellyel az invariáns halmaz egyenlete és az optimális bemenőjel súlyozás ismertté válik.

LQ_TE.m

Az optimális kibocsátást (TE) célzó szakaszonként lineáris szabályozás állapotvisszacsatolásának erősítését számítja. Kiszámítja az állapot súlyokat, elvégzi a külső és belső iterációt, mellyel az invariáns halmaz egyenlete és az optimális bemenőjel súlyozás ismertté válik.

LQ_TTS_TE.m

Az eljutási idő és kibocsátás közös optimumát célzó (TTS+TE) szakaszonként lineáris szabályozás visszacsatolásának erősítését számítja. Kiszámítja az állapot súlyokat, elvégzi a külső és belső iterációt, mellyel az invariáns halmaz egyenlete és az optimális bemenőjel súlyozás ismertté válik.

metanet_fun.m

System function, azaz rendszerfüggvény, mely a linearizált másodrendű makroszkopikus modellt mint diszkrét idejű rendszert írja le. Tartalmazza a rendszer állapotdinamikai és mérési egyenletét. A `motorway_stretch` nevű Simulink fájl futása során az autópálya forgalom volta-képpen modellezését ezzel végzi.

metanet_fun_TTS.m

Rendszerfüggvény, mely a teljes eljutási idő optimalizálásához használt linearizált másodrendű makroszkopikus modellt mint diszkrét idejű rendszert írja le. Tartalmazza a rendszer állapotdinamikai és mérési egyenletét.

metanet_fun_emission.m

Rendszerfüggvény, mely az összes kibocsátást optimalizálásához használt linearizált másodrendű makroszkopikus modellt mint diszkrét idejű rendszert írja le. Tartalmazza a rendszer állapotdinamikai és mérési egyenletét.

metanet_fun_emission_TTS.m

Rendszerfüggvény, mely az összes kibocsátás és teljes eljutási idő közös optimalizálásához használt linearizált másodrendű makroszkopikus modellt mint diszkrét idejű rendszert írja le. Tartalmazza a rendszer állapotdinamikai és mérési egyenletét.

Sim_results.m

A `motorway_stretch` Simulink fájl futtatásának eredményeit összesíti és kirajzolja.

Robusztusság vizsgálat

Fsolve_megoldja.m, my_fun_rhorogz.m

A linearizált rendszer munkapontjait és A, B, C, D mátrixait számítja ki. Az állandósult állapotbeli munkapontokat leíró egyenletrendszereket oldják meg az fsolve nevű beépített Matlab parancs segítségével.

Metanet_fun.m

Rendszerfüggvény, mely a linearizált másodrendű makroszkopikus modellt mint diszkrét idejű rendszert írja le. Tartalmazza a rendszer állapotdinamikai és mérési egyenletét. A motorway_stretch nevű Simulink fájl futása során az autópálya forgalom voltaképpen modellezését ezzel végzi.

Masodrendu.m

A nemlineáris makroszkopikus forgalmi modell egyenleteit tartalmazza és számítja a szimuláció során.

SGT.m

Kiszámítja a zárt, szabályzott hurkok erősítését az egyes kimeneti csatornákon. Ezen számításokra és a szimulált bizonytalanságokra ellenőrzi a kis erősítések tételét.

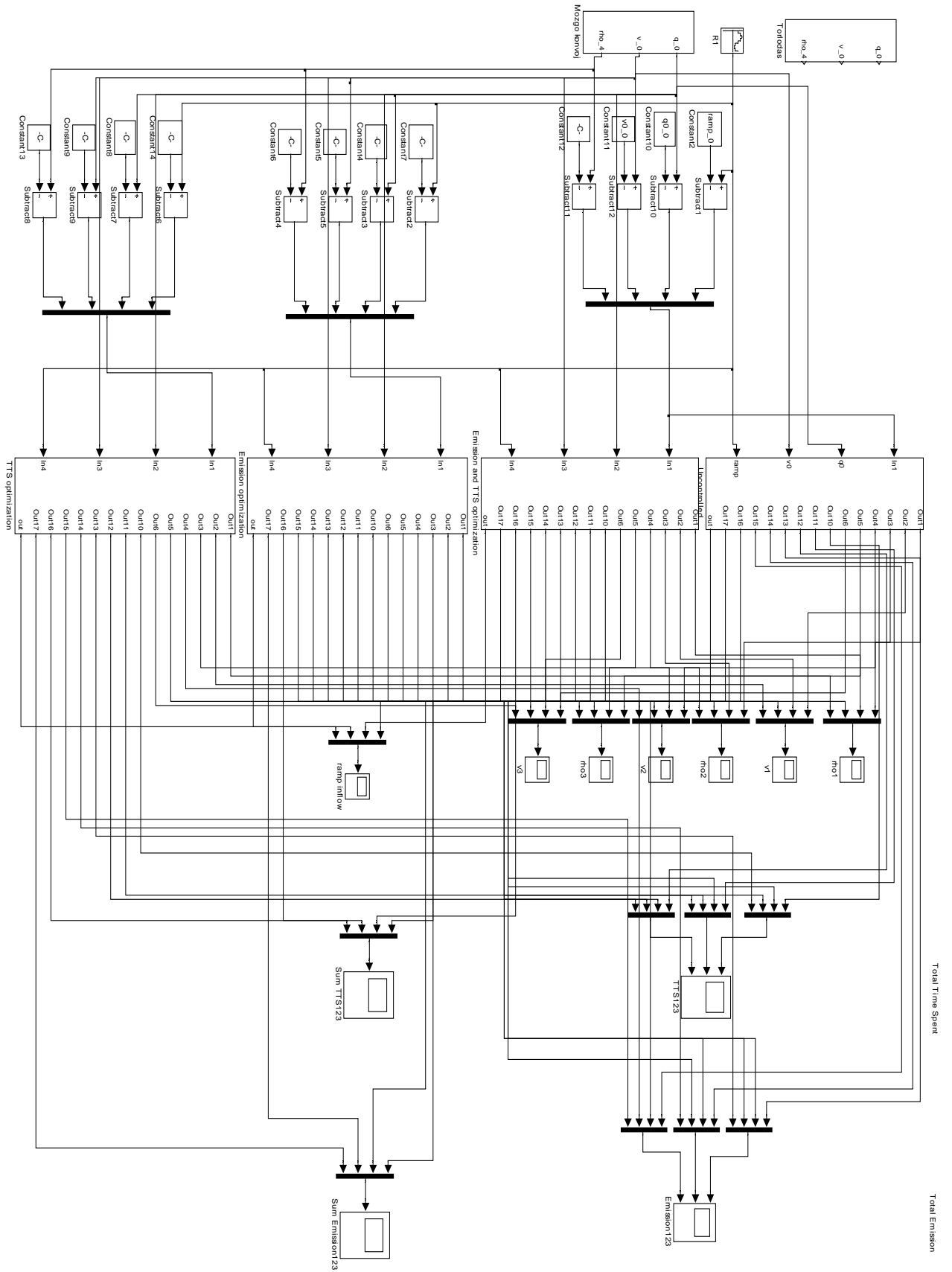
Uncertainty.m

A szimuláció során a linearizált és nemlineáris modellek között kapott különbségeket – a kimeneti csatornákon mérhető bizonytalanságokat – rajzolja ki.

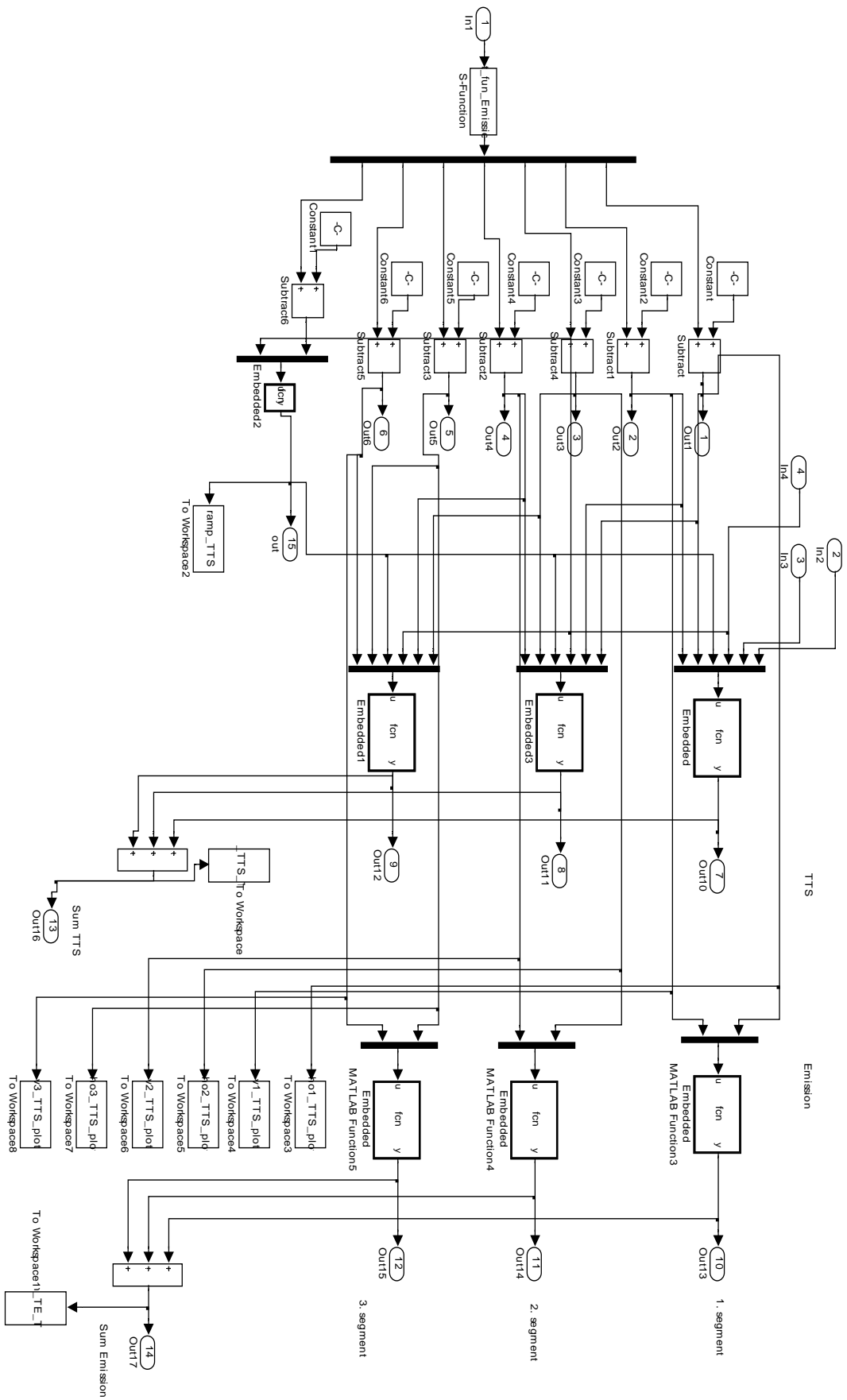
Gain_margins.m

A szakaszonként lineáris szabályzók robusztusságát biztosító elméleti legnagyobb erősítési tartalékot számítja. Ezen fájl csupán ellenőrzésre szolgált: az általa számított érték minden esetben nagyobb volt a valódi bizonytalanságnál.

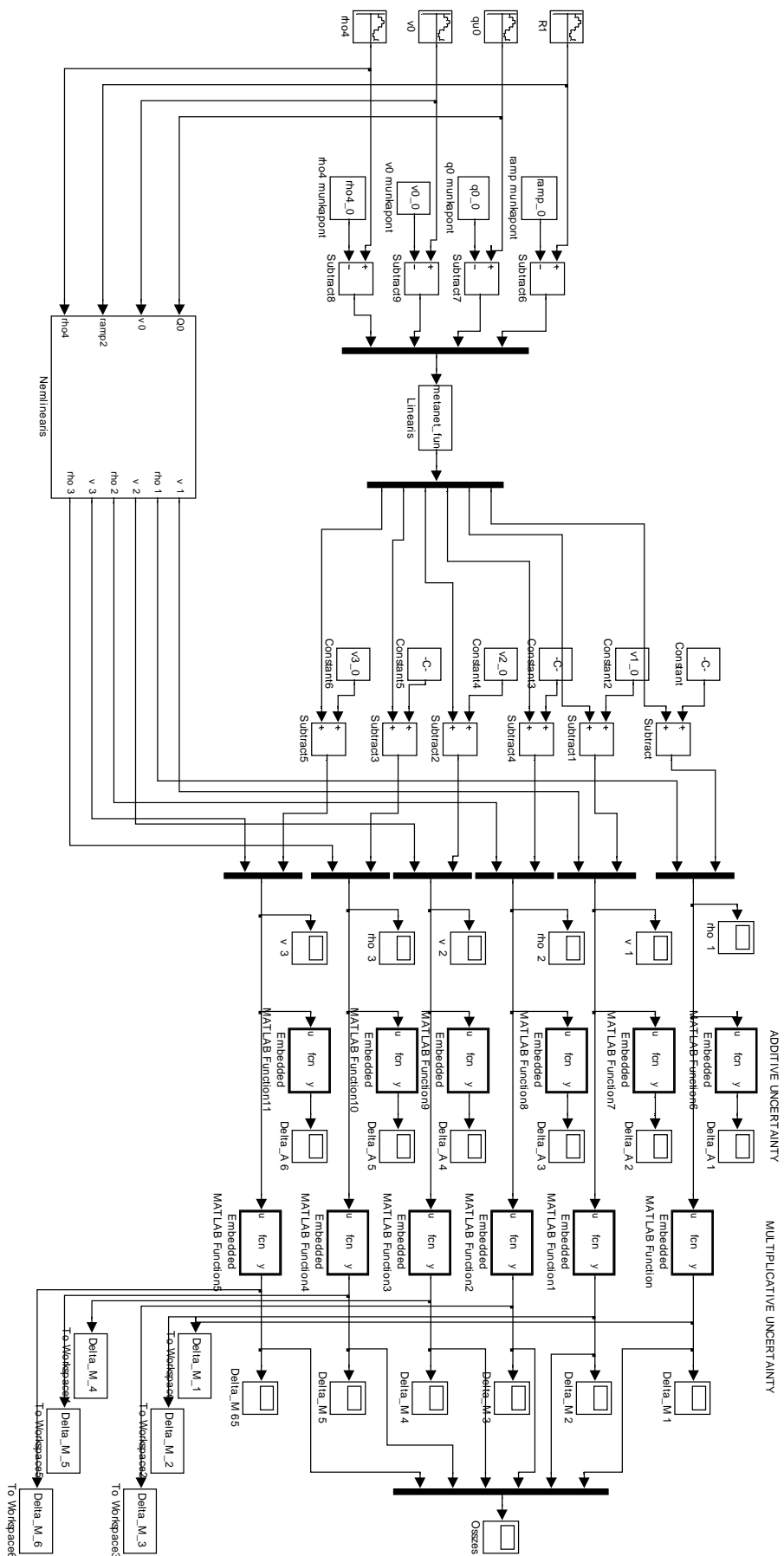
Simulink blokkok



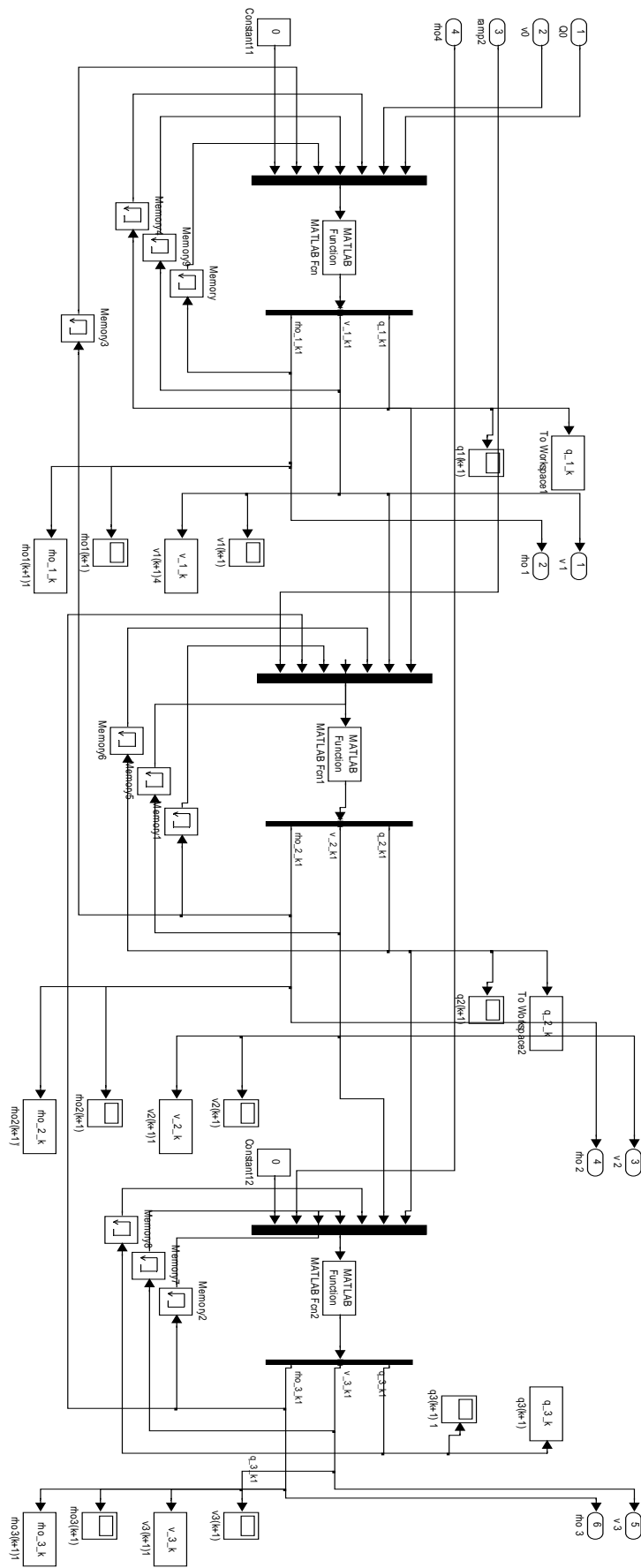
39. ábra Összeállítás a szabályók összehasonlításához



40. ábra Egy szabályzó kimenetei és költségfüggvényei



41. ábra Összeállítás a robusztusság vizsgálatához



42. ábra Robusztusság vizsgálata: nemlineáris modell