



Komplex forgalmi-emissziós modell forgalomirányítási alkalmazásának vizsgálata autópályán

Csikós¹ A., Varga² I.

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésautomatikai Tanszék. 1111 Budapest, Stoczek utca 2.

²MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet. 1111 Budapest, Kende utca 13-17.

ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünk az autópálya forgalom belsőégésű motoraiból származó kibocsátás modellezésével foglalkozik. A kibocsátási modellek rövid áttekintését követően a meglévő forgalmi modellekhez illesztünk egy kiválasztott kibocsátási modellt, majd a létrehozott komplex modelleken elemezzük a forgalomtechnikai és emissziós optimumok egyidejű megvalósíthatóságának kérdéseit. A vizsgálat tanulságai alapján szabályozási célokat tűzünk ki, egy eseten elemezzük a forgalmat stabilizáló szabályzás emisszióra gyakorolt hatását. (Kulcsszavak: közúti forgalom és emisszió modellezés, autópálya-forgalom szabályzás, Matlab)

ABSTRACT

Analysis of a complex traffic-emission model for motorway control

A. Csikós¹, I. Varga²

¹Budapest University of Technology and Economics, Department of Control and Transport Automation H-1111 Budapest Stoczek u. 2.

²Hungarian Academy of Sciences, Systems and Control Laboratory, Computer and Automation Research Institute
H-1111 Budapest, Kende utca 13-17.

In this paper a modeling method is proposed for characterising traffic emission as a function of macroscopic variables on freeways. Optimization possibilities of travel times and traffic emission as concurrent cost functions are investigated. Based on the edification of the analysis control objectives are set and as a case study, ramp metering is brought to the proof of accomplishing traffic stabilization respecting emission limits. (Keywords: traffic emission modeling, freeway traffic control, Matlab)

BEVEZETÉS

A közúti forgalom által okozott károsanyag kibocsátás folyamatosan növekvő mértéke napjaink egyik legégetőbb problémája. Célunk a kibocsátott szennyezőanyagok mennyiségének és összetételének modern irányításelméleti eszközökkel történő optimalizálása. A szabályozási célok megfogalmazásához és az eszközök kiválasztásához azonban mindenekelőtt a károsanyagok termelődését leíró modellek vizsgálata szükséges.

A cikk az autópályán keletkező kibocsátás modellezésével foglalkozik. Az emissziós modellek rövid áttekintését követően a makroszkopikus forgalmi mérések alapján történő modellezést elemezzük, egy forgalmi modellhez illesztünk egy kiválasztott kibocsátási modellt. A komplex modellek tanulságai alapján szabályozási célokat tűzünk ki és egy eseten vizsgáljuk egy forgalmat stabilizáló szabályzás kibocsátási korlátjának megvalósulását.

FORGALMI EMISSZIÓS MODELLEK

A közúti kibocsátás jellemzésére számos meglévő modell szolgál. A modelleket felbontásuk szerint két csoportra oszthatjuk: mikroszkopikus és makroszkopikus modellekre. A makroszkopikus modelleket tovább csoportosíthatjuk a felhasznált forgalmi változók szerint. Az emissziómodellek áttekintését (példákkal) az 1 táblázat tartalmazza.

1. táblázat

Forgalmi emissziómodellek

Név (1)	VT-Micro	Copert	HBEFA	Artemis
Felbontás (2)	mikroszkopikus (3)	makroszkopikus (4)	makroszkopikus	makroszkopikus
Forgalmi változók (5)	pill. sebesség, pill. gyorsulás (6)	forgalmi átlagsebesség (7)	forgalomnagyság (8)	forgalmi átlagsebesség

Table 1: Vehicular emission models

Name(1), Resolution(2), Microscopic(3), Macroscopic(4), Traffic variables(5), Instantaneous speed, instantaneous acceleration(6), Traffic mean speed(7), Traffic flow(8)

Autópályán haladó forgalom kibocsátásának modellezését végezhetjük mikroszkopikus emissziómodellekből kiindulva, amennyiben feltételezzük, hogy a járművek pillanatnyi sebessége megegyezik az autópálya térben és időben diszkrét forgalomtechnikai méréseivel. Az aggregált forgalmi emissziót a szintén forgalomtechnikai mérésekből származó forgalmi változóval számíthatjuk. A fenti megfontolásokat figyelembe véve a rendelkezésre álló forgalmi adatokból legpontosabban a Copert és a VT-Micro modell alapján modellezhető az autópálya forgalom kibocsátása. Az előbbi folyamatosan frissített és részletes adatbázissal rendelkezik az elmúlt 20 évben Európában jellemzően előforduló járműosztályok és erőforrástípusok (lökettérfogat és környezetvédelmi besorolás szerinti) emissziófüggvényeiről. A VT-Micro modell alapvetően amerikai járműtípusokra készült, ezen járművek fogyasztása és kibocsátása azonban jelentősen eltér az Európában elterjedt járművektől. A HBEFA és Artemis modellek adatbázisa kevésbé gazdag, így a választás a Copert (Kouridis et al., 2000) modellre esett.

MAKROSZKOPIKUS EMISSZIÓ MODELLEZÉS A COPERT MODELL ALAPJÁN

A Copert kibocsátási modell szerint egy jármű pillanatnyi távolságfajlagos kibocsátását egy szakaszon egy polinomiális függvény jellemzi. (A következőkben jelölje $e_{j,i}^p(t)$ a távolságfajlagos kibocsátást.)

$$e_{j,i}^p(t) = \alpha_2^{p,c} \cdot v_{j,i}^{p,c}(t)^2 + \alpha_1^{p,c} \cdot v_{j,i}(t) + \alpha_0^{p,c} = [g / km] \quad (1)$$

ahol: $e_{j,i}^p(t)$: a 'j.' jármű pillanatnyi távolságfajlagos kibocsátása [g/km],
 c: járműosztály,
 $v_{j,i}(t)$: 'j.' jm 'i.' szakaszon mért pillanatnyi sebessége [km/h],
 $\alpha_2^c, \alpha_1^c, \alpha_0^c$: járműosztálytól függő modellparaméterek,
 p: szennyező típusa.

$e_{j,i}^p(t)$ az a kibocsátás, melyet az adott jármű egy km megtétele alatt végez, amennyiben mindvégig ez a pillanatnyi sebessége.

Időben diszkretizálva:

$$e_{j,i}^p(k) = \alpha_2^{p,c} \cdot v_{j,i}^2(k) + \alpha_1^{p,c} \cdot v_{j,i}(k) + \alpha_0^{p,c} = [g / km] \quad (2)$$

ahol: $e_{j,i}^p(k)$: 'j.' jármű átlagos távolságfajlagos kibocsátási szintje 'k.'

lépésközben [g/km] 'i' szakaszon,

p: szennyező típusa,

c: járműosztály,

$v_{j,i}(k)$: 'j.' jm 'i.' szakaszon mért átlag sebessége a 'k.' lépésközben [km/h],

$\alpha_i^{p,c}$: járműosztálytól és szennyezőtől függő modellparaméterek,

k: diszkrét idejű lépésköz.

Inhomogén forgalom esetén: tegyük fel, hogy a forgalom összetétele ismert:

$$q_i(k) = \sum_{c=1}^{n_c} q_i^c(k) = \sum_{c=1}^{n_c} \gamma_c(k) \cdot q_i(k) \quad (3)$$

Homogén áramlás esetén (valamennyi járműosztály azonos forgalmi sebességet vesz fel) fennáll:

$$\rho_i(k) = \sum_{c=1}^{n_c} \rho_i^c(k) = \sum_{c=1}^{n_c} \gamma_c(k) \cdot \rho_i(k) \quad (4)$$

ahol: γ_c : 'c' járműtípus részvételi aránya a forgalomban [-],

n_c : járműosztályok száma,

q_i : 'i' szakasz forgalomnagysága [jm/h],

q_i^c : 'c' járműtípus 'i' szakaszon megjelenő forgalomnagysága [jm/h],

ρ_i : 'i' szakasz forgalomsűrűsége [jm/km],

ρ_i^c : 'c' járműtípus 'i' szakaszon megjelenő forgalomsűrűsége [jm/km].

Inhomogén forgalom 'c' forgalomosztályának kibocsátása járművenként:

$$e_i^{p,c}(k) = \alpha_2^{p,c} \cdot v_i^2(k) + \alpha_1^{p,c} \cdot v_i(k) + \alpha_0^{p,c} \quad (5)$$

ahol: $e_i^{p,c}(k)$: a forgalom 'i.' szakaszon jell. távolságfajlagos kibocsátása [g/km],

p: szennyező típusa,

c: járműosztály,

$v_i(k)$: 'i.' szakaszon jellemző forgalmi átl.seb. a 'k.' lépésközben [km/h],

$\alpha_2^{p,c}$: járműosztálytól és szennyezőtől függő modellparaméterek,

k: diszkrét idejű lépésköz.

$$e_i^p(k) = \sum_{c=1}^{n_c} \gamma_c \cdot e_i^{p,c}(k) \quad (6)$$

A távolságfajlagos kibocsátás vizsgálható járműfajlagosan (1) és **teljes forgalomra vonatkozóan**. A két függvény közötti összefüggés:

$$E_i^p(k) = \rho_i(k) \cdot e_i^p(k) = [g / km] \quad (7)$$

ahol: $E_i^p(k)$ a teljes forgalom távolságfajlagos kibocsátása p szennyezőből az 'i'. szakaszon.

A (6) egyenletet behelyettesítve (7)-be és (4)-et felhasználva írható:

$$E_i^p(k) = \rho_i(k) \cdot \sum_{c=1}^{\alpha_c} e_i^{p,c}(k) = \sum_{c=1}^{\alpha_c} \gamma_c(k) \cdot \rho_i(k) \cdot \sum_{c=1}^{\alpha_c} e_i^{p,c}(k) \quad (8)$$

Így a teljes forgalom távolságfajlagos kibocsátása:

$$E_i^p(k) = \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \gamma_c(k) \cdot e_i^{p,c}(k) = \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \left[\gamma_c(k) \cdot (\alpha_2^{p,c} \cdot v_i^2(k) + \alpha_1^{p,c} \cdot v_i(k) + \alpha_0^{p,c}) \right] \quad (9)$$

KOMPLEX FORGALMI-EMISSZIÓS MODELLEK

Autópályán a korszerű forgalomirányító stratégiák a teljes eljutási idő minimalizálását célozzák meg (Papageorgiou és Kotsialos, 2002), ennek teljesítéséből azonban nem következik egyértelműen a kibocsátás minimalizálása. Hogy össze tudjuk vetni a szabályozási célokat, valamennyi függvényt egyazon független változóval kell jellemeznünk. Felmerül tehát a kérdés, hogy leírható-e a kibocsátás a forgalomsűrűség függvényeként. Ennek vizsgálatát ismerteti a fejezet.

Sebesség-sűrűség összefüggések elemzése

Ahhoz, hogy a sebesség függvényeként jellemzett emisszió egyenleteibe a járműsűrűség összefüggését behelyettesítve egyértelmű megfeleltetést kapjunk a sűrűség és a kibocsátás között, szükséges a sebesség-sűrűség függvények vizsgálata egyértelműség szempontjából. Elsőrendű modellek esetén egy adott autópálya szakaszon jellemző forgalmi átlagsebességet a forgalomsűrűség egyértelmű függvényeként írhatjuk:

$$v_i = V(\rho_i) \quad (10)$$

ahol: v_i : i. szakasz forgalmi átlagsebessége [km/h],
 ρ_i : i. szakasz járműsűrűsége [jm/km].

A (10) egyenletet a forgalomelméletben egyensúlyi sebesség összefüggésnek nevezzük. Szigorúan monoton függvény, tehát kölcsönösen egyértelmű megfeleltetést ad, így egy összetett függvény belső függvényét képezheti.

Másodrendű modellezés esetén nincs egyértelmű sebesség hozzárendelés a forgalomsűrűség függvényében, a szakaszon jellemző sebességet leíró momentumegyenlet egy többváltozós függvényként írja le. Így ha egy szakaszra jellemző kibocsátás egyetlen változóval való leírására törekszünk, az elsőrendű modellezést kell alkalmaznunk.

Az elsőrendű modell egyensúlyi sebességfüggvényére számos modell létezik.

pl. Greenshields:

$$V(\rho) = v_{free} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right) \quad (11)$$

pl. Papageorgiou:

$$V(\rho) = v_{free} \cdot \exp \left(- \frac{1}{a} \left(\frac{\rho}{\rho_{krit}} \right)^a \right) \quad (12)$$

ahol: ρ_{max} : maximális járműsűrűség [jm/km],
 ρ_{krit} : kritikus járműsűrűség [jm/km],
 v_{free} : szabadáramlási sebesség [km/h],
 a : konstans paraméter.

Egyváltozós járműfajlagos kibocsátás

Az egyetlen változóval, a forgalomsűrűséggel jellemzett kibocsátásfüggvényt a (10) összefüggés (6) egyenletbe helyettesítése után kaphatjuk.

$$ep_i^{p,c} = ep_i^{p,c}(v_i(\rho_i)) \quad (13)$$

$$ep_i^{p,c}(k) = \alpha_2^{p,c} \cdot \left(v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{krit}} \right)^a \right) \right)^2 + \alpha_1^{p,c} \cdot \left(v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{krit}} \right)^a \right) \right) + \alpha_0^{p,c} = [g / km / jm] \quad (14)$$

A zárójeleket felbontva az alábbi alakhoz jutunk:

$$ep_i^{p,c}(k) = \alpha_2^{p,c} \cdot v_{free}^2 \cdot \exp\left(-\frac{2}{a} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{krit}} \right)^a \right) + \alpha_1^{p,c} \cdot v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{krit}} \right)^a \right) + \alpha_0^{p,c} = [g / km / jm] \quad (15)$$

A forgalom egészére jellemző, átlagos járműfajlagos kibocsátás:

$$ep_i^p(k) = \sum_{c=1}^{n_c} \gamma_c \cdot ep_i^{p,c}(k) \quad (16)$$

Egyváltozós teljes forgalmi kibocsátás

(9) alapján:

$$E_i^p(k) = \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \gamma_c(k) \cdot e_i^{p,c}(k) = \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \left[\gamma_c(k) \cdot (\alpha_2^{p,c} \cdot v_i^2(k) + \alpha_1^{p,c} \cdot v_i(k) + \alpha_0^{p,c}) \right] \quad (17)$$

A sűrűség függvényeként felírva:

$$\begin{aligned} E_i^p(k) &= \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \gamma_c(k) \cdot e_i^{p,c}(k) = \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \left[\gamma_c(k) \cdot (\alpha_2^{p,c} \cdot v_i^2(k) + \alpha_1^{p,c} \cdot v_i(k) + \alpha_0^{p,c}) \right] \\ EP_i^p(k) &= \rho_i(k) \sum_{c=1}^{\alpha_c} \gamma_c(k) \cdot ep_i^{p,c}(k) = [g / km] \\ &= \sum_{c=1}^{\alpha_c} \gamma_c(k) \cdot \left(\alpha_2^{p,c} \cdot \rho_i(k) \cdot v_{free}^2 \cdot \exp\left(-\frac{2}{a} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{krit}} \right)^a \right) - \alpha_1^{p,c} \cdot \rho_i(k) \cdot v_{free} \cdot \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{krit}} \right)^a \right) + \alpha_0^{p,c} \cdot \rho_i(k) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

EMISSZIÓFÜGGVÉNYEK ÖSSZEVETÉSE

A fejezet célja a kétféle járműfajlagos (sebesség és sűrűségváltozós), illetve a teljes forgalmi kibocsátás kétváltozós, illetve egyváltozós változatainak ábrázolása.

Járműfajlagos kibocsátásfüggvények

A forgalom egészét jellemző járműfajlagos függvényeket egy adott forgalomösszetételen jellemezzük. A forgalomösszetételt, mely 10 járműosztályt tartalmaz, és reprezentálja a statikus forgalomállandó 64,5%-át, az OTKA CNK 78168 kutatási jelentés (2009-2010) alapján állítottuk össze (2. táblázat).

A járműfajlagos kibocsátásfüggvények diagramjait ábrázolja az 1. - 4. ábra. Az ábrákon az egyes járműosztályok emissziófüggvényei, és a teljes forgalomra vonatkozó járműfajlagos emissziófüggvények (melyek a járműosztályok emissziófüggvényeinek lineáris kombinációjaként kapunk (6),(16). A diagramokon látszik, hogy mindkét változó (sebesség és sűrűség) esetén konvex függvényt kapunk – ezt a független változók közti kölcsönös egy-egy értelműsége okozza.

2. táblázat

Modellezett forgalomösszetétel

Járműtípus (1)	Erőforrás típusa, normája (2)	Arány [%] (3)
Személygépkocsi (4)	Benzin, Euro1	19,22
	Benzin, Euro3	19,22
	Dízel, Euro1	15,08
	Dízel, Euro3	15,62
Haszongépjármű <3.5t (5)	Benzin, Euro1	4,49
	Benzin, Euro3	2,67
	Dízel, Euro1	3,08
	Dízel, Euro3	3,08
Tehergépjármű >3.5t (6)	Benzin, Euro1	9,04
	Benzin, Euro3	5,38
	Dízel, Euro1	6,20
Összesen		100,00

Table 2: Modeled traffic composition

Vehicle type(1), Emission standard(2), Proportion(3), PC(4), LDV(5), HDV(6)

1. ábra

Járműfajlagos CO kibocsátásfüggvények

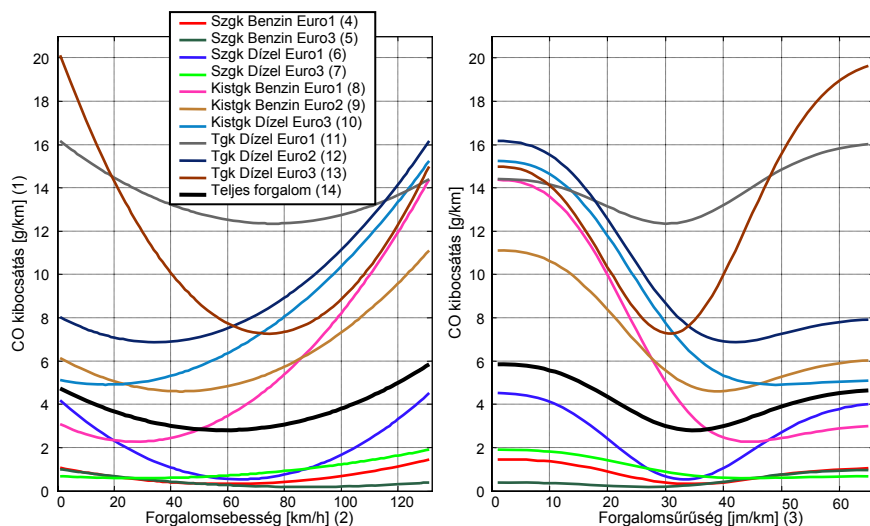


Figure 1: CO emission functions as functions of traffic speed and density

CO emission [g/km](1), Traffic speed [km/h](2), Traffic density [vehicles/km](3), PC gasoline Euro1(4) PC gasoline Euro3(5), PC diesel Euro1(6), PC diesel Euro3(7), LDV gasoline Euro1(8), LDV gasoline Euro2(9), LDV diesel Euro3(10), HDV diesel Euro1(11), HDV diesel Euro2(12), HDV diesel Euro3(13), Total traffic(14)

2. ábra

Járműfajlagos HC kibocsátásfüggvények

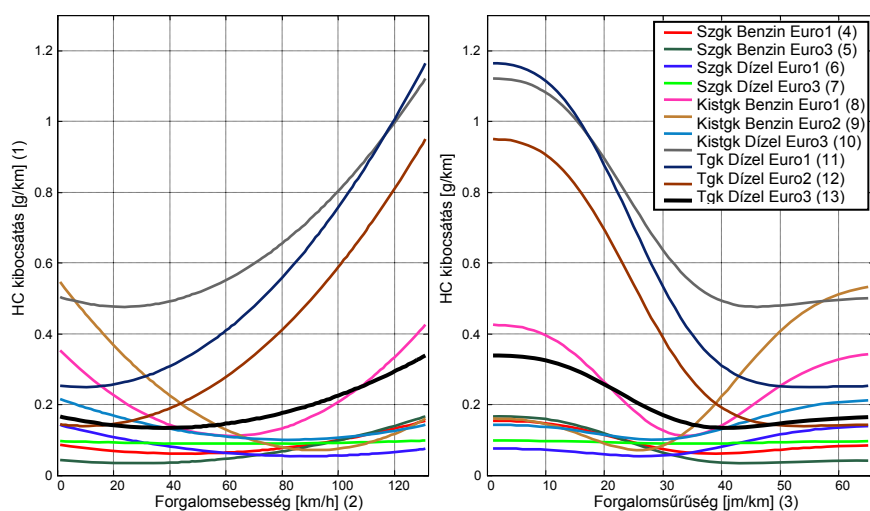


Figure 2: HC emissions as functions of traffic speed and density

HC emission [g/km](1), See Figure 1

3. ábra

Járműfajlagos CO₂ kibocsátásfüggvények

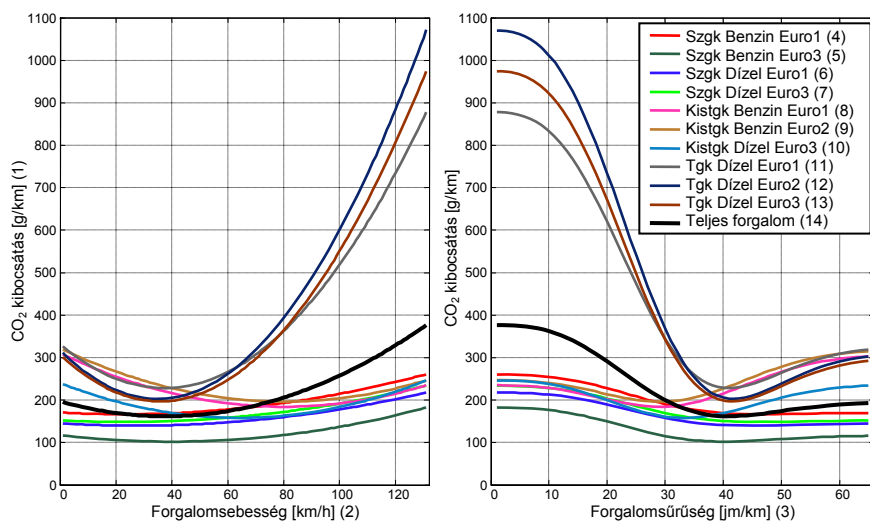


Figure 3: CO₂ emissions as functions of traffic speed and density

CO₂ emission [g/km](1), See Figure 1

4. ábra

Járműfajlagos NO_x kibocsátásfüggvények

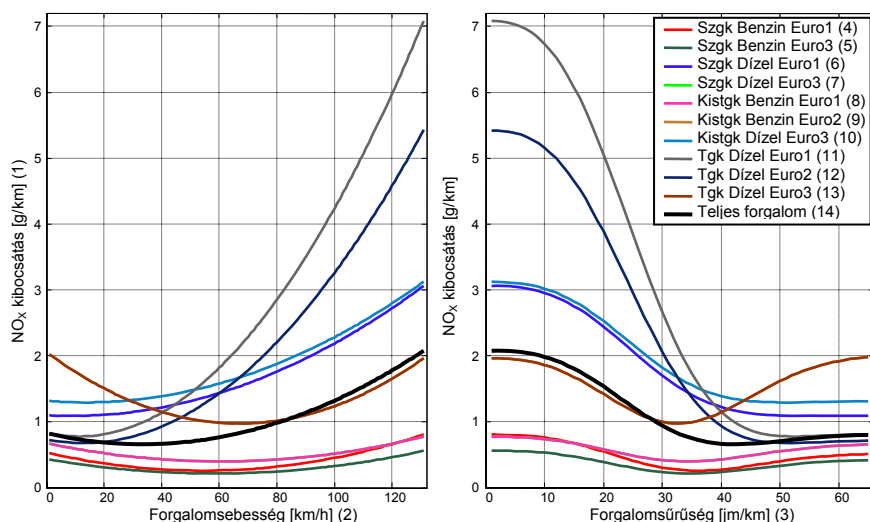


Figure 4: NO_x emissions as functions of traffic speed and density

NO_x emission [g/km](1), See Figure 1

A kétváltozós járműfajlagos emissziófüggvényeket példaként a dízel, Euro1-es normájú személygépkocsik CO kibocsátási függvényeire háromdimenziós ábrázoláson követhetjük nyomon. A térbeli görbe az 5. ábrán, síkvetületei a 6. - 8. ábrákon láthatóak. A kétváltozós függvények síkvetületeiként a sebesség-sűrűség egyensúlyi összefüggést, illetve a sebesség- és sűrűségváltozós egyváltozós kibocsátásfüggvényeket.

5. ábra

Járműfajlagos CO kibocsátás (Dízel, Euro1 személygépkocsi)

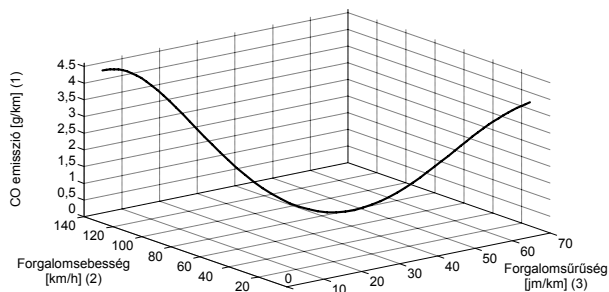


Figure 5: CO emission per vehicles as a bivariate function of traffic mean speed and traffic density (Diesel Euro1 PC)

CO emission [g/km](1), Traffic speed [km/h](2), Traffic density [vehicles/km](3)

6. ábra

Síkvetület: független változók közti összefüggés (Dízel, Euro1 szgk. CO kibocsátás)

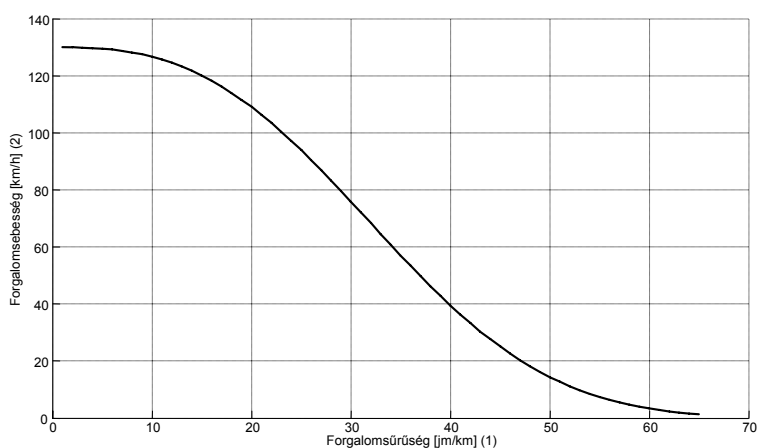


Figure 6: Planar projection: Relationship between independent variables: equilibrium density-speed function (PC diesel Euro1, CO emission)

Traffic density [vehicles/km](1), Traffic speed [km/h](2)

7. ábra

Síkvetület: járműfajlagos emisszió a forgalomsűrűség függvényében (Dízel Euro1 szgk. CO kibocsátás)

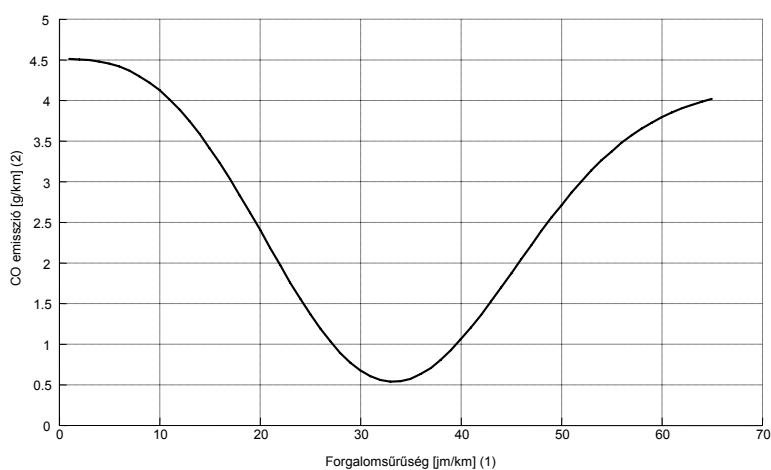


Figure 7: Planar projection: Vehicle emission as a function of traffic density (Diesel Euro1 PC, CO emission)

Traffic density [vehicles/km](1), CO emission [g/km](2)

8. ábra

Síkvetület: járműfajlagos emisszió a forgalomsebesség függvényében (Dízel Euro1 szgk. CO kibocsátás)

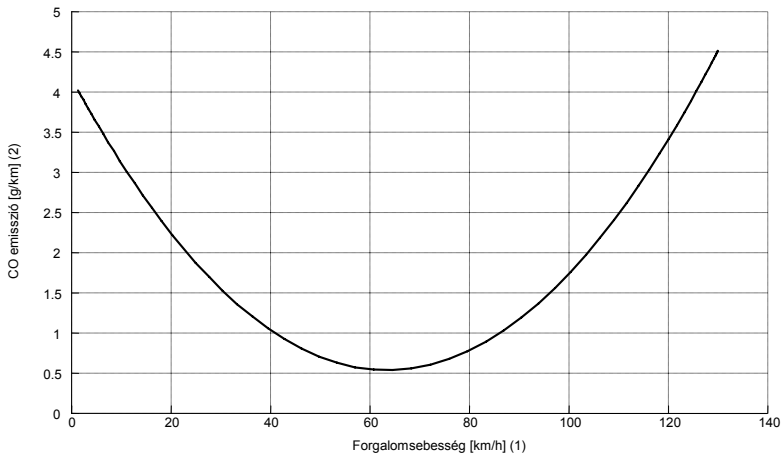


Figure 8: Planar projection: Vehicle emission as a function of traffic mean speed (Diesel Euro 1 PC, CO emission).

Traffic speed [km/h](1), CO emission [g/km](2)

Teljes forgalmi kibocsátás

A teljes forgalmi (9) alapján a forgalomsűrűség és a forgalomsebesség kétváltozós függvényeként rajzolható fel. Elsőrendű megközelítés esetén egy térbeli görbét kapunk, melyet a 9. ábra illusztrál. A teljes forgalmi kibocsátás egyes vetületei a 10. - 11. ábrákon láthatóak.

9. ábra

Teljes forgalmi CO kibocsátás elsőrendű forgalmi modell esetén

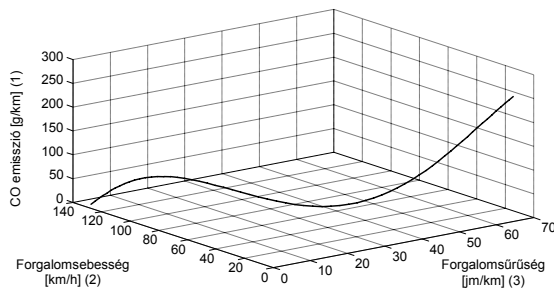


Figure 9: Total CO emission of traffic in equilibrium

CO emission [g/km](1), Traffic speed [km/h](2), Traffic density [vehicles/km](3)

10. ábra

Vetület: Teljes forgalmi CO kibocsátás a forgalomsűrűség függvényében

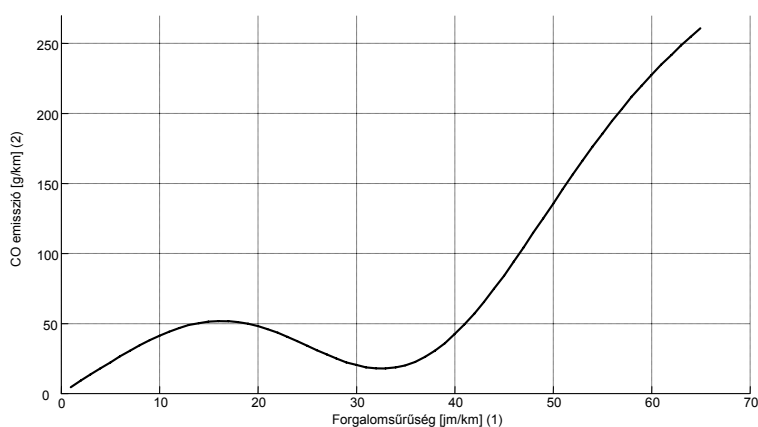


Figure 10: Planar projection: Total CO emission of traffic in equilibrium conditions as a function of traffic density.

Traffic density [vehicles/km](1), CO emission [g/km](2)

A teljes forgalmi kibocsátás a forgalomsűrűség függvényében helyi szélsőértékkel rendelkezik: a szélsőérték argumentuma megegyezik a járműfajlagos függvény minimumának argumentumával. A 11. ábrához jutunk akkor is, ha a (18) összefüggést ábrázoljuk.

11. ábra

Teljes forgalmi CO kibocsátás a forgalomsebesség függvényében

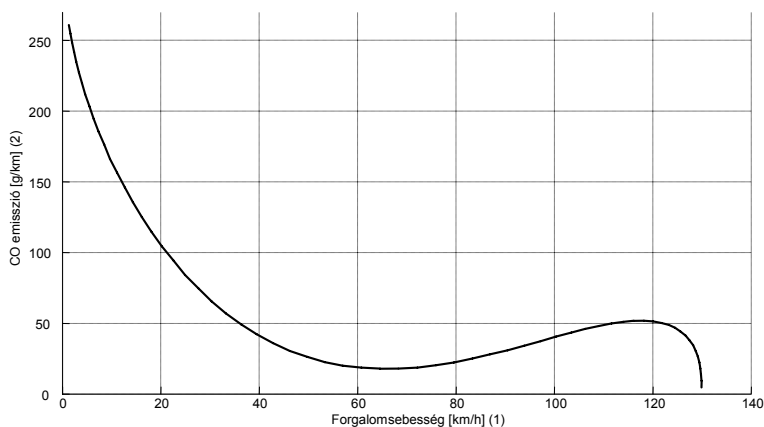


Figure 11: Planar projection: Total CO emission of traffic as a function of traffic mean speed in equilibrium conditions.

Traffic speed [km/h](1), CO emission [g/km](2)

A teljes forgalmi kibocsátás (11. ábra) magas forgalmi átlagsebesség esetén 0-hoz tart – az ábra azt sugallja, hogy magas forgalmi átlagsebességű forgalom kibocsátása alacsony, és ez ellentmondhat a járműfajlagos függvénnyel. A kölcsönösen egy-egyértelmű $v(\rho)$ összefüggés azonban azt jelenti, hogy a forgalomsűrűség szükségszerűen renkívvül kicsi magas forgalomsebességnél, tehát a forgalom ugyan nagy sebességű, de kevés résztvevő halad nagy járműfajlagos kibocsátási állapottal. Ezzel szemben alacsony sebesség nagy forgalomnagyságot is jelent, és a sok jármű alacsony sebességgel való haladása nagy teljes forgalomra vonatkozó távolságfajlagos kibocsátást aggregál.

OPTIMUMVIZSGÁLAT

A már megismert emissziófüggvények szabályozás során való alkalmazásához szükséges az optimumok vizsgálata, összehasonlítása a forgalomtechnikai optimumokkal. A forgalomtechnikai optimum (legkisebb eljutási idő) a kritikus sűrűségnél valósul meg. Ennél magasabb forgalomsűrűség esetén a forgalom instabil állapotban van, és torlódás alakul ki. A dolgozat ezen fejezete az emissziófüggvények kritikus sűrűségtől való eltérését vizsgálja az egyes szennyezőkre, ill azt az elfogadható forgalomsűrűség-tartományt, melyben a kibocsátás elfogadható korlátot nem lép át.

Járműfajlagos és teljes forgalomra vonatkozó optimumok

Egyváltozós függvénynek ρ_0 helyen szélsőérték létezésének szükséges feltétele: a függvény adott pontbeli első deriváltja 0-val egyenlő.

$$\rho_0 = \rho_{\min}, \text{ ha } \frac{df(\rho_0)}{d\rho} = 0 \text{ és } \frac{d^2f(\rho_0)}{d\rho^2} > 0 \quad (19)$$

Megjegyzés: a járműfajlagos és teljes forgalomra vonatkozó kibocsátásfüggvény lokális szélsőértékei megegyeznek. Ez könnyen belátható abból kiindulva, hogy a két függvény között

$$EP_i^p(k) = \rho_i(k) \cdot ep_i^p(k) = [g / km] \quad (20)$$

összefüggés áll fenn. A (18) parciális deriválást elvégezve, a teljes forgalmi kibocsátás abszolút szélsőértéke $\rho=0$ -ban, lokális szélsőértéke járműfajlagos kibocsátásfüggvény abszolút minimumával megegyező pontban.

A (19) összefüggést alkalmazva a (16)-ban felírt emissziófüggvényre megállapítható az a forgalomsűrűség, melyre adott szennyező kibocsátás minimális lesz a vizsgált járműkategóriában (3. táblázat). Az összes járműkategóriát figyelembe véve ez az érték a (19) megoldásával áll elő. Teljes forgalom emissziófüggvényének helyi szélsőértéke a járműfajlagos függvény abszolút szélsőértékével megegyezik (a teljes forgalmi emisszió előállításából és a többváltozós függvények helyi szélsőértékének szükséges feltételéből adódóan). A minimumok szemléletes ábrázolásához lásd az 1. - 4. ábrákat.

A kritikus forgalom sűrűség a felhasznált forgalmi modellben (Luspay et al., 2009) 26,4 jm/km. Valamennyi, teljes forgalmat figyelembe vevő emisszió-optimális forgalomsűrűség ennél magasabb érték, így nem tűzhető ki kizárólagos szabályzási célként.

A továbbiakban az a feladat, hogy meghatározzuk azt a forgalomsűrűség-intervallumot, amelyen belül a károsanyag-kibocsátás egy elfogadható korlát alatt marad.

3. táblázat

Optimális forgalomsűrűségek

Szennyező(1)	ρ_{opt} [g/km](2)
CO	36,1
HC	40,9
CO ₂	41,6
NO _x	43,2

Table 3: Optimal traffic densities.

Pollutant(1), Optimal traffic density(2).

A meghatározandó függvény bemenő paramétere egy arányszám (%-ban kifejezve), mely a nominális (legkisebb) elérhető kibocsátástól való legnagyobb tolerált eltérés, kimenete pedig az a forgalomsűrűségi tartomány, ahol ez megvalósul.

Az elgondolást alkalmazva az (1) egyenletre, az intervallum végpontjai:

$$v_{1,2}(e^p) = \frac{-\alpha_1^p \pm \sqrt{(\alpha_1^p)^2 - 4\alpha_2^p(\alpha_0^p - e^p)}}{2\alpha_2^p} \quad (21)$$

A forgalomsebesség és a forgalomsűrűség közti kölcsönös egyértelműséget (10) kihasználva számítható a $[\rho_1, \rho_2]$ emissziós korlátot teljesítő intervallum.

$$\rho_{1,2}(e^p) = \sqrt[a]{-a\rho_{cr}^a (\ln v_{1,2}(e^p) - \ln v_{free})} \quad (22)$$

A megengedett Δe^p eltéréshez tartozó intervallum két végpontja:

$$\begin{aligned} \rho_1(\Delta e^p) &= \sqrt[a]{-a\rho_{cr}^a \left(\ln \left(\frac{-\alpha_1^p + \sqrt{(\alpha_1^p)^2 - 4\alpha_2^p(\alpha_0^p - e_{opt}^p(1 + \Delta e^p))}}{2\alpha_2^p} \right) - \ln v_{free} \right)} \\ \rho_2(\Delta e^p) &= \sqrt[a]{-a\rho_{cr}^a \left(\ln \left(\frac{-\alpha_1^p - \sqrt{(\alpha_1^p)^2 - 4\alpha_2^p(\alpha_0^p - e_{opt}^p(1 + \Delta e^p))}}{2\alpha_2^p} \right) - \ln v_{free} \right)} \end{aligned} \quad (23)$$

ahol e_{opt}^p a 'p' szennyező kibocsátásának minimális értéke.

A feladat inverziójaként, ha adott a forgalomtechnikai szempontból optimális sűrűség, és a szabályzás ennek elérését célozza, számítható a várható legnagyobb kibocsátás csökkenés.

SZIMULÁCIÓS PÉLDA

Szabályzás, szimulációs környezet bemutatása

A forgalom stabilizálására és az eljutási idő minimalizálására jól ismert módszer a felhajtószabályozás (Papageorgiou és Kotsialos, 2002), a 0. fejezet tanulságai alapján azonban nem lehetséges stabil forgalom mellett minimális kibocsátást elérni pusztán felhajtószabályzás alkalmazásával. Tervezhetünk azonban egy forgalmat stabilizáló, és emissziókorlátot betartó szabályozást.

A szimulációt a Matlab/Simulink környezetben végeztük, a szabályzó tervezésének részletes ismertetését Csikós *et al.* (2011) tartalmazza.

A szimuláció során a konstans főpálya forgalomnagyságához szinuszosan változó felhajtó forgalmat társítottunk. A kettő összege nagyobb, mint a forgalmi sáv adott kapacitása a sinus hullámhegyein, így a szabályozás közbeavatkozása bizonyos. Az optimális visszacsatolás tervezését a PLQ (Piecewise linear quadratic regulator - szakaszonként lineáris kvadrátikus szabályzás) alapján végeztük, mely alkalmas bemenőjelkorlátok betartására, így a beavatkozás nem adhat negatív felhajtó forgalomnagyság értékeket.

Szimulációs eredmények

A szimulációt egy 1,5 km hosszú szakaszon végeztük, a már ismertetett összetételű forgalmon. A főpályán konstans 1700 jm/h nagyságú forgalom halad, a felhajtón 300 jm/h középértékű forgalom jelentkezik. A szabályzó ezt nem mindig engedi fel, a felhajtón történő veszteglést figyelembe véve a teljes eljutási idő változását mutatja a 12. ábra.

12. ábra

Felhajtón átengedett forgalomnagyság, és az eljutási idő javulása

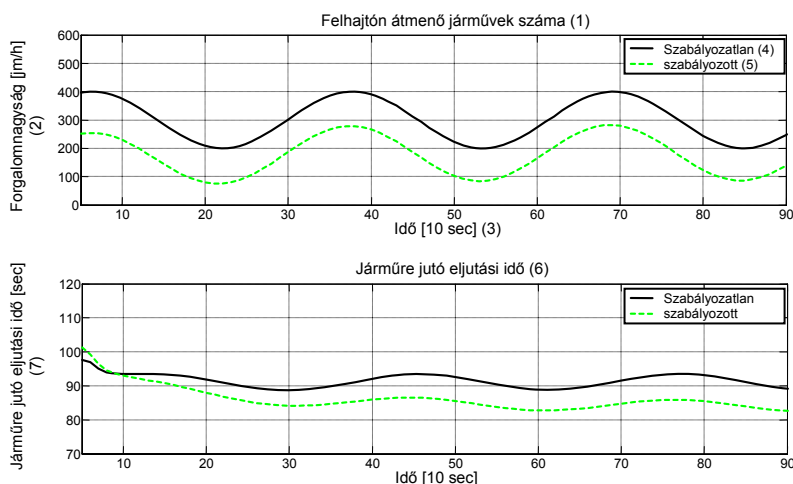


Figure 12: Traffic flow of ramp and travel times per vehicle

Traffic flow of ramp(1) Traffic volume [vehicles/h](2), Time [10 sec](3), Uncontrolled(4), Controlled with LQ control(5), Travel times per vehicle(6), Travel times per vehicle [sec](7)

A szennyezés a szabályozás eredményeként nem csökken: ne feledjük, a stabil forgalmat és minimális TTS-t biztosító szabályozás olyan forgalomsűrűséget idéz elő a főpályán, mely kibocsátási szempontból egyik szennyezőre nézve sem optimális. (13. ábra). Mindazonáltal vizsgálható, hogy az elméletileg számított, a szabályzó által megcélzott forgalomsűrűség értékhez tartozó legnagyobb kibocsátás eltérést betartja-e az adott szabályozás – azaz a forgalom stabilizálásával okozott emissziótöbblet átlépi-e az elméletileg számítottat. Az eredményeket a 4. táblázat tartalmazza.

13. ábra

Kibocsátási értékek alakulása szabályozott és szabályozatlan esetben

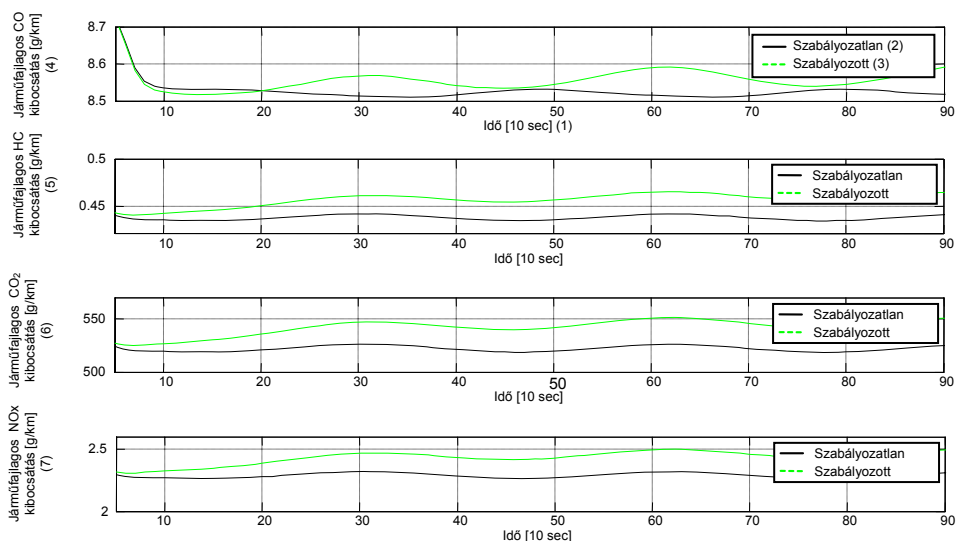


Figure 13: Emission values in case of no control and LQ control

Time [10 sec](1), Uncontrolled(2), Controlled with LQ control(3), CO emission per vehicle [g/km](4), HC emission per vehicle [g/km](5), CO₂ emission per vehicle [g/km](6), NO_x emission per vehicle [g/km](7),

4. táblázat

Emissziókorlátok betartása

Szennyező (1)	Szimulált kibocsátás többlet [g/szakasz/jm] (2)	Elméleti maximális kibocsátás többlet [g/szakasz/jm] (3)
CO	0,274	1,890
HC	0,166	0,588
CO ₂	74,725	93,946
NO _x	1,264	9,958

Table 4: Fulfilment of emission regulation

Pollutant(1), Simulated emission [g/segment/vehicle](2), Theoretical emission maximum [g/segment/vehicle](3).

A 4. táblázat értékeit tekintve kiderül, hogy a szimuláció során sikerült biztosítani a kibocsátási érték elméleti korlát alatt maradását.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben komplex forgalmi-emissziós modelleket mutattunk be, és megmutattuk, hogy a járműfajlagos és teljes forgalomra vonatkozó kibocsátási optimum egybeesik. Egy vizsgált összetételű forgalmon megmutattuk, hogy a kibocsátási optimumok valamennyi szennyezőre a kritikus sűrűség fölötti értékre esnek, ilyen optimumra való tervezés azonban a forgalom destabilizálását vonja maga után. Kompromisszumként a stabil forgalomhoz tartozó emissziókorlát elérését célzó felhajtószabályozást terveztünk. Szimulációt végeztünk egy olyan forgalmi szituációra, melyben az elméleti kibocsátásminimum közeli állapotból egy stabil forgalmi állapotba vitte a rendszert, és vizsgáltuk az emissziókorlát betartását. A szabályozás eredményeként olyan közlekedési folyamatot valósítottunk meg, mely eljutási időt tekintve optimális, stabil, és szennyezési korlátot betartó szabályozás.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A szerzők köszönetet mondanak az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 program, az NKTH és az OTKA közös OTKA CNK 78168 kutatási projekt, valamint a Bólyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásáért.

IRODALOM

- Csikós, A., Luspay, T., Varga, I. (2011): Modeling and optimal control of travel times and traffic emission on freeways. In: Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano, 13058-13063. p.
- 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.
- Luspay, T., Kulcsár B., Varga, I., Bokor J. (2009): Parameter-dependent modeling of freeway traffic flow. Transport. Res. Part C, 18, 471–488. p. [Online] <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2009.09.005>>
- Papageorgiou M., Kotsialos A. (2002): Freeway Ramp Metering: an Overview. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 3. 4.
- OTKA CNK-78168, 2009. évi kutatási jelentés. [online] <http://www.contra.bme.hu/images/stories/kutatasi_jelentes/otka_eves_jelentes_elso.pdf>

Levelezési cím (*Corresponding author*):

Csikós Alfréd

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésautomatikai Tanszék
1111 Budapest, Stoczek utca 2.
Budapest University of Technology and Economics
Department of Control and Transport Automation
H-1111 Budapest Stoczek u. 2.
Tel.: 36-1-463-3089
email: csikos.alfred@mail.bme.hu