



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

- MTA Doktori Értekezés -

**A személygépjármű közlekedés környezetterhelésének becslése
városi környezetben**

**Estimation of passenger car usage environmental parameters in
urban area**

Írta:

Török Ádám (Ph.D.)

aki a Magyar Tudományos Akadémia doktora címére pályázik

A

Magyar Tudományos Akadémia

Műszaki Tudományok Osztálya (VI.)

Közlekedéstudományi és Járműtudományi Bizottságában

Budapest

2020

Tartalom

Ábrajegyzék	3
Táblajegyzék.....	4
Rövidítések jegyzéke.....	5
Köszönetnyilvánítás.....	8
Nyilatkozat.....	9
Összefoglalás.....	10
Summary	11
1. Bevezetés	12
1.1. Motiváció.....	12
1.2. Az értekezés felépítése	14
1.3. Az értekezés előzménye.....	15
1.4. Alkalmazott módszerek és eljárások	21
2. Városi személygépkocsi forgalmi áramlat sebességeloszlásának vizsgálata	22
3. Városi személygépjármű közlekedés energiafelhasználása	41
4. Személygépjárművek városi légnemű károsanyag-kibocsátása	56
4.1. Egyesült Államok.....	62
4.2. Egyesült Királyság.....	64
4.3. Belgium.....	66
4.4. ENSZ.....	67
4.5. IEA.....	69
5. Személygépjármű közlekedés városi zajterhelése	76
6. Összefoglalás –Új tudományos eredmények összefoglalása	83
6.1. Új tudományos eredmények.....	83
6.2. A tudományos eredmények hasznosíthatósága.....	85
7. Irodalom – tézisek témájában megjelent közlemények.....	87
7.1. Fontosabb publikációk jegyzéke.....	87
7.2. Tézispontokhoz kapcsolódó saját közlemények jegyzéke	96

Ábrajegyzék

1. ábra Makroszkopikus Fundamentális Diagram	16
2. ábra Fundamentális diagramok különböző formái	17
3. ábra Makroszkopikus fundamentális diagramm összefüggései autópályáknál az emrikai	19
4. ábra Makroszkopikus fundamentális diagramm összefüggései autópályáknál a Német szabvány alapján	20
5. ábra Példa a hisztogram és a tapasztalati eloszlásra, az egyik forgalmi helyzet esetében	27
6. ábra Cullen és Frey elemzés.....	30
7. ábra Példa a tapasztalati és az elméleti valószínűségi változók sűrűség és eloszlásfüggvényeire egy kiragadott forgalmi helyzet esetén	35
8. ábra Közlekedésben felhasznált energiamennyiségek várható alakulása globálisan, 2020-ban.....	46
9. ábra: Közlekedésben felhasznált energiamennyiségek várható alakulása globálisan, 2050-ben	47
10. ábra Közúti közlekedés energiafelhasználását becslő modellek fejlődése, a bemenő paraméterek száma alapján	53
11. ábra Az energiafelhasználás becslésének fejlődése és összehasonlítása.....	54
12. ábra Különböző forgalmi helyzetek energiafogyasztásának összehasonlítása	54
13. ábra 1 liter benzin-etanol tüzelőanyag-keverék elméleti, korrigált környezetterhelése	60
14. ábra 1 liter gázolaj-biodízel tüzelőanyag-keverék elméleti, korrigált környezetterhelése	61
15. ábra A Global Carbon Calculator	65
16. ábra A TREMOVE modell felépítése	66
17. ábra A ForFITS-modell felépítése.....	68
18. ábra A TIMES-modell alkalmazása az ETP-modellben	70
19. ábra Különböző forgalmi helyzetek széndioxid-kibocsátás összehasonlítása	74
20. ábra Zajterhelés összehasonlítása különböző városi forgalmi helyzetekben.....	81

Táblázatjegyzék

1. táblázat Leíró statisztikai paraméterek 95%-os szignifikancia mellett.....	28
2. táblázat Példa az illesztés jóságára az egyik részhalmaz esetén	34
3. táblázat Illesztett eloszlások megfeleltetése a nemzetközi szabvánnyal	39
4. táblázat: Tüzelőanyagok fontosabb tulajdonságai.....	45
5. táblázat: A hazai közlekedés által felhasznált tüzelőanyag- és energiamennyiség	49
6 táblázat: Eltérő városi közlekedési helyzetek energiafelhasználásának összehasonlítása.....	55
7 táblázat: Eltérő városi közlekedési helyzetek széndioxid-kibocsátásának összehasonlítása.....	74
8 táblázat: Eltérő városi közlekedési helyzetek széndioxid-kibocsátásának összehasonlítása.....	82

Rövidítések jegyzéke

Az értekezésben alkalmazott jelölések listája

Jelölés	Meghatározás	Mértékegység
$\dot{V}_{\text{tűzelőanyag}}$	tűzelőanyag éves fogyasztása	[10 ⁶ l]
$\hat{L}$	a likelihood függvény maximum értéke ebben a modellben	
$\vec{b}$	a vizsgálati mintákra illesztett lineáris regresszió együttható (hibatag, maradéktag, függőleges tengelymetszet) vektora	
$\vec{m}$	a vizsgálati mintákra illesztett lineáris regresszió együttható (meredekség, koefficiens ¹) vektora	
$\vec{x}$	a vizsgálati mintából alkotott vektor	
$\bar{x}$	az x vizsgált minta számtani középértéke	
$\bar{y}$	az y vizsgált minta számtani középértéke	
$\vec{y}$	a vizsgálati mintából alkotott vektor	
1ef_j	a j. gépjárműcsoport energiafogyasztási paramétere	[10 ³ J · (g tűzelőanyag) ⁻¹]
${}^1\xi_{i,j}$	a j. gépjárműcsoport i. károsanyag kibocsátási paramétere,	[g károsanyag · (g tűzelőanyag) ⁻¹]
2ef_j	a j. EURO csoport energiafogyasztási paramétere,	[10 ³ J · m ⁻¹]
${}^2\xi_{i,j}$	a j. EURO környezetvédelmi besorolású gépjárműcsoport i. károsanyag kibocsátási paramétere	[g károsanyag · (g tűzelőanyag) ⁻¹]
3ef_j	sebesség alapú energiafogyasztás polinomiális közelítése EURO csoportonként ²	[g károsanyag]
${}^3\xi_{i,j}$	a j. gépjárműcsoport i. károsanyag-kibocsátásának polinomiális közelítése	[g károsanyag · (g tűzelőanyag) ⁻¹]
$E(X)$	X valószínűségi változó várható értéke	
$f(x_i \theta)$	a jelölt eloszlásfüggvénynek a sűrűségfüggvénye	[m · s ⁻¹]
F_n	gépjárművek sebességének tapasztalati, kumulált eloszlásfüggvénye	[m · s ⁻¹]
F_x	illesztett elméleti eloszlás	[m · s ⁻¹]
I	indikátorfüggvény	
i	megfigyelések száma	[db]

¹ A „koefficiens” itt a „paraméter” szinonimája.

² A regressziós közelítéséből adódó polinom: $ef_j = (a_j + c_j \cdot v + e_j \cdot v^2) / (1 + b_j \cdot v + d_j \cdot v^2)$

Jelölés	Meghatározás	Mértékegység
k	alakparaméter	
kr(X)	X valószínűségi változó sűrűségfüggvényének ferdesége	
L_{A,i}	A-súlyozott hangnyomás szint (zajsint a mérési ponton)	[dB(A)]
L_{corr,i}	korrekció a talaj és a légköri abszorpció miatt	[dB(A)]
L_{Aeq,T}	egyenértékű zajsint	[dB(A)]
LHV	az a hőmennyiség, amely 10 ³ g tüzelőanyagból kinyerhető amikor a füstgázzal együtt távozó vízgőz gőz halmazállapotban hagyja el a berendezést	[10 ⁶ J · l ⁻¹]
L_{WA}	A-súlyozott hangnyomás szint (minden egyes gépjármű külön kibocsátása)	[dB(A)]
m_j	a j. gépjárműcsoport által elfogyasztott tüzelőanyag mennyisége	[10 ³ g tüzelőanyag]
n	a becsült paraméterek száma a modellben	[db]
N	forgalomnagyság	[jmű · s ⁻¹ · sáv ⁻¹]
occ	közúti hurokdetektor foglaltsága	
p₀	referencia hangnyomás	[μPa]
p_A(t)	A-szűrővel súlyozott hangnyomás időfüggvénye	
r_i	közvetlen távolság az i. zajforrás és az előrejelzés pont között	[m]
s	úthossz	[m]
s_j	a j. gépjárműcsoportra jellemző futásteljesítmény	[10 ³ m]
sk(X)	X valószínűség változó sűrűségfüggvényének csúcsossága	
t	idő	[s]
v	gépjármű haladási sebessége	[m · s ⁻¹]
Var(X)	X valószínűségi változó varianciája	
X	x _i mintára illesztett valószínűségi változó	
x_i	vizsgált x minta i. eleme	
y_i	vizsgált y minta i. eleme	
α	skála paraméter	
E	Energiaproduktum	[PJ]
η()	béta-függvény	
λ	ráta-paraméter	
μ	helyi paraméter	

Jelölés	Meghatározás	Mértékegység
τ	szabadságfok paraméter	
ω	másodlagos alakparaméter	
$\Gamma()$	gamma-függvény	
$A_{\text{kev.}}$	a keverékben található adott atomok tömeg törtje (például a keverékben a szén, a hidrogén vagy az oxigén tömegtörttel kifejezett részaránya)	[m/m]
A_r	r. komponensben az adott atomok tömegtörtje (például a keverék i. komponensében a szén, a hidrogén vagy az oxigén tömegtörttel kifejezett részaránya)	[m/m]
β_i	a j. gépjárműcsoportba tartozó gépjárművek száma	[db] ³
ϕ_r	r. komponens térfogattörtje	[V/V]
ϕ_i	a j. gépjárműcsoportra jellemző tüzelőanyag fogyasztás	[l · 10 ⁻⁵ m]
φ	a vizsgálati mintákra illesztett lineáris regresszió együttható (hibatag, maradéktag, függőleges tengelymetszet) vektora	
κ	a vizsgálati mintákra illesztett lineáris regresszió együttható (meredekség, koefficiens ⁴) vektora	
ρ	forgalomsűrűség	[jmű · m ⁻¹ · sáv ⁻¹]
ρ_i	j. gépjárműcsoportot meghajtó tüzelőanyag sűrűsége	[10 ³ g · l ⁻¹]
ρ_{kev}	a keverék sűrűsége	[10 ⁶ · g · m ⁻³]
ρ_r	r. komponens sűrűsége	[10 ⁶ · g · m ⁻³]
τ	útpálya kialakítási paraméter (útburkolat típusa, útpálya lejtése, stb.)	[-]

³ A nemzetközi szakirodalom alapján, ezek a modellek a kompressziós és a szikragyújtású belsőégésű hőerőgépeket különböztetik meg.

⁴ A „koefficiens” itt a „paraméter” szinonimája.

Köszönetnyilvánítás

A rendelkezésemre álló kutatóműhely a BME Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszéke volt.

Köszönöm Dr. Tóth Jánosnak, a BME Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszék tanszékvezető egyetemi docensének és Kovács Tamásnak, a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. Közlekedéspolitikai és Közlekedésgazdasági központvezetőjének támogatását.

Külön köszönet illeti meg Dr. Tánczos Lászlóné professzor asszonyt, a BME Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszékének egyetemi tanárát, hogy mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban kedvező feltételeket teremtett a kutatási téma kidolgozásához. Az elmúlt 15 évben a feltételek biztosításán túlnyúló önzetlen segítségéért ezúton is szeretném kifejezni köszönetemet!

Külön köszönöm támogató segítségét és értekezésemmel kapcsolatban előzetesen megfogalmazott értékes észrevételeit Prof. Dr. Bokor József, Prof. Dr. Gáspár Péter akadémikusnak, Prof. Dr. Tánczos Lászlóné és Prof. Dr. Kövesné Gilicze Éva professzorasszonynak, Prof. Dr. Timár András professzor úrnak, Prof. Dr. Holló Péter kutatóprofesszornak, Prof. Dr. Gáspár László professzor emeritusnak, Dr. Bereczky Ákos Ph.D. és Dr. Orosz Csaba egyetemi docensek úrakkal és Dr. Zöldy Máté Ph.D. tudományos főmunkatársnak.

Köszönöm barátomnak, Gaal Gyulának és Ph.D. hallgatóimnak, Andrejszki Tamásnak, Baranyai Dávidnak és Maghrour Zefreh Mohammadnak a segítségüket.

Köszönöm családomnak, barátaimnak és munkatársaimnak a türelmet és a nyugodt, alkotó légkör megteremtését.

Budapest. 2020. január 1.

Nyilatkozat

Alulírott Török Ádám kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Dolgozatomban a szó szerinti idézetet idézőjelek között ferde szedéssel jelöltem. A vastag szedés a fontosabb gondolatok kiemelését szolgálják.

Budapest, 2020. január 01.

.....
Török Ádám

Készült:

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszékén
(H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.)

Összefoglalás

„Az Európai Unióban a lakosság több mint hatvan százaléka városi környezetben él (10 000 lakost meghaladó városokban). Az EU gazdasági termelésének megközelítőleg 85 %-át városokban állítják elő. A városok az európai gazdaság motorjának tekinthetők. [...] Jelenleg a gazdaság zökkenőmentes működéséhez a városok nélkülözhetetlenek.” (Európai Bizottság, 2007)

Értekezésemben ezért a városi közúti közlekedést vizsgáltam, azon belül is az egyéni közúti gépjárművel közlekedők környezetszennyezésének problémáját. Számos publikáció és disszertáció foglalkozik a zavartalan közúti áramlatok kérdésével és az azokból származó károsanyag-kibocsátással, energiafelhasználással vagy zajterheléssel, de nagyon kevés foglalkozik ugyanezen kérdésekkel a zavart forgalmi helyzetekkel. Ezért az eddigi kutatómunkám céljául tűztem ki a zavart városi forgalmi áramlatok elemzését, illetve a zavart forgalmi áramlatok személygépjárműveiből származó károsanyag-kibocsátás és zajterhelés, valamint a hozzájuk kapcsolódó energiafelhasználás összehasonlítását egymással és a zavartalan forgalmi áramlással.

A célkitűzésnek megfelelően értekezésemben bemutatom az azonosított forgalmi helyzeteket (gyorsítás, lassítás, torlódás stb.) budapesti automatikus forgalomszámlálási eredmények alapján. Az azonosított forgalmi helyzetek személygépjárműveiből származó károsanyag-kibocsátás és zajterhelés, valamint a hozzájuk kapcsolódó energiafelhasználás meghatározásánál figyelembe vettem a hazánkra jellemző folyékony biotüzelőanyag-felhasználási részarányt.

Summary

“In the European Union, more than 60% of the population lives in urban environments (in cities with more than 10,000 inhabitants - source: Eurostat). Approximately 85% of EU production is produced in cities. Cities are the engine of the European economy. [...] Cities are now essential for the smooth running of the economy.” (European Commission, 2007).

In my dissertation, therefore, I examined urban road transport, including the problem of individual road vehicle users. Many publications and dissertations deal with the issue of undisturbed road currents and their emissions, energy use or noise load, but very few deal with disturbed traffic situations. Therefore, as a result of my research work so far, I have aimed at analyzing disturbed urban traffic flows and comparing the emissions and noise load from passenger cars in disturbed traffic currents and the related energy consumption.

In accordance with the objective I present the identified traffic situations (acceleration, deceleration, congestion, etc.) based on the automatic traffic counting results in Budapest. I determined the emission and noise load from the passenger cars of the identified traffic situations, and the associated energy consumption. I have taken into account the liquid biofuel usage characteristics of Hungary.

1.

Bevezetés

1.1. Motiváció

A BME Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszékén különböző kutatások keretében a közúti városi közlekedésben részt vevő gépjárművek, gépjárműcsoportok környezetterhelését 2003 óta vizsgáltam ⁵. Ennek kapcsán a közúti közlekedés környezetterhelésének modellezésére, a modellezési eredmények ár- és díjképzésbe történő integrálására, illetve a közúti közlekedési rendszer energetikai és gazdasági hatékonyságának vizsgálatára számítási modelleket és megoldási módszereket dolgoztam ki. Kutatásaim egy részének tovább fejlesztéséből témavezetésem mellett 2018-ban 1 Ph.D. fokozat született. Kutatási témám a BME oktatásában, az általam oktatott Közlekedésgazdaságtan, illetve a Közúti management tantárgyak egyes fejezeteiben is megjelenik.

Jelen értekezésem közvetlen előzményei az alábbi munkáim:

- 2008-ban a BME Baross Gábor Közlekedéstudományi Doktori Iskolában sikeresen megvédtem *„A közlekedési árképzési/díjképzési rendszerek korszerűsítését megalapozó közúti közlekedési implementációs stratégiák kidolgozása”* című Ph.D. disszertációmát,
- 2011-2014-es időszakban sikerrel zártam le *„Fenntartható közúti közlekedési árképzési rendszer hatékonyságvizsgálata”* című, a Magyar Tudományos Akadémia által Bolyai ösztöndíjjal jutalmazott

⁵ **Környezetterhelés vagy környezetszennyezés:** Környezetterhelés alatt értekezésemben az alábbi folyamatot értem: a tüzelőanyag sztöchiometrikus mennyiségű oxigénmolekulával történő reakciója, azaz tökéletes égése során – a szükséges oxigén a levegő oxigénjéből származik – széndioxid és vízgőz keletkezik, amelyek a légkörbe kerülnek. A nevezett gázok üvegházhatású gázok és a környezetet terhelik, de nem környezetszennyezők, mert a légkörnek nagyon régóta részét képezik.

kutatómunkám, amely a meglévő ismerethalmaz alapján az ösztöndíjnak köszönhetően válhatott teljessé,

- 2016-ban a BME Gazdálkodás- és Szervezéstudományi Doktori Iskolában sikeresen megvédtem **„Fosszilis tüzelőanyag alapú közúti közlekedési rendszer gazdasági hatékonyságának növelése, különös tekintettel a környezetvédelmi célokra”** című Ph.D. disszertációm,
- 2016–2020-as időszakban – a második Bolyai ösztöndíjam támogatásával – a **„Közúti közlekedési rendszer komplex közlekedésenergetikai elemzése, különös tekintettel gazdasági folyamatok integrálására”** című kutatásra kaptam támogatást,
- 2017-ben az Új Nemzeti Kiválósági Program keretében a **„Közúti közlekedési rendszer komplex közlekedésenergetikai elemzése különös tekintettel a megújuló energiaforrások integrálására”** címmel a kutatásaimat kiterjesztettem,
- 2018-ban leadtam **„Közúti gépjárműközlekedés környezetterhelésének műszaki-gazdasági vizsgálata”** című habilitációs pályázati anyagom, illetve,
- 2018-ban a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai+ ösztöndíjjal támogatta **„Közúti közlekedési rendszer közlekedésenergetikai vizsgálata, különös tekintettel az árképzési folyamatok integrálására”** című kutatómunkám.

1981-ben születtem Budapesten, a közúti közlekedésben résztvevő gépjárművek vizsgálatával, matematikai-statisztikai elemzésével, a közúti közlekedés fenntartható és gazdaságilag hatékonyabb megvalósításának vizsgálatával 2004 óta foglalkozom, a fosszilis tüzelőanyag alapú közúti közlekedési rendszer gazdasági, energetikai fejlesztési lehetőségeit vizsgálom, különös tekintettel a közlekedési célú megújuló energiaforrások hazai felhasználásának gazdasági lehetőségeire. Értekezésemben az elmúlt 15 év kutatási eredményeit összegeztem, amelynek háttéréül 287 publikációm szolgál. Ezek közül 48 külföldi folyóiratcikk, 35 hazai idegennyelvű folyóiratcikk és 36 hazai magyar nyelvű cikk, továbbá 62 külföldi konferenciatickem jelent meg külföldön és 9 Magyarországon. 59 Web of Science adatbázisban regisztrált

publikációm van – ebből 2 db Q1 kategóriájú^{6,7}, az összes publikációmra 159 független WoS idézet érkezett. Összegzett impaktfaktor pontom 21,22, Hirsch-indexem a független hivatkozásokból 6. A Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Osztályának publikációs pontszámítása alapján 31 pontom van, ebből 25 pont származik folyóiratcikkekből.

1.2. Az értekezés felépítése

Ezt az értekezést a Magyar Tudományos Akadémiának nyújtottam be, a "Magyar Tudományos Akadémia Doktora" címére történő pályázatom részeként. Az értekezés összefoglalja a Ph.D. cím megszerzése óta a közlekedésgazdasági területen végzett kutatási eredményeimet. Az eredményeket a 2., a 3., a 4. és az 5. fejezetben mutatom be, a 6. fejezet pedig az új tudományos eredményeimet foglalja össze. A 2. fejezet a városi közúti közlekedés személygépjárműveinek sebességeloszlását, illetve annak becslhetőségét taglalja. A 3. fejezet a városi közúti személygépjármű közlekedés energiafelhasználásának becslését, illetve a becslő eljárások fejlődését ismerteti. A 4. fejezet a városi közúti személygépjármű közlekedésből származó légnemű környezetszennyezést okozó kibocsátásbecslést írja le, külön kitérve az eljárások fejlődésére. Az 5. fejezet a városi közúti személygépjármű közlekedésből származó zajszennyezés becslésével foglalkozik. A 6. fejezet az új tudományos eredményeket foglalja össze, illetve kutatási eredményeim várható hasznosíthatóságát vázolja fel.

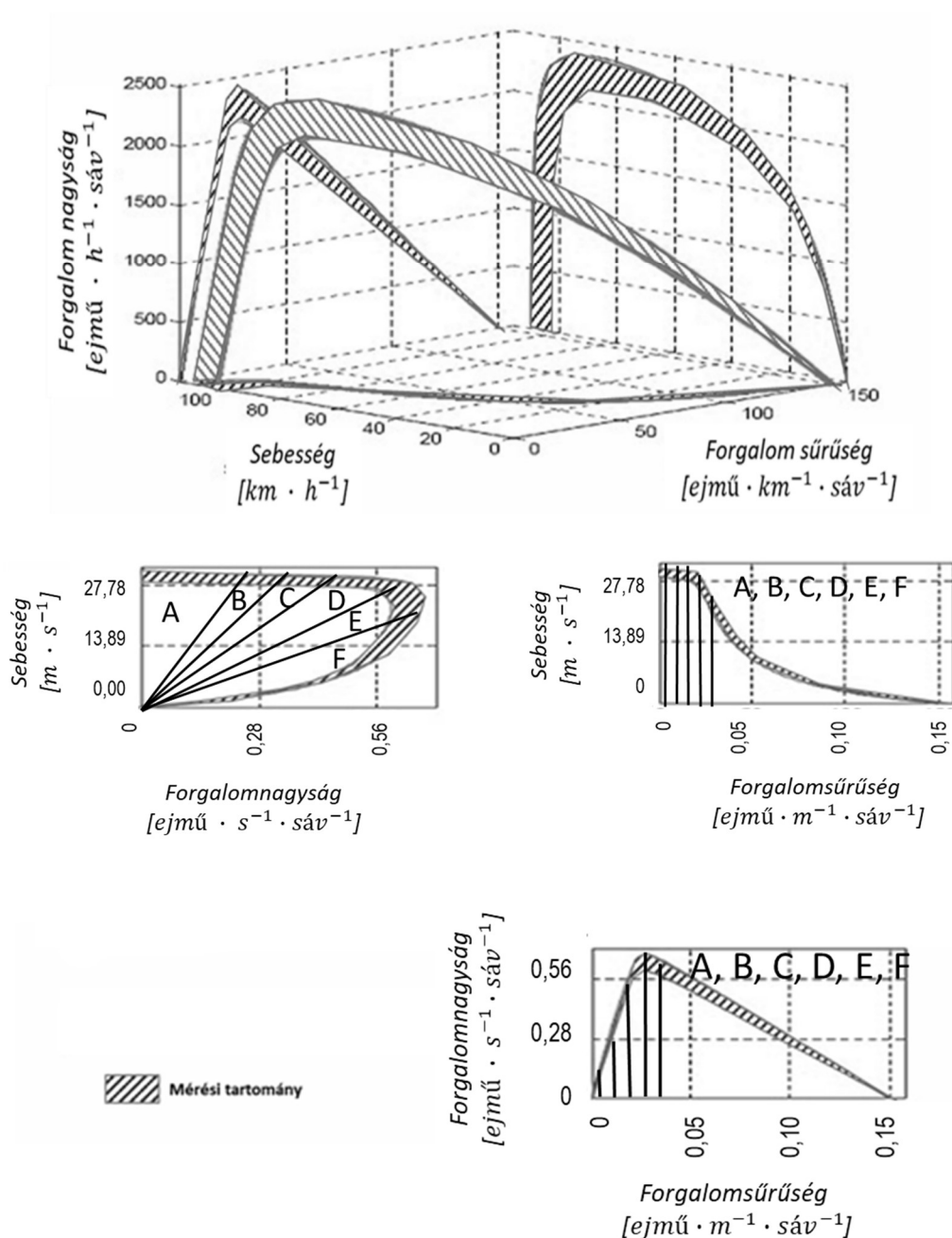
⁶ Rimkus et. al. (2018): An investigation of the efficiency of using O-2 and H-2 (hydrooxile gas-HHO) gas additives in a ci engine operating on diesel fuel and biodiesel, ENERGY, 152 pp 640–651

⁷ Lennox et. al. (2013): Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine, FUEL, 107, pp 409–418

1.3. Az értekezés előzménye

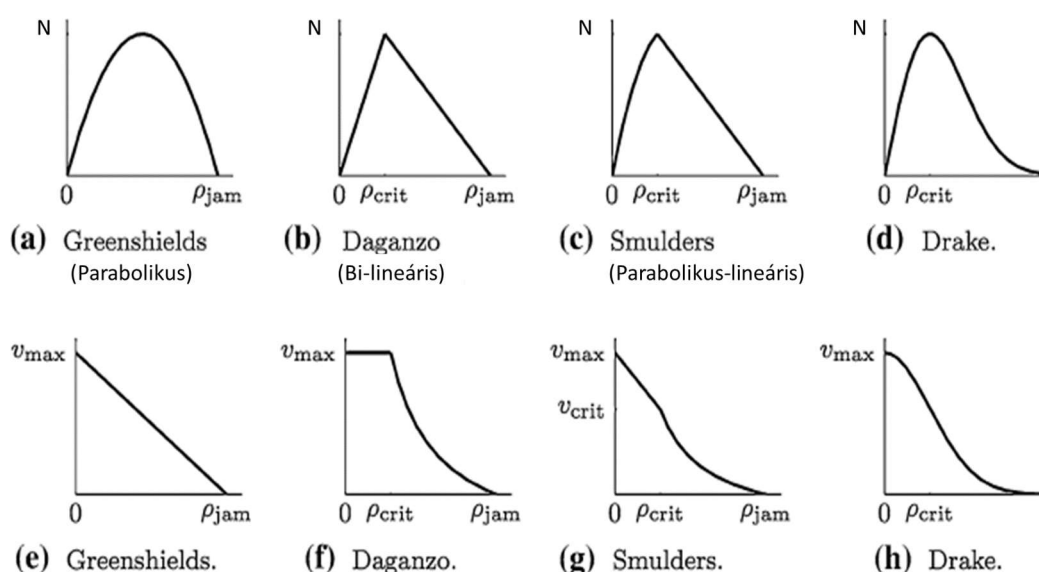
A közúti közlekedésben a forgalom lefolyásának megértéséhez, leírásához és előrejelzéséhez forgalomáramlási modelleket már a XX. század eleje óta alkalmaznak. Számos cikk és tanulmány foglalkozott a témával (Papageorgiou, 1998); (Brackstone, McDonald, 1999); (H. M. Zhang, 2001); (Hoogendoorn, Bovy, 2001); (Helbing, 2001); (Kerner, 2010); (Treiber, Kesting, Helbing, 2010); (Orosz, Wilson, Stépán, 2010); (Wilson, Ward, 2011); (Bellomo, Dogbe, 2011). A bevezetés a közúti közlekedés forgalmi modelljeinek fejlődését megalapozó fundamentális- vagy alapösszefüggést mutatja röviden be. A fundamentális diagramot követően az 1930-as években mikroszkopikus (egyes gépjárműegyedek viselkedését leíró), 1950-ben pedig makroszkopikus (gépjárműcsoportok viselkedését leíró) modelleket vezettek be. Elmondható, hogy az elmúlt két évtizedben a számítástechnikai kapacitás növekedésével egyre bonyolultabb eszközök állnak a modellezők rendelkezésére. A fundamentális diagram a forgalomnagyság, forgalomsűrűség és a gépjárműfolyam átlagsebessége között teremt kapcsolatot. Azt mutatja meg, hogyan változik meg a követési távolság és a átlagos sebesség kapcsolata különböző forgalmi helyzetekben. Fejődési szempontból először a mikroszkopikus modellek (forgalomáramlási modellek) fejlődtek, majd későbbiekben indultak rohamos fejlődésnek a makroszkopikus modellek is. Míg a mikroszkopikus modellek megkülönböztetik és nyomon követik az egyes gépjárművezetők viselkedését, külön meghatározva minden gépjárműegyedet, addig a makroszkopikus modellek aggregálják a gépjárműveket. A mezoszkopikus modellek a mikroszkopikus és a makroszkopikus modellek között helyezkednek el. A forgalomáramlási modellek lehetnek folyamatosak vagy diszkrét, sztochasztikusak vagy determinisztikusak, a használt matematikai modell alapján pedig dolgozhatnak parciális vagy teljes differenciálegyenletekkel. A forgalomáramlási modellek azon a feltételezésen alapulnak, hogy összefüggés van a közúti gépjárművek közötti átlagos távolság és a gépjárművek átlagos sebessége között. Ezt a kapcsolatot a követési távolság és a sebesség között először Greenshields (B. D. Greenshields, Thompson, Dickinson, Swinton, 1934) tanulmányozta. Kutatási eredményeit a fundamentális diagramban foglalta össze. Eleinte Greenshields a

követési távolság (s , kettő darab egymást követő jármű eleje közötti távolság) és a sebesség (v) összefüggéseit vizsgálta de, kutatási eredményei alapján, a fundamentális összefüggés más változókkal is kifejezhető, például a forgalomsűrűség (ρ – az egységnyi útszakaszra jutó gépjárművek darabszáma) és a forgalomnagyság (N – a gépjárművek száma időegységenként) segítségével (1. ábra):



1. ábra **Makroszkopikus Fundamentális Diagram**
(Hranac et al., 2006; TRB, 2010) alapján (A. Török, Zefreh, 2016)

Greenshields (B. D. Greenshields et al., 1934) fundamentális diagramjában a távolság-sebesség összefüggés lineáris. Azonban egy évvel később ő maga pontosította modelljét (Greenshields et al., 1935). Ez a fundamentális diagramot a sűrűség (ρ) –sebesség (v) síkban lineárisnak tekinti, és így az a forgalomsűrűség (ρ) –forgalomnagyság (N) síkban parabolikus. Később Drake pontosította a fundamentális diagramot (Drake, Schofer, 1967). Azóta számos más pontosítás vagy egyszerűsítés látott napvilágot. Smulders (Smulders, 1990), kutatási eredményeiben a parabolikus-lineáris kombinációját mutatta be. Daganzo (Daganzo, 1994) a ma is használatos, bilineáris (háromszög alakú) forgalomsűrűség és forgalomnagyság diagrammot mutatta be. A fundamenátlis diagramok különböző formáinak részletesebb áttekintését Li (Li, 2008) publikálta (2. ábra):



2. ábra Fundamentális diagramok különböző formái
(van Wageningen-Kessels, Van Lint, Vuik, Hoogendoorn, 2015) alapján

A megfigyelt forgalomsűrűség (ρ) – és forgalomnagyság (N) függvények általában tág határok közötti szórást mutatnak. Zhang (H. M. Zhang, 1999) és Laval (Laval, 2011) azzal érvelnek, hogy a tág határok közötti szórás nagy része egyáltalán nem magyarázható közlekedési jellemzőkkel vagy azok változásával.

Gilicze, Füzy (2000) a következő lokális (azaz keresztmetszeti) forgalmi változókat definiálta:

- Forgalomnagyság: N , adott időegység alatt egy adott keresztmetszeten áthaladó járműszám, $[jmű \cdot s^{-1} \cdot sáv^{-1}]$,
- Időbeli vagy lokális átlagsebesség: v_t , adott idő alatt egy adott keresztmetszeten áthaladt gépjárművek sebességének számtani középértéke, $[m \cdot s^{-1}]$,
- Követési idő: h_i , egy adott keresztmetszeten áthaladó, két egymást követő gépjármű belépési időpontjai között eltelt idő, $[s]$,

Ezeket túl Gilicze, Füzy (2000) a következő momentán (adott pillanatbeli) forgalmi változókat definiálta:

- Forgalomsűrűség: ρ , egy adott útszakaszon, egy adott időpillanatban, egy adott sávban jelen lévő járművek számának és a szakasz hosszának hányadosa, $[jmű \cdot m^{-1} \cdot sáv^{-1}]$
- Térbeli vagy momentán átlagsebesség: egy adott pillanatban a vizsgált útszakaszon elhelyezkedő gépjárművek sebességeinek számtani középértéke, $[m \cdot s^{-1}]$.
- Követési távolság: s , adott időpontban két gépjármű eleje közötti távolság, $[m]$.

Zhang meglátása szerint a forgalom akkor van egyensúlyban – stabil az áramlás, ha elég hosszú idő (t) és kellően hosszú út (x) alatt a járműfolyam, azaz a forgalom átlagsebessége (v) és a járműfolyam átlagos sűrűsége (ρ) nem változik.

Vagyis:

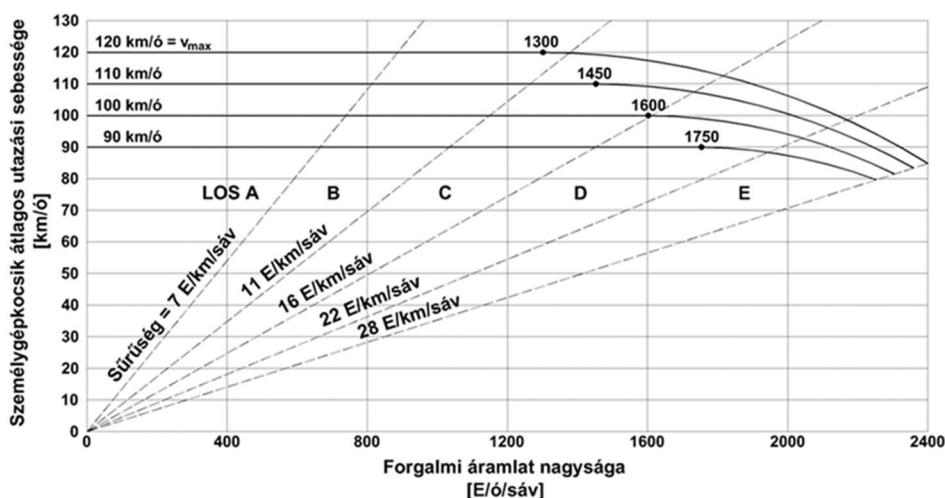
$$(1.1) \quad \delta v \cdot \delta t^{-1} = 0,$$

$$(1.2) \quad \delta \rho \cdot \delta t^{-1} = 0,$$

$$(1.3) \quad \delta v \cdot \delta x^{-1} = 0,$$

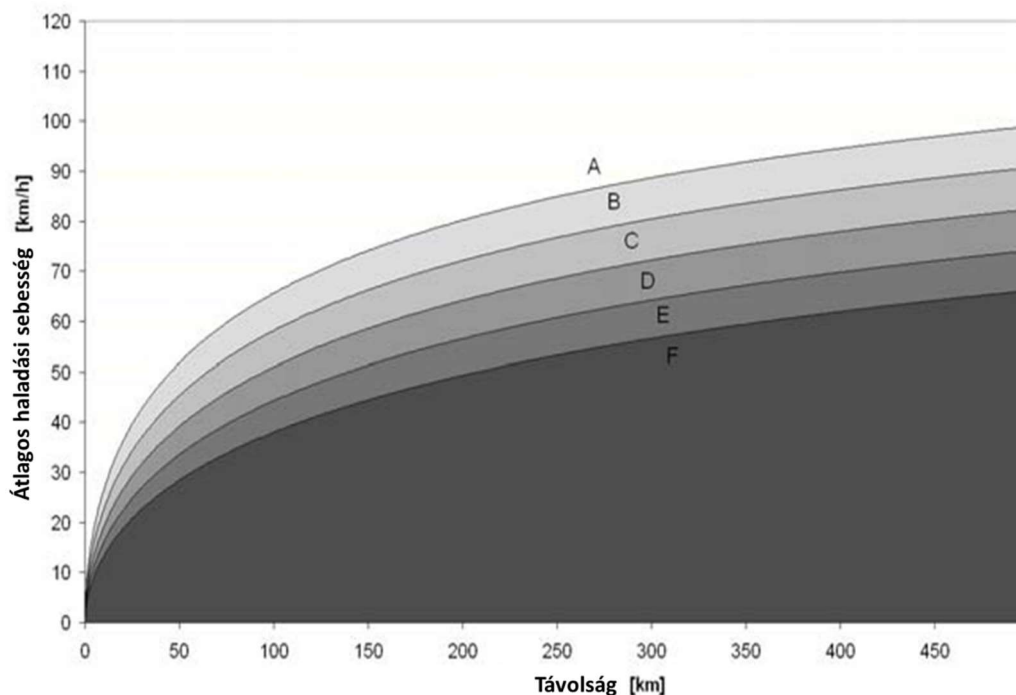
$$(1.4) \quad \delta \rho \cdot \delta x^{-1} = 0.$$

A fenti egyenletrendszer levezethető Lighthill és Witham munkásságából (Lighthill, Whitham, 1955), illetve Richards kiegészítéséből (Richards, 1956), valamint az LWR modellből, lásd a (2.1) egyenletet. Edie (Edie, 1961), Cassidy és Bertini (Cassidy, Bertini, 1999) a szóródás egy részét az infrastruktúra-kapacitás korlátjának elérésével magyarázza, illetve azzal, hogy a torlódás megkezdődése előtt a szűk keresztmetszetből a gépjárművek kiáramlása lassabb, mint a torlódásoknál és a sorfelépülés. A kapacitáscsökkenést a forgalmi torlódást elhagyó gépjárművek kisebb gyorsulásával magyarázták, miközben a torlódásba beérkezők nagyobb mértékben lassulnak. Ez az elmélet a fundamentális diagram hiszterézissel való módosítását eredményezte (Newell, 1965), (Treiterer, Myers, 1974). Munkájukban azt állítják, hogy a megfigyelések túlságosan szóródnak. Kerner és Rehborn (Kerner, Rehborn, 1996) a diszkrét fundamentális diagramból a valószínűségi térbe való áttérést javasoltak. A forgalomsűrűség és forgalomnagyság síkon valószínűségi mező létrehozását ajánlották. Ambühl és munkatársai (Ambühl et al., 2017) szerint, a makroszkopikus fundamentális diagram csak kevés figyelmet kapott, és annak általánosan elfogadott egzakt matematikai formája nem létezik. A fundamentális diagram alapján Amerikában (TRB, 2010) és Németországban (Gerlach, 2007) szolgáltatási szinteket határoztak meg. Az amerikai tervezési segédlet a fundamentális diagram alapján A-tól F-ig kategorizálja az autópályán a forgalmi helyzeteket a forgalom nagyság alapján (3 ábra):



3. ábra **Makroszkopikus fundamentális diagram összefüggései autópályáknál az amerikai szabvány alapján** (Tunver, et., al, 2010) és (Fi, 2013) alapján

A német tervezési segédlet a közutakhoz A-tól F-ig minőségi szinteket rendel, azok funkciója⁸, a megtett távolság és a haladási sebesség alapján (4. ábra):



4. ábra Makroszkópikus fundamentális diagram összefüggései autópályáknál a Német szabvány alapján
(Buthe, Pütz, Staats, 2015) alapján

A felvázolt eredményekből kiindulva, újabb feladatokat azonosítottam, és ezekkel kapcsolatban a következő hipotéziseket állítottam fel:

- A közúti közlekedésben a teljes gépjárműközlekedésen belüli városi személygépjárműközlekedés rendszerszemléletű, módszertanilag megalapozott forgalomtechnikai modellezési igénye szükségszerű, különös tekintettel a nem konvencionális forgalmi helyzetekre.
- Szükséges a teljes gépjárműközlekedésen belüli városi személygépjárműközlekedés energiafelhasználásának rendszerszemléletű modellezése, különös tekintettel a szektor energetikai elemzéseinél.

⁸ kontinentális, nagytérségi, régióközi, regionális, kistérségi, járási

- A teljes gépjárműközlekedésen belüli városi személygépjárműközlekedés kibocsátásának modellezésére szükség van, különös tekintettel a megújuló tüzelőanyagok sajátosságaira.

1.4. Alkalmazott módszerek és eljárások

Az előbbiekben megadott kutatási témáknál az alábbi vizsgálati módszereket alkalmaztam:

- valós városi közúti forgalmi adatokon alululó matematikai-statisztikai modellalkotás és validáció, eltérő forgalmi állapotok feltárása és meghatározása,
- belsőégésű hőerőgépek eltérő tüzelőanyagkeverékeinek energiafelhasználásánál, károsanyag- és zajkibocsátás becslése, különös tekintettel a matematikai statisztikai elemzésekre, eltérő forgalmi állapotok esetén.

Az egyéni közúti gépjárműközlekedés környezetterhelésének becslésére kiterjedt adatgyűjtést, feldolgozást és értékelést végeztem, amelynek keretében előállt egy gyorsan, egyszerűen és megbízhatóan alkalmazható eljárás. Több esetben nincs lehetőség a nemzetközi gyakorlatban használt legjobb eljárások alkalmazására, így egyszerűsítő/helyettesítő módszert kellett találnom - vagy ennek hiányában kifejlesztenem, mely figyelembe veszi a hazai közlekedési szektor sajátosságait. Értekezésben az eljárást alkalmaztam városi környezetre.

2.

Városi személygépkocsi forgalmi áramlat sebességeloszlásának vizsgálata

A forgalom lefolyásának nyomon követéséhez és elemzéséhez elengedhetetlen a gépjárművek haladási sebességének ismerete, ami napjainkban különböző típusú és felépítésű detektorok alkalmazásával megoldott. Azonban ezeknek az eszközöknek a működése nem minden esetben stabil és hibamentes, előfordul, hogy mérés hibával terhelt. A megfelelő forgalmi adatokat a városi közlekedési problémák megoldásához feltétlenül be kell gyűjteni. Ez egyszerűen azért van, mert a közlekedéstervezés és forgalomirányítás döntései a begyűjtött adatok minőségén alapulnak (Tunver, Carson, Wilkinson, Travis, Zimmerman, 2010); (Csiszár, Sándor, 2017). A célkitűzésnek megfelelően - hallgatóim és kollégáim segítségével - adatgyűjtésbe kezdtem 2007 és 2018 között a városi személygépkocsi közlekedésre jellemző atipikus forgalmi helyzetek vizsgálata érdekében. Ehhez először, statisztikai eszközökkel külterületi utakon szabad áramlású közúti személygépjárműközlekedést, majd városi környezetben kialakuló a szabad áramlástól jellegzetesen eltérőnek minősíthető forgalmi helyzeteket vizsgáltam meg.

Az adatokat módszertani példaként hurokdetektoros, illetve kamerás mérésekből gyűjtöttem ki. A hurokdetektoros mérések 2013. május 6-án, hétfői napon reggel 6:00-tól este 23:59-ig a 710-es kódú helyszínről, a Villányi út és a Karolina út kereszteződéséből származnak. A vizsgálat helyszíne belterületi, beépített városi környezet – így az autópályára jellemző fundamentális diagramm

és alapösszefüggések nem voltak alkalmazhatóak. A hazai jogszabályi környezet miatt a vizsgálati helyen csak személygépjármű forgalom van jelen a tehergépjármű forgalom 2016 óta kitiltásra került. A vizsgált minta a detektor felett elhaladt gépjárművek számát, 90 másodpercenként (ezt a forgalomsűrűséget a továbbiakban $\rho(t)$ -nek nevezem) és a detektor foglaltságát⁹ ($\text{occ}(t)$) tartalmazza (I. melléklet). A minta adatai a forgalomsűrűségből és a foglaltsági tényezőből állnak össze, a vizsgált napon, forgalmi irányonként és sávonként 962 elemű mintát rögzítettünk. A fundamentális összefüggés az előző fejezet alapján adódik (2.1):

$$(2.1) \quad \rho(t) \cdot v(t) = N(t)$$

Az összefüggés a sebesség (v) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] és a forgalomsűrűség (ρ) [$\text{jmű} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sáv}^{-1}$] kapcsolatán alapul, amely leírja a közúti gépjárműforgalom viselkedését. A forgalomsűrűség (ρ) értéke becsülhető abból az időtartamból, amit egy gépjármű elhaladás közben egy adott hurokdetektor felett tölt el, ez az $\text{occ}(t)$ foglaltság [-]. Ezek alapján adódik (2.2):

$$(2.2) \quad \rho(t) \cdot L_{\text{eff}} = \text{occ}(t)$$

ahol:

(L_{eff}) effektív gépjárműhossz [m] az átlagos gépjárműhosszt (Zefreh, Torok, Meszaros, 2017).

A (2.1) és a (2.2.) összevonása után kapjuk a (2.3) egyenletet:

$$(2.3) \quad N(t) = (\text{occ}(t) \cdot L_{\text{eff}}^{-1}) \cdot v(t).$$

A (2.3) egyenletből látható, hogy a kapcsolat a N forgalomnagyság és a v sebesség között lineáris, ahol is $v(t)$ tag jelenti az egyenes állandó meredekségét mind a 962 különböző vizsgált esetre. A mérési eredmények alapján az együttállás erőssége Pearson-féle korrelációs együttható meghatározásával vizsgálható¹⁰ (2.4):

⁹ A 90 másodperces időintervallum hányadaként, kitöltési tényezőként rögzítettük a hurok felett eltöltött foglaltsági időt.

¹⁰ Megjegyzendő, hogy a normális eloszlású változó, ha korrelálatlan, akkor független is, tehát a korreláció alkalmas az ilyen esetben a kapcsolat erősségének leírására.

$$(2.4) \quad r = \left[\sum_{i=1}^n \{(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})\} \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \right]^{-1/2}$$

ahol:

$(x_i - \bar{x})$ és $(y_i - \bar{y})$ az átlagoktól mért eltéréseket jelöli. Az r értékek a detektorok Pearson-féle korrelációs együtthatói (esetünkben $r_1=0,947$ és $r_2=0,816$), melyek azt mutatják, hogy a $N(t)$ és az $(occ(t) \cdot L_{eff}^{-1})$ szorzat között erős a lineáris kapcsolat. Az általános lineáris modell egy statikus lineáris modell, amely felírható a következőképpen (2.5):

$$(2.5) \quad y = m \cdot x + b$$

Mivel esetünkben a hurokdetektorok adatai idősoros vektorban szerepelnek (962 elemű vektor, ahol minden elem 90 másodperces időablakot képvisel), ezért a (2.5) egyenletet át lehet írni vektoriális alakba (2.6):

$$(2.6) \quad \vec{y} = \vec{m} \cdot \vec{x} + \vec{b}$$

ahol:

$\vec{y}$ vektor (ebben az esetben $N(t)$):

$\vec{x}$ vektor (ebben az esetben $occ(t) \cdot L_{eff}^{-1}$),

$\vec{m}$ meredekség (ebben az esetben $v(t)$), mint regressziós együttható szorzataként, illetve

$\vec{b}$ vektor, hibatag. (A függőleges tengelymetszék hibatagként való értelmezése abból adódik, hogy elméletileg a $N(t)$ és $v(t)$ közötti összefüggést az origón átmenő egyenes reprezentálja, így a regressziós modell konstans együtthatója a modellezés hibája).

Visszahelyettesítve, ezek alapján, az 1924 mérési pontra az alábbi (2.7) egyenlet írható fel:

$$(2.7) \quad \overline{N(t)} = \left(\overline{occ(t) \cdot L_{eff}^{-1}} \right) \cdot \overline{v(t)} + \bar{\epsilon}$$

ahol:

ϵ normális eloszlású hibatag.

A fentiek alapján 1924 elemű minta jött létre, 1924 sebességadattal. A minta reprezentatívnak tekinthető, mert egy belvárosi csomópont minden ágának egy

átlagos napjának (nem hétvége, nem nyári szünet) adatait tartalmazta. A továbbiakban ezekre a sebességadatokra a forgalmi helyzettől függő (gyorsulás, lassulás, szabad áramlás, torlódás, túltelített torlódás) elméleti eloszlás kerül illesztésre.

Valójában a fundamentális összefüggés alapul szolgál ahhoz, hogy a közlekedés dinamikáját, beleértve a forgalomáramlást (H. Wang, Li, Chen, Ni, 2009) meg lehessen érteni. Tapasztalati megfigyelések alapján, valamely sűrűség túllépése után az egyedi gépjárművek sebességeinek tág határok közötti változása figyelhető meg. Ezek a tág határok a gépkárművezetők véletlenszerű sebességválasztásaiból adódnak. Ezek a sebességeloszlások autópályán vagy pedig általános zavartalan áramlások esetén a normális eloszlást követik (Török, Berta, 2009). 2010-ben Jun (Jun, 2010) megfogalmazta, hogy a sebességválasztás változékonysága adott úton, adott időintervallumon belül, az útnak az infrastrukturális jellemzőivel (sávszélesség, belátható úthossz, domború lekerekítés, ívsugár) megmagyarázható. Azok a körülmények, amelyek másfajta sebességeloszláshoz vezetnek, gyakran nem autópályán, hanem városi utakon alakulnak ki, ahol általában a közlekedési áramlás sokkal bonyolultabb, több a zavaró tényező (becsatlakozás, kiválás, kereszteződés, forgalom irányító eszköz – jelzőtábla, jelzőlámpa (Zefreh, Baranyai, Torok, 2016). A sebességek eloszlásának modellezéséhez használt matematikai eszközök fejlődésével a szakirodalom részletesen foglalkozik (Castro, Sánchez, Vaquero, Iglesias, Rodríguez-Solano, 2008), (Dey, Chandra, Gangopadhaya, 2006), (Trozzi, Vaccaro, Crocetti, 1996). Általánosságban elmondható, hogy ma már a sebesség, mint valószínűségi változó eloszlásának meghatározására – vagy meghatározott feltevések alapján való becslésére – sok mérnöki tevékenység során, (például, mikroszimulációnál, gépjárművek kibocsátásmodellezésénél vagy közúti közlekedésbiztonsági elemzésénél (Holló, Henézi, Berta, 2018) (Llorca, Moreno, Lenorzer, Casas, Garcia, 2015), (Holló, Eksler, Zukowska, 2010) (Park, Schneeberger, 2003), illetve más műszaki, tervezési tevékenységek során, mint például utazástervezés szimulációja (Berki, Monigl, 2017), (Liao, Rasouli, Timmermans, 2014) szükség van. Ráadásul a sebességeloszlás hasznos lehet a forgalom áramlási-jellemzőinek elméleti meghatározásához (Orosz et al., 2010)

és a megfelelő forgalmi események pontosabb megértéséhez (Karoliny, Gáspár, 2015), (Bényei, Deák, Orosz, Kovács, 1989), (Bényei, Fi, 1991). Az értekezésem fő célját a sebességeloszlás tanulmányozása képezi, úgynevezett zavart áramlás esetén, amelyet városi közlekedésben a becsatlakozás, a kiválás, a kereszteződés, vagy a forgalom irányító eszközök – jelzőtáblák, jelzőlámpák, illetve forgalmi torlódások hatására alakul ki.

A forgalmi áramlat átlagsebessége, mint valószínűségi változó eloszlásfüggvényének tanulmányozása a közúti gépjárművek áramlásának tudományos vizsgálatába enged bepillantást, ez pedig számos probléma megoldása esetén lehet fontos. Ilyen a forgalomlefolys szervezése, az utak tervezése, a megengedett legnagyobb haladási sebesség megállapítása, a közlekedés zajkibocsátásának előrejelzése, forgalombiztonsági értékelés készítése (Iannone, Guarnaccia, Quartieri, 2013), (Vadeby, Forsman, 2017), (Maurya, Dey, Das, 2015), (Bassani, Catani, Cirillo, Mutani, 2016), (Hustim, Fujimoto, 2012), (Du, Deng, Liao, Ji, 2017). A fejezet célja megvizsgálni a forgalmi sebességeloszlások alakulását jellegzetes, egymástól eltérő, városi körülmények között. A városi közlekedésben részt vevő, közúti gépjárművek sebességeloszlását a legnagyobb valószínűségi becslés (Maximum Likelihood elv) módszerrel vizsgáltam. Az első lépés a rendelkezésre álló sebesség adatainkhoz a megfelelő eloszlás kiválasztása (ehhez különböző forgalmi helyzetek kerültek azonosításra, a hozzájuk tartozó sebességadatokkal a mérési eredményekből részhalmazokat képezve), ami úgy történik, hogy felrajzoljuk a hisztogramot és a sebességek tapasztalati eloszlását a (2.8) egyenlet alapján:

$$(2.8) \quad F_n(x) = n^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n I\{X_i \leq x\},$$

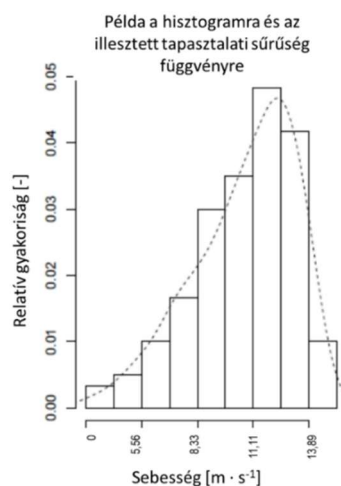
ahol az $\{X_1, \dots, X_n\}$ változók független, azonos eloszlású valószínűségi változók, amelyeknek az eloszlásfüggvénye (2.9):

$$(2.9) \quad F(x) = P(X_i \leq x)$$

és I az indikátorfüggvény (2.10):

$$(2.10) \quad I(X_i \leq x) = \begin{cases} 1, & \text{ha } X_i \leq x \\ 0, & \text{minden egyéb esetben} \end{cases}$$

A hisztogram és a tapasztalati sűrűségfüggvény felrajzolásán felül (5. ábra) leíró statisztikát használunk¹¹ a sebesség adathalmazra (1. táblázat):



5. ábra Példa a hisztogram és a tapasztalati eloszlásra, az egyik forgalmi helyzet esetében

Azon eloszlások kiválasztásához, amelyek alkalmas jelöltek lehetnek, és az összes forgalmi helyzetre megfelelően illeszkednek, ráillesztettük az elméleti eloszlásfüggvényeket, erre példa látható az 1. táblázatban:

¹¹ Mohammad MAGHROUR ZEFREH Ph.D. hallgatóm tézist foglalmazott meg a leíró statisztikai elemzése eredményei alapján

1. táblázat Leíró statisztikai paraméterek 95%-os szignifikancia mellett

Forgalmi helyzet	Eloszlás	Minimum [m s^{-1}]	Maximum [m s^{-1}]	Átlag [m s^{-1}]	Szórás [m s^{-1}]
Mért értékek	Hisztogram	0,297	11,178	7,6788	2,4327
Tútelített torlódás	Exponenciális eloszlás	0,27	4,185	2,7999	0,7398
Szabad áramlás	Normális eloszlás	6,75	14,85	10,2978	1,7442
Szabad áramlás	Log-Normális eloszlás	9,45	14,85	12,7386	1,485
Torlódás	Gamma-eloszlás	2,7	6,75	3,9231	1,0557
Gyorsulás	Béta-eloszlás	0,27	12,15	7,4007	3,5505
Lassulás	Khi-négyzet eloszlás	0,27	9,45	5,0652	3,1914

Az egyezés jóságát – az értékkészleten, az átlagon, valamint a szóráson kívül – a ferdeség és a csúcsosság paraméterei is befolyásolják¹². Egy minta ferdesége és csúcsossága a (2.11) és a (2.12) egyenlet alapján határozható meg (Casella, Berger, 2002):

$$(2.11) \quad \text{sk}(X) = E \left[(X - E(X))^3 \right] \cdot \text{Var}(X)^{-3/2},$$

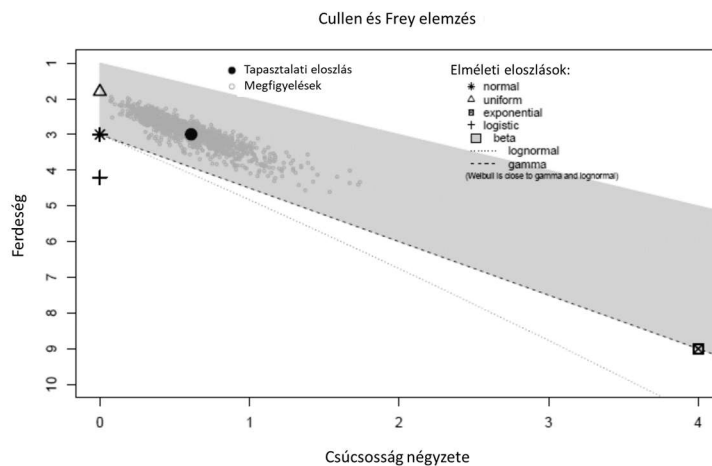
és

$$(2.12) \quad \text{kr}(X) = E \left[(X - E(X))^4 \right] \cdot \text{Var}(X)^{-4/2}.$$

Az így becsült ferdeség- és csúcsosságparamétereket tovább vizsgáljuk minden valószínűségi változóval úgy, hogy a ferdeséget a csúcsosság függvényében ábrázoljuk. A grafikus elemzés megmutatja azokat a ferdeség-csúcsosság párokat, amiket a tapasztalati eloszlás felvehet. Valójában ez az ábra megmutatja a lehetséges ferdeség-csúcsosság kombinációk tartományát¹³, amit a jelölt-eloszlás felvehet (6. ábra):

¹² Itt kell megjegyezni, hogy a leíró statisztikai definíció értelmében, a várható érték a valószínűségi változó első momentuma, a szórásnégyzet a valószínűségi változó második momentuma, a harmadik momentum a ferdeséget méri, azaz hogy az eloszlás mennyire nem szimmetrikus, a negyedik momentum pedig a lapultságot méri, azaz hogy mennyire csúcsos az eloszlás.

¹³ A grafikus ábrázolásnál az egyes eloszlástípusok felvehetnek egy pontot például a normális eloszlás esetében (0 ferdeség, 3-as csúcsosság), vagy lehet egy görbe is, ha az egyenlet, ami meghatározza a ferdeséget és a csúcsosságot, egyetlen eloszlás paramétertől függ (ilyen például a gamma-eloszlás). A ferdeség-csúcsosság kombináció fekszik egy kétdimenziós felületen abban az esetben, ha a ferdeség-csúcsosság egynél több eloszlási paramétertől függ (ilyen például a béta eloszlás). Bármilyen eloszlás esetében, a csúcsosság nagyobb vagy egyenlő, mint a ferdeség négyzete +1. Ha az érték kisebb, akkor ez az eloszlás a lehetetlen tartományba esik, azaz ezt nem fogjuk választani.



6. ábra Cullen és Frey elemzés

A lehetséges eloszlás-jelölteknek az adott forgalmi helyzetre történő kiválasztását követően, az eloszlásparamétereket (θ) a legnagyobb valószínűség elve alapján becsüljük meg (2.13):

$$(2.13) \quad L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta)$$

ahol

x_i : a megfigyelt sebesség (km/h),

$f(x_i | \theta)$: a jelölt eloszlásfüggvény sűrűségfüggvénye.

A következő vizsgált paraméteres elméleti eloszlások kerültek illesztésre a forgalmi helyzetekből származó, mért tapasztalati eloszlásokhoz: Normális (2.14), Log-normális (2.15), Exponenciális (2.16), Uniform (2.17), Logisztikus (2.18), Béta (2.19), Gamma (2.20), Weibull (2.21), Khi-négyzet (2.22), vagyis:

$$(2.14) \quad f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1},$$

$$(2.15) \quad f_{LN}(x; \alpha; \mu) = [x \cdot \alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1} \cdot \exp[-(\ln(x) - \mu)^2 \cdot 2^{-1} \cdot (\alpha)^{-2}],$$

$$(2.16) \quad f_{\text{Exp}}(x; \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x),$$

$$(2.17) \quad f_U(x) = (B - A)^{-1},$$

$$(2.18) \quad f_{\text{Log}}(x; \alpha; \mu) = \exp[-(x - \mu) \cdot (\alpha)^{-1}] \cdot \langle \alpha \cdot \{1 + \exp[(x - \mu) \cdot (\alpha)^{-1}]\}^2 \rangle^{-1}$$

$$(2.19) \quad f_B(x; k; \omega) = [x^{k-1} \cdot (1 - x)^{\omega-1}] \cdot [\eta(k, \omega)]^{-1},$$

$$(2.20) \quad f_G(x; \alpha; k) = a^k \cdot x^{k-1} \cdot \Gamma(k)^{-1} \cdot \exp(-ax),$$

$$(2.21) \quad f_w(x; \alpha; k) = k \cdot \alpha^{-1} \cdot x^{k-1} \cdot \alpha^{1-k} \cdot \exp[-x^k \cdot \alpha^{-k}],$$

$$(2.22) \quad f_{\text{Ch}}(x; \tau) = 2^{-(\tau/2)} \cdot \Gamma^{-1} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^{-1} \cdot x^{\left(\frac{\tau}{2}-1\right)} \cdot \exp\left[-\frac{x}{2}\right].$$

ahol:

α : skála paraméter [-],

μ : helyi paraméter [-],

λ : ráta paraméter [-],

A: min, B: max, $[km \cdot h^{-1}]$

k: alakparaméter [-],

ω : másodlagos alakparaméter [-],

τ : szabadságfok paraméter,

$\eta()$: béta-függvény,

$\Gamma()$: gamma-függvény.

Miután a (2.13) egyenlet alapján megbecsültük az eloszlás-jelöltek paramétereit valamennyi forgalmi helyzetre, a jelölt-eloszlásokat a megfigyelt adathalmazokra illesztettük. A különböző jelölt-eloszlások becsült paramétereit,

egymással, illetve, az illesztési teszt segítségével, a tapasztalati eloszlásokkal összehasonlítottuk.

Az illesztési teszt célja az illesztett eloszlási paraméterek és a tapasztalati eloszlás paraméterei közötti távolság mérése (tulajdonképpen a kumulált eloszlási függvények között). Három illesztési tesztet (Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von-Mises, és Anderson-Darling) alkalmaztunk (D'Agostino, 2017):

$$(2.23) \quad d_{KS} = \sup |F_n(x) - F(x)| ,$$

$$(2.24) \quad d_{KvM} = \int_{-\infty}^{\infty} [F_n(x) - f(x)]^2 dx,$$

$$(2.25) \quad d_{AD} = n \cdot \int_{-\infty}^{\infty} [(F_n(x) - F(x))^2 \cdot F(x)^{-1} (1 - F(x))^{-1}] dx,$$

ahol:

F_n : a gépjárműs-ebességek tapasztalati kumulált eloszlásfüggvénye,

F_x : illesztett elméleti eloszlás.

Ezen a három illesztéspontosság¹⁴ teszten kívül, a legnagyobb logaritmikus valószínűség elve segítségével, a túlzott illesztés elkerülése érdekében két büntető kritériumot alkalmaztunk (Akaike – AIC és Bayes-i információs kritérium – BIC):

$$(2.26) \quad AIC = 2n - 2\ln(\hat{L}),$$

$$(2.27) \quad BIC = \ln(i) n - 2\ln(\hat{L}) ,$$

ahol:

n : a becsült paraméterek száma a modellben,

$\hat{L}$: a likelihood függvény maximum értéke ebben a modellben,

i : megfigyelések száma.

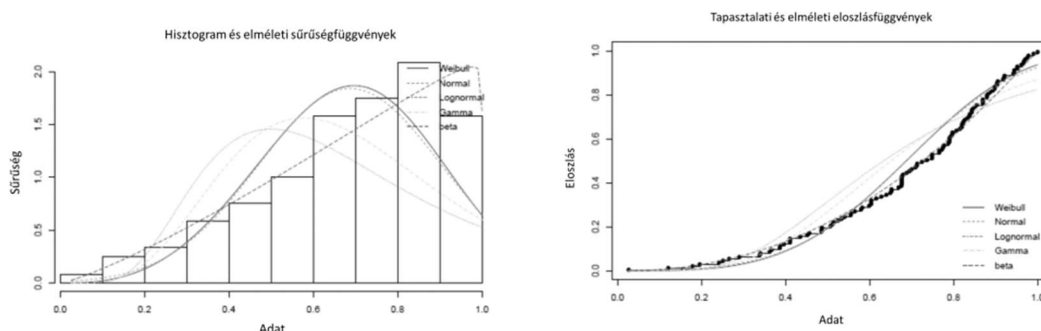
¹⁴ A pontosság itt a kumulált eloszlásfüggvény és az elméleti eloszlás közötti távolságként értelmezendő, különböző metrikák alkalmazásával.

Kiválasztva a parametrikus kijelölt elméleti eloszlásokat, az eloszlás paramétereit megbecsültük a legnagyobb valószínűség módszerével a (2.13) egyenlet alapján és a vonatkozó sűrűségfüggvényt pedig úgy alkalmaztuk, hogy ráillesztettük a jelölteloszlásokat az adathalmazra minden forgalmi helyzetnél (2. táblázat):

2. táblázat Példa az illesztés jóságára az egyik részhalmaz esetén

Illesztés jóságát igazoló teszt	Weibull	Normális	Log-Normális	Gamma	Béta
Kolmogorov-Smirnov	0,111	0,108	0,174	0,153	0,056
Cramer-von-Mises	0,343	0,329	1,268	0,838	0,06
Anderson-Darling	2,187	2,032	7,217	4,817	0,466
Akaike információs kritérium	-18,817	-22,345	62,594	21,001	-53,638
Bayes-i információs kritérium	-13,242	-16,77	68,169	26,576	-48,063

Ezzel a jelölt-eloszlásokat és a tapasztalati eloszlásokat az összes mérésen alapuló forgalmi helyzet esetében össze lehetett hasonlítani. A kijelölt eloszlások paramétereinek becslését a 1. táblázat és a 2. táblázat mutatja, a sűrűségfüggvényre és az eloszlásfüggvényre vonatkozó illesztéseket pedig a 7. ábra:



7. ábra Példa a tapasztalati és az elméleti valószínűségi változók sűrűség és eloszlásfüggvényeire egy kiragadott forgalmi helyzet esetén

A gyorsítási folyamat alsó határa az a feltétel, hogy a gépjárművek majdnem megállnak, és készek a gyorsításra. A lassító folyamat alsó határa, amikor a járművek csökkentik a sebességüket addig, míg már majdnem megállnak. 1940 óta a tanulmányok többsége normális eloszlást feltételez a sebességeloszlásra, és csak szélsőséges esetekben teszik fel, hogy egy áramlás nagysága meghaladja a kapacitást, azaz a sebesség eloszlása a magasabb sebességek felé annyira torz, hogy a normalitását teljesen elveszti. Számos tanulmány készült arról, hogyan vizsgálják a motorizált gépjárművek sebességadatait, mivel azok normális, ferde és összetett eloszlást mutatnak. A normális eloszlásra tekintetében Leong (Leong, 1968) és McLean (McLean, 1979) megállapították, hogy kis forgalomnagyságnál két forgalmi sávú úton a legtöbb személygépjármű zavartalanul közlekedett, a gépjárművek sebességeinek eloszlása a normális eloszlást mutatta. Minh és társai a normális sebességeloszlás alkalmazhatóságát a városi utakon tanulmányozták (Minh, Sano, Matsumoto, 2005). Wang és társai a sebességre és az utazási időre csonkított normális és log-

normális eloszlást illesztettek (Y. Wang et al., 2012). Zou és Zhang szerint, normális eloszlás a csúcosságot nem írja le pontosan, ezért a sebességeloszlások leírására normál ferdeségű és egy ferde-T eloszlás kombinációját ajánlották. Véleményük szerint, (Zou, Zhang, 2011) az egyhangú és a változatos forgalom esetén is, ez a kettő megfelelően fogja a sebességek eloszlását szemléltetni. Haight és Mosher (Haight, Mosher, 1962) azt feltételezte, hogy a forgalomáramlás sebességét a gamma- vagy a log-normális eloszlás tükrözi a legjobban. Ezek az említett eloszlások azt az előnyös tulajdonságot nyújtják, hogy ugyanazt a funkcionális alakot veszik fel, amikor az idő alapú sebességeloszlást tér alapú sebességeloszlásra váltják át, és mellőzik az elméletileg szóba jövő negatív sebesség problémáját, ami a normális eloszlásnál, a végtelenbe nyúló értékkészletből adódik. A különböző sebességeloszlásokhoz vezető forgalomtechnikai körülmények elég gyakran nem autópályán, hanem városi környezetben jelennek meg, ahol a közlekedési áramlat sokkal összetettebb, nagyobb zavarásnak van kitéve.

A korábbiakban részletesen ismertetett, méréseken alapuló matematikai statisztikai elemzés segítségével, 95%-os szignifikanciaszint mellett, megállapítottuk, hogy a közúti-, városi forgalomban, egyéni közlekedés személygépjárműveinek sebességeloszlása függ a forgalmi helyzettől, és a következő függvényekkel jellemezhető:

0,27-4,3 [m · s⁻¹] sebességtartományban - túltelített torlódás¹⁵ esetén - exponenciális, $f_{Exp}(x; \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$

3,7-6,94 [m s⁻¹] sebességtartományban - torlódás esetén - gamma-eloszlás, $f_G(x; \alpha; k) = \alpha^k \cdot x^{k-1} \cdot \Gamma(k)^{-1} \cdot \exp(-\alpha x)$

6,94-15,27 [m s⁻¹] sebességtartományban - szabad áramlás esetén - normális eloszlás, $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$

1-12,5 [m s⁻¹] sebességtartományban - gyorsulás esetén - béta eloszlás, $f_B(x; k; \omega) = [x^{k-1} \cdot (1-x)^{\omega-1}] \cdot [\eta(k, \omega)]^{-1}$

1-9,72 [m s⁻¹] sebességtartományban - lassulás esetén - Khi-négyzet eloszlás $f_{Ch}(x; \tau) = 2^{-(\tau/2)} \cdot \Gamma^{-1} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^{-1} \cdot x^{\left(\frac{\tau}{2}-1\right)} \cdot \exp\left[-\frac{x}{2}\right]$

volt a legjobban illeszthető az 1924 elemű minta részhalmazait képező forgalmi helyzetre.

Összegezve, a jelen fejezetben a forgalomáramlás sebességeloszlása különböző helyzetekben került vizsgálatra. Megfigyelésre került, a forgalom áramlás sebessége:

- exponenciális túltelített áramlásban,
- normális/log-normális, telítetlen/szabad áramlásban,
- gamma torlódásban,
- béta gyorsuló,
- és khi-négyzet eloszlást követő lassuló áramlásban.

¹⁵ Azt a forgalmi körülményt nevezik túltelített torlódásnak, ahol a forgalmi torlódás a forgalomirányító berendezés egy ciklusa alatt nem fog megszűnni.

Ezen függvények ismerete segíti az energiafelhasználás és a környeztkárosítás (légszennyezés, zaj) modellszintű megállapításait.

A fenti mérési eredményeket összevetettem a német és amerikai szabványokkal, a kölcsönös megfeleltetés kedvéért. Az előző fejezetben bemutatott autópályákra jellemző minőségi paraméterrendszer helyett a szakirodalomban megtalálható városi környezetre jellemző értékeket tüntettem fel (3. táblázat):

3. táblázat Illesztett eloszlások megfeleltetése a nemzetközi szabvánnyal

Forgalmi helyzet	Stabilitás	Eloszlás	Minimum [m s ⁻¹]	Maximum [m s ⁻¹]	Átlag [m s ⁻¹]	Szórás [m s ⁻¹]	Amerikai szabvány szint [-]	Amerikai szabvány [m s ⁻¹] ¹⁶	Német szabvány szint [-]	Német szabvány [m s ⁻¹] ¹⁷
Szabad áramlás	Stabil	Normális eloszlás	6,75	14,85	10,2978	1,7442	A: Szabad áramlás B: Szabad áramlás C: Szabad áramlás D: Részben kötött	29<	A: Szabad áramlás B: Részben kötött áramlás C: Egyidejű áramlás D: Akadályoztatott áramlás	11<
Szabad áramlás	Stabil	Log-Normális eloszlás	9,45	14,85	12,7386	1,485	A: Szabad áramlás B: Szabad áramlás C: Szabad áramlás D: Részben kötött	29<	A: Szabad áramlás (frei) B: Részben kötött áramlás (teilgebunden) C: Egyidejű áramlás (synchron) D: Akadályoztatott áramlás (stockend)	11<
Torlódás	Instabil	Gamma-eloszlás	2,7	6,75	3,9231	1,0557	F: Kötött áramlás	<13	E: Leszakadó áramlás (gestaut)	3,8-5
Gyorsulás	Instabil	Béta-eloszlás	0,27	12,15	7,4007	3,5505	F: Kötött áramlás	<13	E: Leszakadó áramlás (gestaut)	3,8-5
Lassulás	Instabil	Khi-négyzet eloszlás	0,27	9,45	5,0652	3,1914	F: Kötött áramlás	<13	E: Leszakadó áramlás (gestaut)	3,8-5
Tútelítetett torlódás	Instabil	Exponenciális eloszlás	0,27	4,185	2,7999	0,7398	F: Telített áramlás	<13	F: Telített/álló áramlás (stehend)	<3,8

forrás: Tunver, et. al., 2010 és Schmietendorf, 2010 alapján

16

17

Megállapítottam, hogy a matematikai statisztikai módszerekkel feltárt városi közlekedési forgalmi helyzetek megfeleltethetők a nemzetközi (amerikai-német) szabványrendszernek. A kidolgozott módszer alkalmas a sebesség valószínűségi függvények meghatározására és ezek alapján a forgalmi áramlati állapotok definiálására városi körülmények között.

A fejezet eredményeihez kapcsolódó publikációim: (Á Török, Berta, 2009), (Berta, Török, 2009), (Zefreh et al., 2016), (A. Török, Zefreh, 2016), (Zefreh, Torok, 2016) (Zefreh, Torok, 2018a), (Zefreh, Torok, 2018b)¹⁸

¹⁸ **Mohammad MAGHROUR ZEFREH Ph.D. hallgatóm tézise, a cikk alapján:** Eltérő közlekedési körülményeket azonosítottam, valós mérési eredmények alapján. Megbecsültem az áramlás átlagsebességét. Matematikai statisztikai illeszkedésvizsgálattal megállapítottam a közlekedési szituációkhoz legjobban illeszkedő elméleti eloszlást.

3.

Városi személygépjármű közlekedés energiatelhasználása

Az Európai Unió Tanácsa az éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodásra vonatkozó uniós stratégiában többek között arra figyelmeztet, hogy „...az **EU célkitűzése a globális felszíni középhőmérséklet ne haladja meg 2°C-nál többel az iparosodás előtti szintet, gyors és ambiciózus intézkedéseket követel a nemzetközi közösség részéről az éghajlatváltozás hatásainak mérséklésére; kiemeli továbbá, hogy szükséges és elkerülhetetlen, hogy e hatások enyhítését alkalmazkodással egészítsük ki, felhívja a figyelmet arra, hogy az elmúlt évtized folyamán (2002–2011) Európa szárazföldi középhőmérséklete 1,3°C-kal az iparosodás előtti szint felett volt, vagyis meghaladta a világszintű átlaghőmérsékletet, és már érezhető az éghajlatváltozás hatásai: gyakoribbak és intenzívebbek a szélsőséges időjárási események, változások észlelhetők a vízkörforgásban és a tengerszintekben, és mindez társadalmi, gazdasági és természeti hatásokkal jár; elismeri az éghajlatváltozással járó elkerülhetetlen hatásokhoz való korai, tervezett módon történő alkalmazkodás fontosságát, különösen a leginkább sebezhető régiók, illetve társadalmi csoportok esetében; kiemeli, hogy az alkalmazkodást célzó megfelelő intézkedések helyetti tétlenség vagy a késlekedés további költségeket eredményezhet. Nyugtázza, hogy néhány szektorban – mint például a [...] közlekedés esetében –, illetve egyes fontos szakpolitikai eszközökben – például a [...] migráció és a mobilitás területén – már megtörtént az alkalmazkodás szempontjainak az uniós jogszabályokba való beépítése.” (Az Európai Unió Tanácsa, 2013)**

„A klímaváltozás hatásainak enyhítését célzó intézkedések (mitigáció), számos Európai Uniói nemzeti adaptálta nemzeti szintű stratégiájában. Ilyen közösségi erőfeszítéseket szorgalmazó intézkedések:

- *a megújuló tüzelőanyagok szélesebb körű alkalmazása;*
- *energiahatékonyság növelése;*
- *CO₂-kibocsátás csökkentése”*

A hatások enyhítését célozza a 2009-ben adaptált 20-20-20 irányelv, mely szerint 2020-ig 20 %-os ÜHG-kibocsátáscsökkentés a cél (az 1990-es szinthez viszonyítva), 20 %-os megújuló részarány biztosítása EU szinten az energiafelhasználásban, és az energiahatékonyság 20%-os növelése. *(European Environment Agency, 2013, 2014a, 2014b)*

„A közúti közlekedési rendszer versenyképessé és erőforrás-hatékonyá tételéhez az ÜHG-kibocsátáscsökkentés 60%-os elérése, illetve ehhez újfajta, fenntartható tüzelőanyagok és meghajtó rendszerek kifejlesztése és bevezetése a cél. A városi közlekedésben a „hagyományos tüzelőanyaggal működő” gépjárművek használatát 2030-ig felére kell csökkenteni, 2050-re pedig teljesen ki kell küszöbölni. A jelentősebb városközpontok logisztikáját alapvetően széndioxid-mentesíteni kell 2030-ra.” (Európai Bizottság, 2011)

A szélsőséges időjárási jelenségek jelentős gazdasági és társadalmi következményekkel járnak, melyek gyakorisága és súlyossága Magyarországon növekedni fog (Török Ádám, 2006b), (Török Ádám, 2008). Veszélybe kerülnek az épített környezet elemei (épületek, közlekedési infrastruktúra, energia- és vízellátási hálózat), elsősorban a **sűrűn lakott területeken**. A területfelhasználást ezért stratégiai és hosszú távú szemlélettel kell tervezni, legyen szó akár közlekedésről akár regionális fejlesztésről (Az Európai Közösségek Bizottsága, 2009).

Az EU által is elismert tény, hogy a szárazföldi közlekedés egyedi céladatokat határozhat meg. *„2020-ra a kitűzött megújuló részarány a közlekedési ágazatra 10%, a közlekedésben felhasznált tüzelőanyagok széndioxid-mentesítésére 6%. Meg kell határozni, hogy a megújuló energiára*

vonatkozó célkitűzések hogyan valósíthatók meg a leghatékonyabban. A megújuló energiákra vonatkozó bármiféle cél vagy szakpolitika meghatározásakor figyelembe kell venni a fenntarthatóságra, a költségekre, valamint a technológiák érettségi szintjére és innovációs potenciáljára vonatkozó, egyre gyarapodó tapasztalatokat. Aggályok merültek fel az új fejlődési pályával kapcsolatban: „[...] az EU éghajlat-változással szembeni elkötelezettségét más országok nem követik, ami hatással van az EU versenyképességre.” (Európai Bizottság, 2013)

A közlekedés átalakulásában várható változások eredményeképp előtérbe kerül a nem motorizált közlekedés, valamint a közforgalmú közösségi közlekedés. A gépkocsi-állomány átalakul, a fajlagos fogyasztás lecsökken, ennek következtében az ÜHG-kibocsátás is a jelenlegi kibocsátás töredékére csökken, s elterjednek az alternatív meghajtású gépjárművek mind az egyéni, mind a közforgalmú közösségi közlekedésben. ***„Az éghajlatvédelmen belül a közlekedési ágazat az egyetlen, ahol a végső energiafelhasználást tekintve a világtrendekhez hasonlóan Magyarországon is nő az energiafelhasználás és ezzel együtt az éghajlatváltozást fokozó hatása is. A közlekedési szektoron belül 90%-os részesedéssel a közúti közlekedés a legszámottevőbb kibocsátási forrás. A közúti közlekedésen belül a kibocsátás több mint a feléért a személygépjárművek, egyharmadért a teher- és áruszállító gépjárművek, míg a fennmaradó részért a buszok és az egyéb közlekedési járművek felelősek.*** (Közlekedési, Vízügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium, 2008)

A közlekedés az egyetlen olyan szektor, amelyben 1990 után nőtt a kibocsátás. Ennek fő oka az EU-hoz 2014-ben is azt követően újonnan csatlakozott országoknak az átlagtól messze elmaradó, ahhoz felzárkózó motorizációja és személygépjármű-használata a közösségi közlekedés és a vasúti közlekedés helyett. ***„Az 1990-es évek legelején – az elavult gépjárműpark cseréjének következtében – kis mértékben mérséklődtek a közlekedési eredetű kibocsátások, 1995 és 2009 között azonban csaknem megduplázódott a járművek kibocsátása (6985,2-ről 12675,9 CO₂ egyenérték, Gg¹⁹-ra növekedett), 2009 óta***

¹⁹ Gg – gigagramm, 10⁹ gramm, egyes esetekben az irodalom használja még a kt – kilótonna mértékegységet, de a tonna nem SI mértékegység.

pedig 10,3%-os csökkenés figyelhető meg. A benzinfelhasználás 1998 óta nem volt olyan alacsony, mint 2011-ben, és a gázolaj felhasználásban is jelentős visszaesés volt tapasztalható. A fentiek mellett Magyarországnak is fel kell készülnie az alternatív hajtások terjedésére és az infrastrukturális feltételek megteremtésére, amely főképp a jogszabályi keretrendszer kialakítását, kisebb részt egyéb ösztönzők bevezetését jelenti. Az alternatív hajtású járművek töltési infrastruktúrájának nagy léptékű kiépítése az addigi tapasztalatok figyelembevételével továbbfejlesztett jogszabályok és szabványok alapján.”
(Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, Nemzeti Alkalmazkodási Központ, 2013)

A közlekedésnek meg kell felelnie a természeti, a gazdasági és a társadalmi környezet által definiált térben úgy, hogy gazdaságilag hatékonyan, környezetkímélő módon elégítse ki a társadalom mobilitási igényeit. A társadalom jogos igénye a közlekedésből származó környezetterhelések, károsanyag-kibocsátások minimalizálása. Földünk klímája változik, és ez hatással van a társadalom és a gazdaság állapotára egyaránt (Szlávik, Csete, 2012), (Pálvölgyi, Szendrő, 2012). Jelen fejezetben bemutatott vizsgálataim célja a hazai közlekedésben használható megújuló komponens tartalmú folyékony tüzelőanyagok komplex környezetterhelésének becslése városi környezetben.

Európai Unió stratégiai cél a 2020-ig megvalósítandó 20e/e%-os²⁰ megújuló elsődleges energia részarány (European Commission, 2010). Mivel az EU tagországi felismerték, hogy a közlekedési szektor inerciája miatt nehezen tud megváltozni, ezért a szektor 20 e/e%-os célkitűzését 10 e/e%-ra csökkentették. A 2020-as célkitűzések alaposabb vizsgálata során felvetődik a probléma, hogy az előírt 10e/e%-os elérendő megújuló részarány és a jelenleg (2019) bekeverhető 10 v/v%-os biotüzelőanyag részarány nincs összhangban, mivel a benzinhoz hozzákeverendő bioetanol jelentősen, a gázolajhoz keverendő biodízel pedig minimálisan kisebb fűtőértékkel rendelkezik, mint a hagyományos tüzelőanyagok.

²⁰ Gyakran keveredik az e/e% és a v/v%. Értekezéseimben konzekvensen jelölöm az e/e%-ot (energiaszázalék), mely a fűtőérték (energiatartalom) összehasonlítására alkalmas, és a v/v%-ot, amely a térfogatok összehasonlítására alkalmas (térfogatszázalék)

A fent említett tüzelőanyagok főbb tulajdonságait a 4. táblázat tartalmazza. A későbbi számításokhoz a fűtőértékek ismerete elengedhetetlen. Látható, hogy a benzinhez és a gázolajhoz kevert biokomponensek fűtőértékei elmaradnak a fosszilis tüzelőanyagokétól.

4. táblázat: Tüzelőanyagok fontosabb tulajdonságai

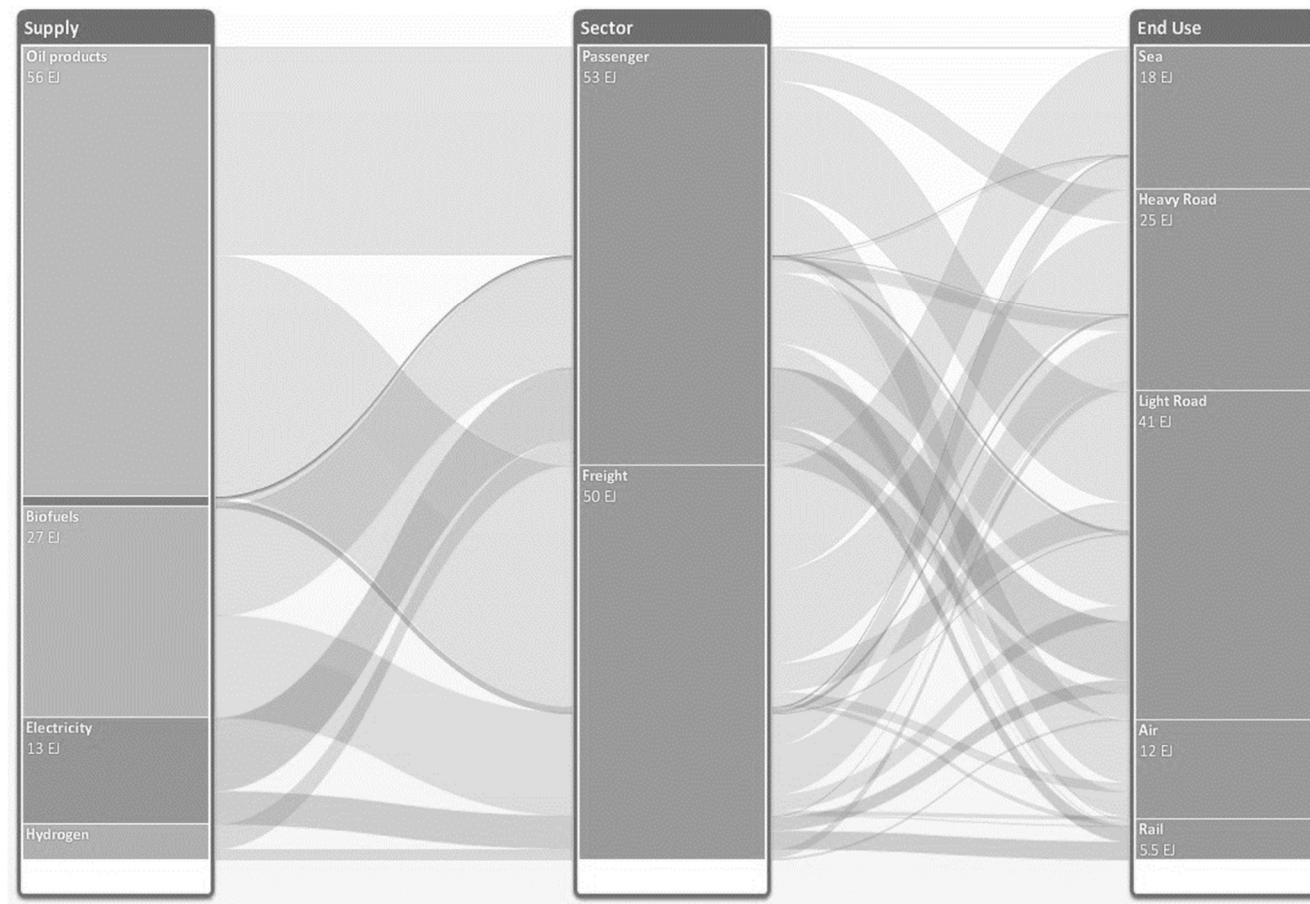
Tüzelőanyag	Sűrűség [kg/m ³]	Fűtőérték [MJ/kg]	Fűtőérték [MJ/m ³]	Oktánszám	Cetánszám
Benzin	760	42,7	32500	92	
Gázolaj	840	42,7	35900		50
Bioetanol	790	26,8	21200	>100	
Biodízel	880	37,1	32700		56
Biometán	0,72	50	36	130	

Forrás: BME Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Tüzelőanyagok és Jellemzőik, Egyetemi jegyzet

Ennek következtében, a megújuló tüzelőanyag részaránya a jelenleg megengedhető, maximális biotüzelőanyag-komponens hozzákeverés esetén is 10 e/e% alatt marad. Nem jelent nagy pontatlanságot, ha kizárólag a motorbenzin és a gázolaj felhasználásából indulok ki, ugyanis az egyéb alternatív hajtóanyagok vagy hajtásláncok jelenleg nagyon kicsi, gyakorlatilag elhanyagolható (1-2% közötti) részarányt képviselnek. Ez nem csak Magyarország esetében igaz, hanem a Nemzetközi Energiaügynökség ábráin is jól láthatóak a 2020-ra várt arányok (8. ábra) és a 2050-re elkészített előrebecslés (9. ábra):



8. ábra **Közlekedésben felhasznált energiamennyiségek várható alakulása globálisan, 2020-ban**
(forrás: Nemzetközi Energetikai Ügynökség előrebecslése, 2009
<http://www.iea.org/etp/explore/>)



9. ábra: Közlekedésben felhasznált energiamennyiségek várható alakulása globálisan, 2050-ben
 (forrás: Nemezetközi Energetikai Ügynökség előrebecslése, 2009
<http://www.iea.org/etp/explore/>)

A fogyasztási adatokból és a tüzelőanyagok fűtőértékéből könnyen számítható a felhasznált energiamennyiség a következő módon:

$$(3.1) \quad E = \dot{V}_{\text{tüzelőanyag}} \cdot \text{LHV},$$

ahol:

E: Energiaproduktum [PJ],

$\dot{V}_{\text{tüzelőanyag}}$: tüzelőanyag éves fogyasztása [10^6 l],

LHV: az a hőmennyiség, amely 10^3 g tüzelőanyagból kinyerhető olyankor, ha a füstgázzal együtt távozó víz gőz halmazállapotban hagyja el a berendezést [10^6 J · l⁻¹].

Hazánkban 2008 óta kevernek 4,4 v/v%-ban biokomponenseket a tüzelőanyagokhoz, azóta a következőképpen alakultak a felhasznált mennyiségek (5. táblázat):

5. táblázat: A hazai közlekedés által felhasznált tüzelőanyag- és energiamennyiség

Év	Benzin [millió liter]	Ebből etanol (4,4V/V%) [millió liter]	Benzinből nyert energia [PJ]	Gázolaj [millió liter]	Ebből biodízel (4,4V/V%) [millió liter]	Gázolajból nyert energia [PJ]	Összes energia [PJ]
2008	2 085	91,7	66,7	3 472	152,8	125,0	191,7
2009	2 026	89,1	64,8	3 458	152,2	124,5	189,3
2010	1 790	78,8	57,3	3 274	144,1	117,9	175,1
2011	1 692	74,4	54,1	3 293	144,9	118,5	172,7
2012	1 584	69,7	50,7	3 121	137,3	112,4	163,0
2013	1 274	56,1	40,8	2 951	129,8	106,2	147,0
2014	1 366	60,1	43,7	3 362	147,9	121,0	164,7
2015	1 257	55,3	40,2	1 924	84,7	69,3	109,5
2016	1 309	57,6	41,9	2 048	90,1	73,7	115,6
2017	1 351	59,4	43,2	2 117	93,1	76,2	119,4

(forrás: saját szerkesztés, Nemzeti Adó- és Vámhivatal adatai alapján)

A 5. táblázatból jól látható, hogy az elmúlt években a felhasznált tüzelőanyag-mennyiség jelentősen csökkent, amelyet főként a benzinfogyasztás visszaesése okozott. A gázolaj mennyisége kisebb mértékben változott. Látható, hogy a vizsgálati időben a benzin energetikai részaránya a fosszilis tüzelőanyagokon belül közel állandó 35e/e% volt. A vizsgálat végén (2017) $5,94 \cdot 10^7$ liter bioetanolt és $9,31 \cdot 10^7$ liter biodízelt keverték hozzá a fosszilis tüzelőanyagokhoz, az ezekből nyert megújuló energia (3.1) így összesen 4,3 PJ, ami mintegy 3,5 e/e%-os részarányt jelent.

Az elmúlt években a közúti közlekedés energiafelhasználást leíró modelljei – a jobb becslés, valamint a magas időbeli és térbeli felbontás érdekében – egyre nagyobb bemeneti adat²¹ igényel rendelkeznek, és a közúti közlekedés energiafelhasználását egyre komplexebben írják le. A következőkben a közúti közlekedés energiafelhasználását leíró modelleket mutatom be röviden. A közúti forgalom által felhasznált energia elemzésére szolgáló környezet kialakítása érdekében, a közúti gépjárművek által felhasznált energiamennyiségre vonatkozó becslések pontosságát fokozni kell. Az erre a célra általánosan alkalmazott megközelítések egyike a primer energiafelhasználás modellezése. Ebben a fejezetben a legfontosabb kutatási kérdés az, hogy kimutatható-e a modellezés javulása, illetve a bekevert biokomponensnek a hazai közúti közlekedés forgalomfüggő energiafelhasználásában szignifikáns-e a részaránya?

²¹ Az adat elemi ismeret. Az adat tények, fogalmak olyan megjelenési formája, amely alkalmas emberi eszközökkel történő értelmezésre, feldolgozásra, továbbításra. Az adatokból gondolkodás vagy gépi feldolgozás útján információkat, azaz új ismereteket nyerünk. Az információ olyan új ismeret, amely megszerzője számára szükséges, és korábbi tudása alapján értelmezhető. Az információ olyan tény, amelynek megismerésekor olyan tudásra teszünk szert, ami addig nem volt a birtokunkban. Esetünkben a közúti közlekedés energiaigényéről gyűjtött adatok térbeli, időbeli és fajtaspecifikus felbontása megnövekedett, így pontosabban becsülhetőek a közúti közlekedés energetikai és környezetvédelmi aspektusainak információi.

Értekezésemben a közlekedési energiafelhasználást becslő rendszerek három generációját hasonítom össze fejlődéstörténeti sorrendben²². Először a tüzelőanyagfogyasztás alapú energetikai modelleket vizsgáltam meg (3.2):

$$(3.2.) \quad {}^1E = \sum_{j=1}^p ({}^1ef_j \cdot m_j) = \sum_{j=1}^p (ef_j \cdot \varphi_j \cdot s_j \cdot \rho_j \cdot \beta_j)$$

ahol:

1ef_j : a j. gépjárműcsoport energiafogyasztási paramétere
[$10^3 \text{ J} \cdot (\text{g tüzelőanyag})^{-1}$],

m_j : a j. gépjárműcsoport által elfogyasztott tüzelőanyag mennyisége
[10^3 g tüza],

φ_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző tüzelőanyag fogyasztás [$\text{l} \cdot 10^{-5} \text{ m}$],

s_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző futásteljesítmény [10^3 m],

ρ_j : a j. gépjárműcsoportot meghajtó tüzelőanyag sűrűsége [$10^3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$],

β_j : a j. gépjárműcsoportba tartozó gépjárművek száma [db]²³.

Látható, hogy a modell²⁴ a felhasznált energiát a felhasznált tüzelőanyag mennyiségéből és a gépjárművek futásteljesítményéből származtatja, de figyelmen kívül hagyja a belsőégésű hőerőgépek fejlődését. Másodikként az EURO környezetvédelmi osztályba sorolás alapú modelleket vettem górcső alá, hiszen a környezetvédelmi fejlődéssel az energiahatékonyság is együtt fejlődött (3.3):

²² A historikus generációkat jelöltem a bal felső indexeléssel.

²³ A nemzetközi szakirodalom alapján ezek a modellek a kompresszió és szikragyújtású belsőégésű hőerőgépeket különböztetik meg.

²⁴ A modell egy, a tudományos kutatásban használt fogalom, amely a nagyon pontosan (tehát a matematika nyelvén) megfogalmazott szabályokat jelenti. A modellezés során a valóság egy meghatározott szeletéből kiemeljük a számunkra adott helyzetben fontos, ismert vagy feltételezett elemeket, és azokat megfelelően matematikai kapcsolatba hozzuk egymással. Az így elkészített modellt tesztelnünk kell. Ha a modell úgy viselkedik, ahogyan a modellezni kívánt rendszer vagy objektum (tehát az előrejelzései a közvetlen tapasztalatokkal egybevág), akkor mondhatjuk a modellt jónak (céljának megfelelő keretek között használhatónak ítéltető), ha eltér attól, akkor a modellt tovább kell fejleszteni vagy el kell vetni. A modellnek valós tapasztalatokkal való összevetését a modell ellenőrzésének (verifikációjának) nevezzük.

$$(3.3) \quad {}^2E = \sum_{j=1}^m ({}^2ef_j \cdot s_j \cdot \beta_j),$$

ahol:

2ef_j : a j. EURO csoport energiafogyasztási paramétere [$10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$],

s_j : futásteljesítmény [m],

β_j : gépjárművek száma az EURO osztályban [db].

Látható, hogy a modell a felhasznált energiát a belsőégésű hőerőgép által felhasznált tüzelőanyag mennyiségéből és a gépjárművek futásteljesítményéből származtatja, figyelembe véve a belsőégésű motor fejlődését, energiahatékonyságát, de figyelmen kívül hagyja a belsőégésű hőerőgépek aktuális állapotát és a közúti gépjárművek sebességét. Végezetül, a legmodernebb, sebesség alapú polinomiális (Ntziachristos, Samaras, 2016) becslési eljárást vizsgáltam meg (3.4):

$$(3.4) \quad {}^3E = \sum_{j=1}^m ({}^3ef_j(v) \cdot s_j \cdot \beta_j)$$

ahol:

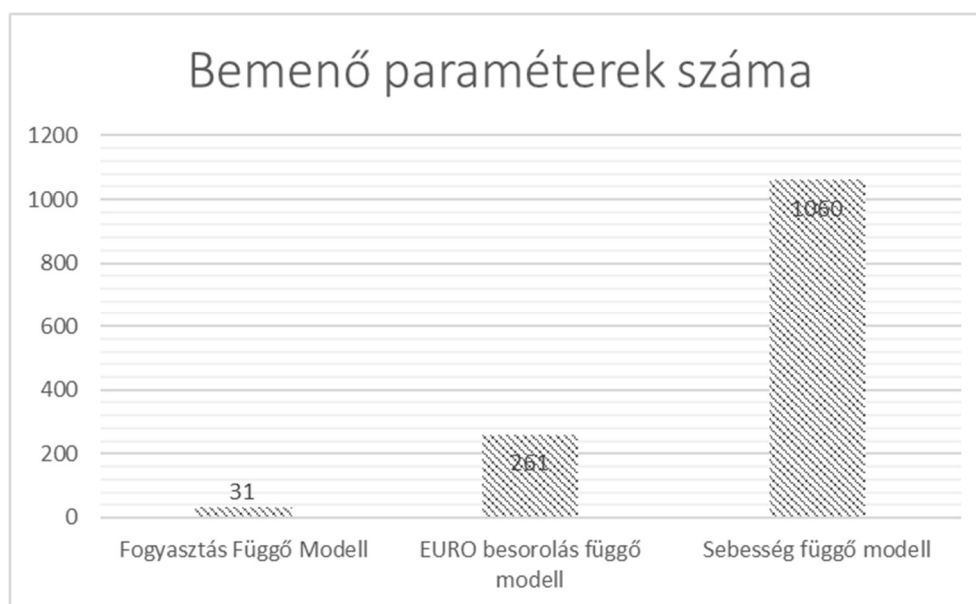
3ef_j : sebesség alapú energiafogyasztás polinomiális közelítése EURO osztályonként²⁵,

s_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző futásteljesítmény [m],

β_j : gépjárművek darabszáma az EURO osztályban [db]

Az összehasonlíthatóság érdekében a 3 makro energetikai modellt azonos körülmények között vizsgáltam. Az elemzésemhez 1 600 személygépjárműnek az 1 km hosszúságú úton történő elhaladását vettem alapul (10. ábra):

²⁵ A regressziós közelítéséből adódó polinóm: $EF_i = (a_i + c_i \cdot v + e_i \cdot v^2) / (1 + b_i \cdot v + d_i \cdot v^2)$



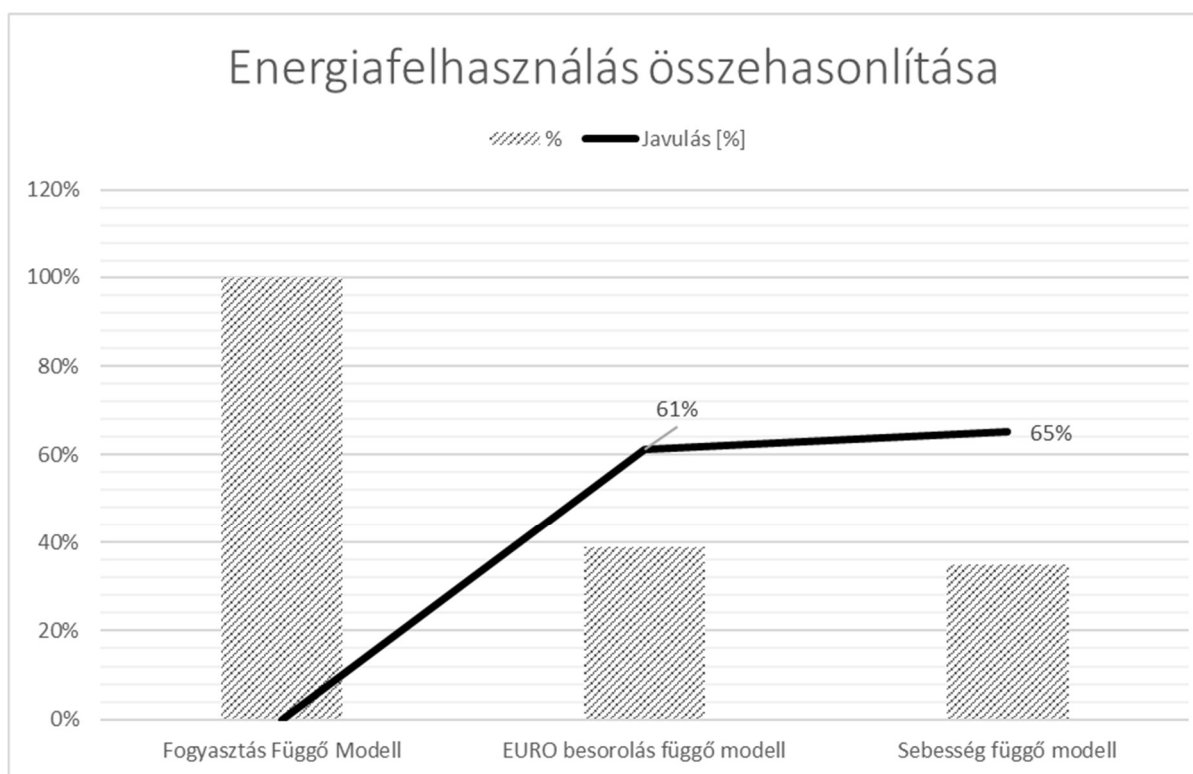
10. ábra Közúti közlekedés energiafelhasználását becslő modellek fejlődése, a bemenő paraméterek száma alapján
(forrás: (Andrejszki²⁶, Török, 2017))

A modellek között kiemelt jelentőségű a sebességet figyelembevevő modell szerepe és eredménye. A tüzelőanyagfogyasztás alapú modellnek 31 bemenő paraméterre²⁷, másodszor az EURO osztályba sorolást is figyelembe vevő modellnek már 261 paraméterre volt szüksége, míg a sebességet is figyelembe vevő modellnél már 1060 paraméter kellett a futtatáshoz.

Megállapítottam, hogy a közúti közlekedés energiafelhasználásnak makroszintű becslési pontosságát a modellparaméterek száma nagy mértékben befolyásolja. A becslési eljárás pontossága nagymértékben javult a számítási kapacitás fejlődésével, a vizsgált paraméterrendszer növelésével (11. ábra):

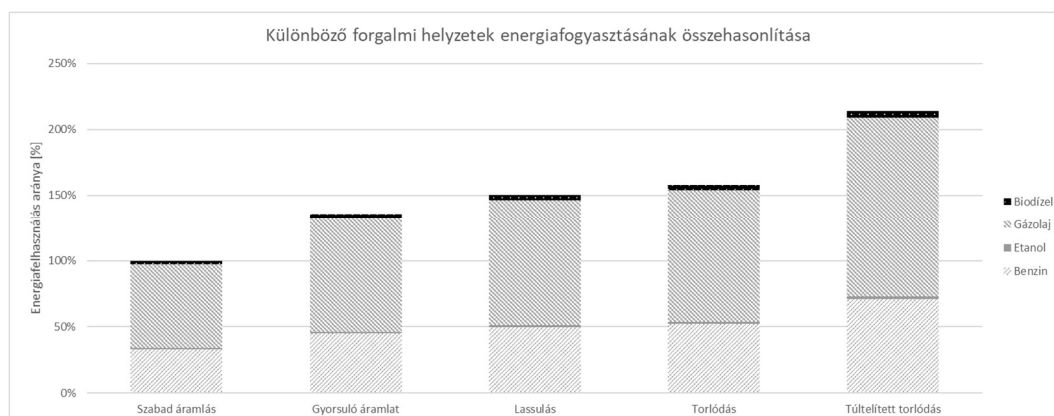
²⁶ Andrejszki Tamás publikációval kapcsolatos tézise: Megállapítottam, hogy a közlekedési rendszer komplex volta miatt a tervezésben a döntéstámogató statisztikai előrebecslés és a visszafejtés együttes alkalmazása adhat kellően megbízható eredményt.

²⁷ Értekezésemben a változó egy mennyiség vagy egy objektum szimbolikus jelölése. A matematikában a változó gyakran egy ismeretlen mennyiséget jelent. A változókat gyakran a konstansokkal ellentétes értelemben használjuk. Ezzel szemben a paraméter egy tetszőleges értékű állandó, műszaki mutató, jellemző érték.



11. ábra Az energiafelhasználás becslésének fejlődése és összehasonlítása

A sebességfüggő, másodfokú polinomiális becslő modellt alkalmazva ($EF_j = (a_j + c_j \cdot v + e_j \cdot v^2) \cdot (1 + b_j \cdot v + d_j \cdot v^2)^{-1}$), figyelembe vettem a hazai gépjárműállomány és tüzelőanyagellátás sajátosságait, és ezek alapján megállapítottam, hogy az előbbieken bemutatott eltérő forgalmi helyzetek (5 db) – az eltérő sebességeloszlások miatt – eltérő energiafelhasználást eredményeznek. Továbbá azt is megállapítottam, hogy a jelenleg szignifikáns mennyiségben bekevert biokomponensek hatása az energiafelhasználás szempontjából nem szignifikáns (12. ábra):



12. ábra Különböző forgalmi helyzetek energiafogyasztásának összehasonlítása

Megállapítottam, hogy a $0,28 - 4,31 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ sebességtartományban (tútelített torlódás), az energiaszükséglet az exponenciális sebességeloszlás $f_{Exp}(x; \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$ esetén volt a legnagyobb, míg a $6,94 - 15,28 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ sebességtartományban (szabad áramlás), az energiaszükséglet a normális sebességeloszlás $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$ esetén volt a legkisebb.

6 táblázat: **Eltérő városi közlekedési helyzetek energiafelhasználásának összehasonlítása**

	Elfogyasztott benzin aránya	Elfogyasztott etanol aránya	Elfogyasztott gázolaj aránya	Elfogyasztott biodízel aránya
<i>Szabad áramlás</i>	33,2%	1,0%	63,3%	2,6%
<i>Gyorsuló áramlat</i>	45,0%	1,3%	85,9%	3,5%
<i>Lassuló áramlás</i>	49,8%	1,4%	95,0%	3,9%
<i>Torlódás</i>	52,5%	1,5%	100,0%	4,1%
<i>Tútelített torlódás</i>	71,1%	2,1%	135,6%	5,5%

Elemzésem kimutatta (6.táblázat), hogy a tútelített torlódásos állapotban kétszer annyi energiát használnak fel, miközben a megújuló energia részaránya minden esetben elenyészőnek tekinthető. Mindez megerősíti a 2. fejezet eredményeinek gyakorlati használhatóságát.

A fejezet eredményeihez kapcsolódó publikációim: (Zöldy, Török, 2015), (Torok, Torok, Heinitz, 2014), (Szendrő, Csete, Török, 2014), (Siwale et al., 2013), (Uhlik et al., 2012), (Markovits-Somogyi, Török, 2010), (Török, Bereczky, 2009), (Tánczos, Török, 2007)

4.

Személygépjárművek városi légnemű károsanyag-kibocsátása

Általánosságban az eddigi tapasztalatok és megvizsgált modellek alapján elmondható, hogy cél lenne olyan CO₂ emissziós modell fejlesztése, amely, tényadatokból kiindulva, képes a teljes (légi-, vízi-, vasúti- és közúti) közlekedés kibocsátását és a programozható dekarbonizációs fejlődési pályák hatását előrebecsülni (Szendrői, Török, 2016; Kukely, Aba, Fleischer, 2017). A bemenő adatstruktúra legyen ellenőrizhető, a modell legyen transzparens (átlátható számítási folyamatok) és robusztus (az eddig kidolgozott előre- vagy visszabecslési módszerek²⁸ vagy dekarbonizációs pályavizsgálatok érzékenysége nem ismert, ezért általánosan feltételezhető, hogy a paraméterezett modellek pontosan leírják a megfigyeléseket). Így azonban természetes kérdésként merül fel a modellek alkalmazhatósága, hiszen ezek a modellek pontosan szinte sohasem igazak. Általános igény a modellel szemben, hogy legyen robusztus; egy modellezési eljárás akkor robusztus, ha nem túlzottan érzékeny²⁹ azokra a feltételekre és bemenő paraméterekre, amelyektől függ, illetve a bemenő adatok és modellezési folyamatok legyenek jól dokumentáltak. Ezek alapján elvárás, hogy a modell megbízhatóan tudja a jövőbeli kibocsátásokat számszerűsíteni,

²⁸ A témakörben témavezettem – Andrejszki Tamás – tézist fogalmazott meg. Kapcsolódó publikáció: (Baranyai, Andrejszki, Török, 2015): Megállapítottam, hogy a közlekedési rendszer komplex volta miatt a tervezésben a döntéstámogató statisztikai előrebecslés és a visszafejtés együttes alkalmazása adhat kellően megbízható eredményt.

²⁹ A modellezési eljárás érzékenységét a bemenő paraméterek és a kimenet vagy kimenetek közötti érzékenységvizsgálattal lehet meghatározni. A vizsgálat célja, annak meghatározása, hogy a bemenő paraméterek egységnyi változása a kimeneti változókra milyen és mekkora hatást gyakorol. Érzékenységvizsgálatnál feltételezzük, hogy a bemeneti változók függetlenek – tehát az egyik bemeneti változó változása nincs hatással a másik változóra. A ceteris paribus elv igen fontos a robusztusság vizsgálatánál, ugyanis lényege, hogy a komplex, egymással kölcsönhatásban álló viszonyok elemzése során a jelenségeket csak egyetlen bemeneti tényező megváltoztatásával elemezzük, tehát a vizsgált tényezőkön kívüli valamennyi hatótényezőt változatlanul hagyunk.

és legyen alkalmas trendek előrejelzésére, beleértve a bizonytalanságok kezelését és bemutatását.

A mindennapi életben a való világ különböző például fizikai, gazdasági vagy társadalmi jellegű problémáival találkozhatunk, amelyek megoldásában a matematika alkalmazása segítségünkre lehet. A matematika alkalmazásához, gyakran absztrakt matematikai problémát kell megfogalmazni, amelyet az eredeti probléma matematikai modelljének neveznek, és amely a való életből vett problémát közelítőleg leírja. Ilyen modell felállításához gyakran egyszerűsítésekre és feltevésekre van szükség. A matematikai probléma ezek után vizsgálható, esetleg megoldható. Az eredmények interpretálása a valóságos világ fogalmaival az eredeti problémára megfelelő választ adhat. Az átláthatóság, transzparencia segít a modell továbbfejlesztésében. A transzparencia egyszerűen azt jelenti, hogy az emberi gondolkodás számára kézenfekvőnek tűnő megfelelés van egy megismerő rendszer modelljében felvett elemek és/vagy viszonyok és az általa lefedett rendszer elemei és/vagy viszonyai között, valamint, hogy a megfelelés egyértelmű és bijektív. Modellalkotásnál alapvető a transzparencia iránti igény, vagyis hogy a gondolatok rendje feleljen meg a dolgok rendjének. A bizonytalanságok kezelésére a matematika régóta kínál eszközöket, azonban ezek alkalmazása a károsanyag-modellezésbe eddig nem integrálódott. A bizonytalanságot legkevésbé a diszkrét rendszerek tudják kezelni. Kisebb adatgyűjtési és modellezési befektetéssel a modellezés javítható lenne, és intervallum alapú rendszer építhető ki. Nagy adatgyűjtési és modellezési befektetéssel pedig nagy pontosságú sztochasztikus rendszer³⁰ alakítható ki, mely az idősoros adatok

³⁰ Sztochasztikus rendszernek azon folyamatokat nevezik, amelyek – mint a természetben előforduló valódi jelenségek többsége – eleve véletlen jellegűek, vagy kevésbé ismert, bonyolult rendszereket, melyeknek esetleges oksági összefüggéseit egyszerűbb valószínűségi változók segítségével statisztikus kapcsolatként vizsgálni

segítségével dinamikus rendszerré³¹ fejleszthető (Kövesné-Gilicze, Debreczeni, Füzy, 1989)³².

Az ÜHG-kibocsátások számításának számos módja van - a felhasznált modellektől, feltételezésektől, változótól és a bemenő adatok rendelkezésre állásától függően. Abelső égésű hőerőgéppel (is) hajtott közúti gépjárművek működésük során fosszilis tüzelőanyagot égetnek el, károsítva környezetünket. A témakörben számos hazai kutatás is megjelent (Csete et al., 2007); (Zöldy, 2011); (Bereczky, Török, 2011); (Bereczky, 2012), melynek során vagy a fosszilis tüzelőanyag elégetésének környezetterhelését és szennyezését kívánták műszaki vagy gazdasági megoldásokkal csökkenteni, vagy a hajtásmódnak a fosszilis tüzelőanyagoktól való függetlenítését célozták meg. Az általam kidolgozott becslési eljárás lényege, hogy feltételezzük a tüzelőanyag vagy tüzelőanyagok szénttartalmának széndioxiddá történő tökéletes elégetését (a valóságban lejátszódó tökéletlen égés miatt ennél csak kevesebb széndioxid keletkezhet, így ez a felső becslés elfogadható), illetve, hogy a hidrogén tartalma vízzé ég el, oxigéntartalma pedig táplálja az égést. Tehát feladat volt a benzin-etanol keverékek, illetve gázolaj-biodízel keverékek szén-, hidrogén- és oxigéntartalmának meghatározása, a benzin, az etanol, a gázolaj és a biodízel szén-, hidrogén- és oxigéntartalmának ismeretében. Ehhez először teoretikus úton meg kellett határoznom a keverékek sűrűségét (4.1):

$$(4.1) \quad \rho_{kev} = \sum_{r=1}^n (\phi_r \cdot \rho_r)$$

³¹ A dinamikus rendszer egy rendszer valamely állapotainak rögzített szabályok szerinti időbeli változásával foglalkozik. A dinamikus rendszer állapotát véges számú állapotjellemző írja le. A rendszer állapotában bekövetkező kis változások a számok kis megváltozásával járnak. A dinamikai rendszer időfejlődését rögzített szabály vezérli, amely a jelenlegi állapot ismeretében a jövőbeli állapotokat megadja. Az időfejlődés determinisztikus: a jelenlegi állapotból, csak adott időtartam alatt egyetlen jövőbeli állapot következhet be.

³² Ez csak bizonyos korlátok között igaz, mert meghatározhatóan nagy adatmennyiség elérését követően a további adatgyűjtés és elemzés határköltisége meghaladhatja a pontosság-növelésből származó hasznot. A Big Data elemzés más módszerek alkalmazását teszi szükségessé.

Majd a sűrűség segítségével a szén-, hidrogén- és oxigéntartalmát (4.2):

$$(4.2) \quad A_{kev} = \left[\sum_{i=1}^n (\phi_r \cdot \rho_r \cdot A_r) \right] \cdot [\rho_{kev}]^{-1} = \left[\sum_{i=1}^n (\phi_r \cdot \rho_r \cdot A_r) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^n (\phi_r \cdot \rho_r) \right]^{-1}$$

ahol:

ρ_{kev} : a keverék sűrűsége [g/cm³],

ϕ_i : az r. komponens térfogattörtje [V/V],

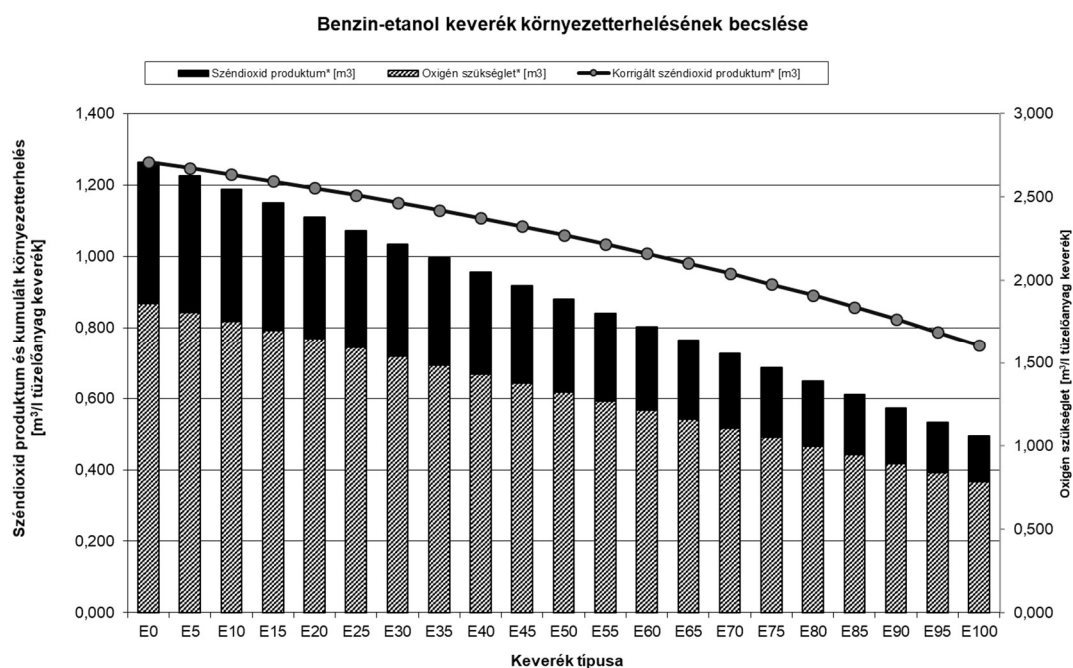
ρ_i : az r. komponens sűrűsége [g/cm³],

A_{kev} : a keverékben található atomok tömegtörtje (például, a keverékben a szén, a hidrogén vagy az oxigén tömegtörte kifejezett részaránya) [m/m],

A_r : az r. komponensben az adott atomok tömeg törtje (például a keverék i. komponensében a szén, a hidrogén, vagy az oxigén tömegtörte kifejezett részaránya) [m/m].

A bemutatott (4.2) elméleti modell segítségével becsültem meg a fosszilis tüzelőanyag-biomassza alapú tüzelőanyag-keverékek oxigénszükségletét és széndioxid-emisszióját – tökéletes égést feltételezve. A tökéletes égés során a tüzelőanyag széndioxiddá és vízzé ég el. Környezetterhelésen a következő folyamatot értem: a tüzelőanyag sztöchiometrikus mennyiségű oxigénmolekulával történő reakciója, azaz tökéletes égése során – ehhez az oxigént a levegő oxigénjéből fedezik – széndioxid és vízgőz keletkezik, amelyek a légkörbe kerülnek. A nevezett gázok üvegházhatású gázok, és a környezetet terhelik. A fenti modellel elsőként belsőégésű benzinmotor környezetterhelését vizsgáltam. A benzinhoz fokozatosan, 5 v/v%-onként etil-alkoholt kevertem. A keveréket E0-E100 jelzéssel jelöltem az etanolkoncentráció függvényében, vagyis E0 a tisztán fosszilis tüzelőanyag (benzin), míg E100 a tiszta etanol³³. A benzinhoz adagolt etanol a kumulált környezetterhelést csökkenti, mert a benzinhoz adagolt etilalkohol oxigéntartalma a benzin oxigénigényét csökkenti, és széndioxid-produktuma is kisebb. Az etanol fűtőértéke kisebb a benzinénél, ami, hasonló teljesítményszükséglet esetén fogyasztásnövekedést eredményez. A fogyasztásnövekedéssel módosított, megnövekedett környezetterhelést a korrigált környezetterhelés görbével-jellemeztem (13. ábra):

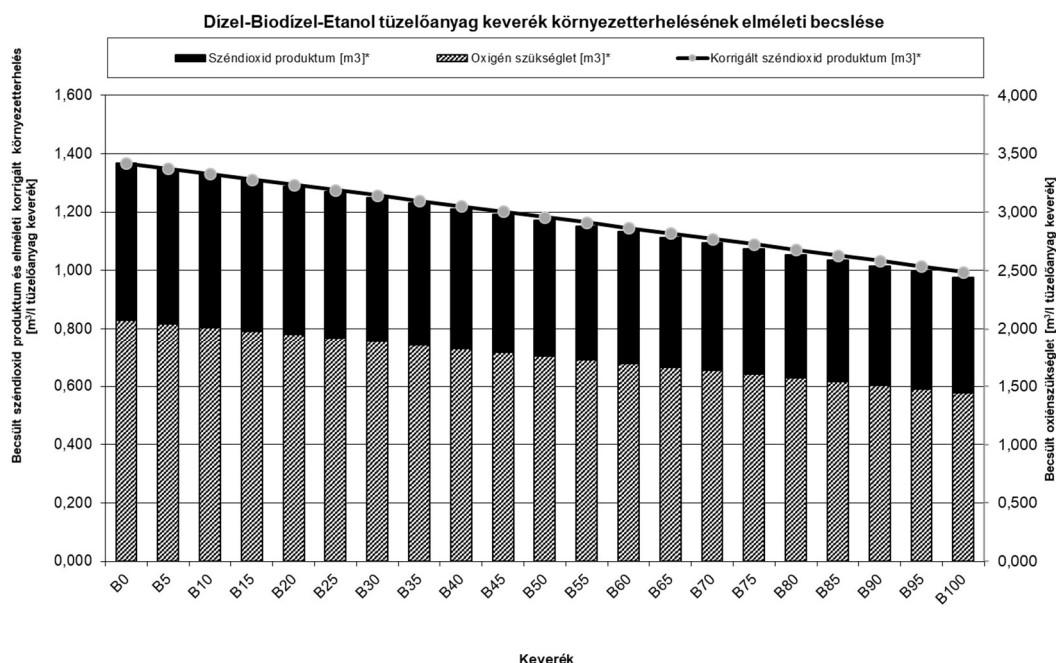
³³ Elméleti adagolásról van szó, hiszen a valóságban nincs tökéletesen tiszta etanol.



13. ábra 1 liter benzin-etanol tüzelőanyag-keverék elméleti, korrigált környezetterhelése

Megállapítottam, hogy az etanol kisebb fűtőértéke miatt a bekövetkező fogyasztásnövekedéssel számolva az etanol hozzáadásával nem szignifikáns a kumulált környezetterhelés-csökkenés. Ha az etanolt növényi – megújuló – alapanyagokból állítjuk elő, akkor számításomat módosítja az, hogy a bioetanol előállítási technológia függvényében a rendszerbe bekerülő széndioxid ciklusa zárt, azaz nem terheli a környezetet.

Másodszor a belsőégésű dízelmotor környezetterhelését vizsgáltam meg (14. ábra):



14. ábra 1 liter gázolaj-biodízel tüzelőanyag-keverék elméleti, korrigált környezetterhelése

A gázolajból (D) és biodízelből (B) álló keverék emisszióját vizsgáltam. Az 14. ábra látható, hogy a gázolajhoz adagolt etanol és biodízel csökkenti a környezet terhelését. Jól látható, hogy a biodízel (az etanolnál nagyobb fűtőértéke miatt) kisebb fogyasztásnövekedést eredményez (összehasonlítva a 13. ábrával), sőt többtoxigént visz az égésbe, még az etanolhoz képest is. A biodízel és a gázolaj fűtőértéke közelítőleg azonos, az etanol fűtőértéke viszont kisebb a gázolajénál. A fogyasztásnövekedéssel módosított, megnövekedett környezetterhelést a korrigált környezetterhelés görbével jellemeztem.

A módszerek alapját a tüzelőanyag-fogyasztás, illetve a közlekedési teljesítmény meghatározása jelenti. Ezen módszerek alkalmazásakor figyelembe veendő, hogy a különböző tüzelőanyagok széntartalma eltérő, valamint hogy a dízelüzemű gépjárművek fogyasztása általában alacsonyabb, azonban a magasabb relatív széntartalom ezt az előnyt részben kiegyenlíti. Ennek a módszernek a legnagyobb problémája az adathiány (a tüzelőanyagok külföldi beszerezhetősége („benzinturizmus”) miatt pedig a rendelkezésre álló adatok megbízhatósága is kérdéses. A számítás másik fontos bemenő adata a közlekedési teljesítmény meghatározása (ez szintén nehézségekbe ütközhet az adathiány miatt). Amennyiben a

gépjárműállományra és a tüzelőanyag-fogyasztásra nem állnak rendelkezésre megbízható adatok, egyes modellek emissziós faktorokat alkalmazva, kiindulhatnak a közlekedési teljesítmény adataiból is. A következőkben a (2018-ban) világszerte rendelkezésre álló, különböző modellezési eljárásokat tekintem át.

4.1. Egyesült Államok

Az Egyesült Államok és az Európai Unió, ezen belül Magyarország közlekedésfejlődése, igényei, szabályozása stb. jelentős eltéréseket mutat, ezért a modellek extenzív (és munkaigényes) átalakítása nélkül, átültetésük nehézségekbe ütközne. Mindemellett azonban érdemes áttekinteni az alkalmazott megoldásokat, az EU-s és hazai modellek fejlesztése érdekében.

4.1.1. MOBILE6.2

A MOBILE modell első változatát az US-EPA³⁴ a jövőbeli várható kibocsátások becslésére a hetvenes években fejlesztette ki. A program mára mind architektúráját, mind felhasználói felületét tekintve elavult (DOS-alapú), azonban a jelenleg alkalmazott modellek fontos módszertani alapjául szolgált. A jelenlegi, 2002-ben kiadott változat az általános kibocsátásokon (CO₂, CO, NO_x, HC, SO₂, NH₃, PM) túl, a futóművek és a fékrendszer kopásának PM-kibocsátásait is számszerűsíti, a benzin és dízelüzemű járművekre (K. Zhang, Batterman, 2010). A modell 28 különféle gépjárműkategóriára határoz meg emissziós tényezőket, két tengerszint feletti magasságra, valamint figyelembe veszi a külső hőmérsékletet (téli, nyári mód), az utazási sebességet és egyéb külső tényezőket is. Időtávja 1951-től 2050-ig terjed (Wallace et al., 2012). Hátránya, hogy fontos bemenő adatát képeznék a forgalmi engedélyekben rögzített adatok, valamint a megtett úthossz, azonban, erőforráshiány miatt, nem minden állam rögzíti ezeket (így országos átlagokat kénytelenek alkalmazni, ami a modell előrejelzéseinek pontosságát rontja). A CO₂-kibocsátások becslésének módja ebben a modellben: minden évre meghatározott, becsült szorzókon alapszik. Legnagyobb hátránya azonban mégsem ez, hanem hogy egyáltalán nem veszi figyelembe a sebességet, a tüzelőanyagok jellemzőit, az alternatív hajtásokat és tüzelőanyagokat, valamint a CAFE (Corporate Average Fuel Economy) szabványok változásait. Ennek megfelelően előrejelzései csak olyan időtávra alkalmazhatóak, ahol

³⁴ U.S. Environmental Protection Agency - Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség

ezen tényezők hatása elenyésző. A fenti hiányosságok következtében, a modell, például, túlbecsüli az új gépjárművek VOC- és HC-emisszióit. A programot 2004 óta nem fejlesztik az előrebecslésekhez, csak technológiai paramétereket használ fel. Társadalmi, gazdasági paraméterek figyelembevételére nem képes, illetve nincs lehetőség forgatókönyv-elemzésre sem.

4.1.2. MOVES

A MOVES modellt szintén a US-EPA fejlesztette ki, a MOBILE kiváltására, annak legtöbb hibáját kiküszöbölve – a legfrissebb kiadott változat 2014 októberében jelent meg. A program MySQL adatbázisokon alapul, pontos számítási módszertana, az Excelre épülő modellekhez képest, nehezebben hozzáférhető. Ez a modell már figyelembe veszi a különböző közlekedési beruházásokat, valamint számos, a közlekedésben tapasztalható változást is, mint, például, a járműállomány összetételének változását, tüzelőanyag szerint (Pino-Cortés et al., 2015), a megtett közlekedési teljesítményének megoszlását, úttípus és napszak szerint, és a gépjárművek sebességét (torlódások, üresjáratok figyelembevétele). A MOVES modellje a következő meghajtásokat képes modellezni:

1. CNG
2. Dízel
3. Elektromos
4. E-85
5. Benzin
6. LPG

Összesen 13 járműkategória szerepel a modellben (Yao, Wei, Perugu, Liu, Li, 2014), amely felhasznál környezeti (hőmérséklet, páratartalom, földrajzi jellemzők, időtáv), gépjárműállományra vonatkozó (fogyasztás, tüzelőanyag-mix, elektromos járművek), valamint a megtett útra vonatkozó (járműkilométer, úttípus, sebességeloszlás, hidegindítás, üresjáratok) paramétereket (Wu, Song, Yu, 2014). Megjegyzendő ugyanakkor, hogy átlagos értékekkel dolgozik (tehát például nem modellezi külön a hibrid járműveket – csak tartalmazza az átlagban), és egyes megoldásokat nem vesz figyelembe, ugyanakkor igen nagyszámú légszennyezőt modellez (csak PAH-vegyületekből³⁵ 30 fajtát). A MOVES emissziós tényezőit üzemiállapotokra (gyorsítás, üresjárat) határozták meg, így a MOBILE-lal ellentétben, az átlagsebesség változásain túl, a vezetés egyéb jellemzőire is érzékeny). Fontos megjegyezni, hogy – a számítási algoritmusok, valamint a bemenő adatok miatt – a MOVES és a MOBILE csak az Egyesült Államokra használható. A MOVES emissziós programcsomag képes HC, NO_x, CO, CO₂, PM kibocsátásirátákat [10⁻³ g/m] 2030-ig előrebecsülni, az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján készülnek. Külön figyelmet szentel a hidegindítás és az üzemszerű használat eltérő emissziós paramétereinek. A program csak technológiai paramétereket használ fel az előrebecslések elkészítéséhez; társadalmi, gazdasági paraméterek nem kerülnek figyelembe vételre, illetve nincs lehetőség forgatókönyv-elemzésre sem.

4.2. Egyesült Királyság

Az Egyesült Királyságban a Department of Energy and Climate Change (DECC) 2010-ben kiadott modellje használatos. Maga a kalkulátor felhasználóbarát internetes

³⁵ Polycyclic Aromatic Hydrocarbon – Policiklusos aromás szénhidrogének: Vegyületeik általában nem önmagukban, hanem azok keverékeként jelennek meg az égéstermékekben, például a koromban is. Számos PAH vegyület állatokban bizonyítottan rákkeltő, emberben valószínűsíthetően rákkeltő.

felületen keresztül is elérhető (15. ábra), de létezik MS Excelben megszerkesztett változata is. A modell készítői egy globális verziót is kiadtak, a fejlesztés pedig folyamatos.

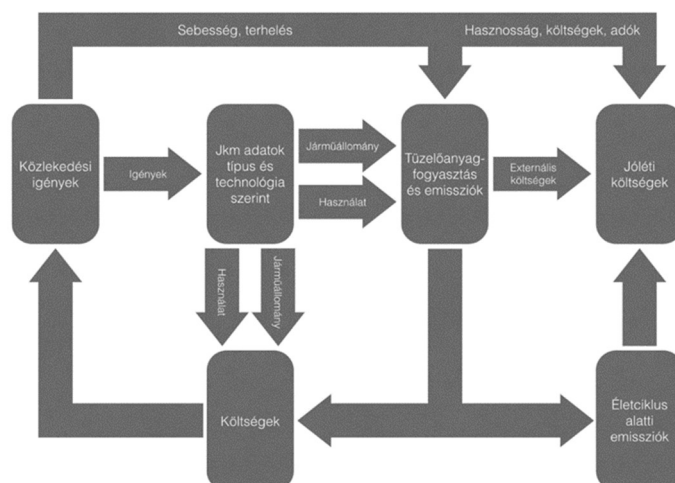


15. ábra A Global Carbon Calculator
(forrás: <http://tool.globalcalculator.org>)

A DECC számos országgal együttműködik új, lokalizált modellek kidolgozásán. A kidolgozott kalkulátor a közlekedésen kívül három energiafogyasztó szektort (világítást és berendezéseket, ipart, fűtés-hűtést) vizsgál, ezen kívül öt nem-energetikai szektort (hulladékgazdálkodás, mezőgazdaság, ipari folyamatok, földhasználat és változásai – LULUCF, emissziók), az energetikai kínálati oldalon pedig tíz területtel számol (biomassza, atomenergia, fosszilis tüzelőanyagok CCS-sel, szárazföldi és tengeri szélenergia, hullámerőművek, árapály-erőművek, mikrogeneráció, geotermikus, vízenergia). Minden szektorra négy különböző forgatókönyvet határozott meg. A Global Calculator emissziós programcsomag a betáplált historikus adatok alapján képes 2050-ig átívelő CO₂ kibocsátási, energiafelhasználási és energiaelőállítás előbecslésekre [10¹⁵gCO₂e]. A program előre definiált diszkrét paraméterlistával rendelkezik, a technológiai paraméterek mellett, gazdasági és társadalmi paramétereket is használ az előbecslések elkészítéséhez. 20 előre definiált és 1, a felhasználó által beállított forgatókönyv elemzésére alkalmas a programcsomag.

4.3. Belgium

A TREMOVE-modellt a Leuveni Egyetem és a Standard & Poor's fejlesztette ki 1997-ben, az újabb verziókat (a legfrissebb 2007-es) a TML (Transport & Mobility Leuven) fejleszti. Célja a különböző közlekedéspolitikai döntések és beavatkozások kibocsátásokra gyakorolt hatásainak előrejelzése (Kioutsoukios, Kouridis, Gkatzoflias, Dilara, Ntziachristos, 2010) vizsgálata. Összesen 31 ország adatai kerültek bele, vizsgálatainak időtartama 1995-től 2030-ig terjed. Az egyes intézkedésekhez kiszámolja a közlekedési igényeket, a módválasztást, a járműállomány megújulását, az emissziókat és a jólét szintjét (Siskos, Capros, De Vita, 2015). A modell felépítését a 16. ábra mutatja be:



16. ábra A TREMOVE modell felépítése

(forrás: Transport & Mobility Leuven: TREMOVE model description, 2007 alapján)

A modell eredetileg Windows XP alá készült, kezelőfelülete pedig nehézkes volt (DOS használata, programfájlok szövegszerkesztőben való szerkesztése, hiányosságok az egyes modulok közötti adatáramlásban stb.). A kezelőfelületet 2010-ben frissítették – így a forgatókönyveket 15–25 perc helyett már 1 perc alatt módosítani lehet – azonban még így sem felhasználóbarát a modell. A grafikus kezelőfelület 2.5-ös verziója már Windows 7 operációs rendszeren is fut, azonban a nagyobb mélységű kalibrációhoz továbbra is parancssorra van szükség. Ugyanakkor nagy előnye ennek a modellnek, hogy 31 ország adatai alapján képes szimulációt futtatni, így nem csak az

összehasonlíthatóság lehetőségét teremti meg, de magasabb szintű tervezésre is alkalmas. Az emissziós számításokhoz a TREMOVE a COPERT4 adatait használja. Ez a módszertan a főbb légszennyezők (CO, NO_x, VOC, PM, NH₃, SO₂, nehézfémek) és üvegházhatásúgázok (CO₂, N₂O, CH₄) mennyiségének becslését teszi lehetővé járműkategóriák szerint (személyautó, kistehergépjármű, nehéz tehergépkocsi, busz, motorkerékpár, moped (Fontaras et al., 2007) munkája alapján). Az összesített emissziós adatokat a megadott használatra vonatkozó beállítások, valamint a sebességfüggő emissziós tényezők segítségével számolja ki a program. A TREMOVE emissziós programcsomag képes a betáplált historikus adatok alapján CO₂-kibocsátási és energiafelhasználási előrebecsléseket [10¹² gCO₂e] készíteni 2020-ig. A program az előrebecslésekhez a technológiai paraméterek mellett, gazdasági és társadalmi paramétereket is alkalmaz. A forgatókönyvek felhasználó általi programozására van lehetőség, azonban ez a folyamat igen bonyolult, és komoly szaktudást igényel.

4.4. ENSZ

Az ENSZ 2008-ban saját közlekedési emissziós előrebecslő és dekarbonizációs modell fejlesztésébe kezdett. Az ENSZ modellje determinisztikus közlekedési környezetterhelési előrebecslési modell, amely a várható környezetterhelést a szállítási teljesítményből származtatott mennyiségként kalkulálja. Elődjének a 2000-es években felépített SRES³⁶ modell tekinthető, amely a legmeghatározóbb kibocsátás-előrejelző modell a közlekedési szektorban. Ebben a modellben a gazdasági, a társadalmi és a környezeti paraméterek változásával 4 fő forgatókönyvváltozat vizsgálható (Nakicenovic et al., 2000). Később érzékenységvizsgálatokkal kimutatták, hogy az előrebecslések során bizonyos bemenő paraméterek jobban befolyásolják az eredményeket, ezért a bemenő paraméterek pontosítása, hosszabb idősorok alkalmazása vált szükségessé, amit a kor számítógépes kapacitása és informatikai fejlettsége még nem tett lehetővé (Taylor et al., 2012). Miután a globális irányelvek körvonalazódni látszottak, a paraméterek és az eredmények nemzeti vagy regionális szintre történő szétbontása vált szükségessé. 2008-ban az ENSZ Európai Gazdasági Bizottsága is olyan egységes közlekedési előrejelzést készítő programcsomag

³⁶ The Special Report on Emissions Scenarios (SRES - Külön jelentés a kibocsátási forgatókönyvekről) 2000-ben kiadott IPCC (Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi testület) jelentés.

fejlesztésébe kezdett, amely gazdasági, társadalmi és közlekedési adatbázisok hosszú idősoraira épült. A modellfejlesztéshez nemzeti szakértők is csatlakoztak, a kifejlesztett modell 2012-ben nyilvánosságra került, és szabad felhasználásúvá vált. A ForFITS-modell különböző közlekedéspolitikai döntések függvényében a közlekedési teljesítményt (utaskm, járműkm, tonnakm), a gépjárműállomány alakulását, az energiateljesítményt és a kibocsátásokat modellezi. Minden közlekedési módot figyelembe vesz (összesen 9 típust különböztetve meg, beleértve a csővezetékes szállítást is), de elsősorban a közúti, a vasúti, és a vízi közlekedésre-szállításra összpontosít. Összesen 31 féle – kiemelkedően sok – hajtásmód szerepel a modellben. A modell egyszerűsített szerkezeti felépítését a 17. ábra mutatja.



17. ábra A ForFITS-modell felépítése

(forrás: UNECE (2013) ForFITS – User Manual alapján, saját szerkesztés)

A modell a közlekedési igényeket elsősorban a GDP-adatok járműállománnyal, utas- és járműkilométerrel való kapcsolata alapján generálja. A ForFITS emissziós programcsomag az előrebecslések a betáplált historikus adatok alapján képes 2040-ig terjedő CO₂-kibocsátási és energiateljesítmény előrebecslésekre [10¹⁵gCO₂e]. A program az előrebecslésekhez előre definiált diszkrét paraméterlistát (a technológiai paraméterek mellett gazdasági és társadalmi paramétereket is) hasznosít. A programcsomag 5 előre definiált és egy, a felhasználó által beállítható forgatókönyv elemzésére alkalmas.

4.5. IEA

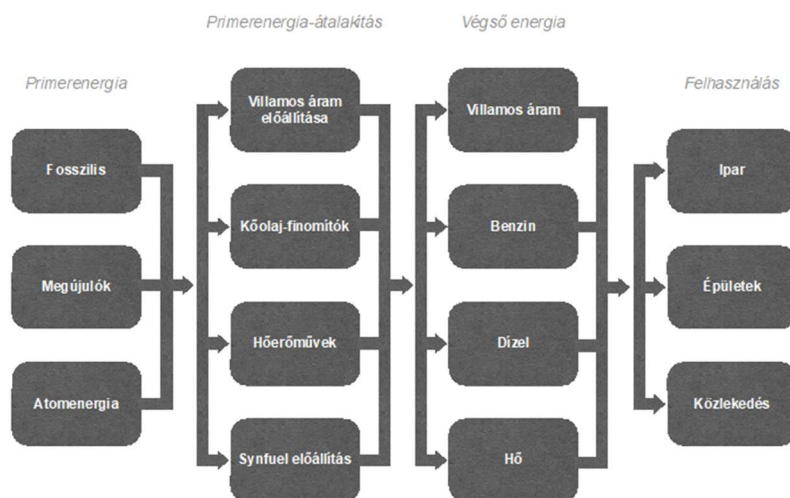
A Nemzetközi Energia Ügynökség³⁷ Energia-Technológia Perspektívák³⁸ legfrissebb 2015-ös kiadása az előrebecslés és a visszafejtés statisztikai eszközeit (Gielen, Taylor, 2007) alkalmazza, 2012 és 2050 között, a következő három forgatókönyv (Bennaceur, Gielen, 2010) segítségével:

1. 2°C (2DS) – ambíciózus, a villamosáram előretörésén alapul, mely nagyban dekarbonizált (főként szél- és napenergia felhasználásával)
2. 4°C
3. 6°C (6DS) – tulajdonképpen BAU, a jelenlegi trendek meghosszabbítása

A 2DS forgatókönyvhöz kiegészítő scenárió is készült Hi-Ren néven, ez azt vizsgálja, hogy miként érhetőek el a 2DS-ben meghatározott célok abban az esetben, ha az atomenergia és a CCS valamilyen okból nem hozza a várt eredményeket. A program segítségével eldönthető, hogy az előre definiált 6 eszköz (dekarbonizációs pálya (Fulton et al., 2009)) közül melyeket választja majd a felhasználó, a kitűzött cél elérése érdekében. A program a vizualizált eredmények Excel fájlba történő exportálására is lehetőséget nyújt. A technológiai paraméterek vizsgálatánál a program csak a ma (2015-ben) kereskedelmi forgalomban kapható technológiákat vizsgálja. Az ETP-modell az energiakereslet és -kínálat szektoronkénti vizsgálatára épül, a TIMES-modell alapjain. Az energetikai vizsgálatot a program 3 szektoron végzi el, sematikus felépítését a 18. ábra szemlélteti.

³⁷ IEA: International Energy Agency

³⁸ ETP: Energy Technology Perspective



18. ábra **A TIMES-modell alkalmazása az ETP-modellben**
(forrás: <http://www.iea.org/etp/etpmodel>)

Alapvetően a modell a 2°C forgatókönyvre összpontosít. Ebben 2050-re, a teljes energiafelhasználásban a villamosenergia a legfontosabb, – aránya a kőolajét is meghaladja. Számításaik az alábbi kitételeken alapulnak:

1. Az összesített emissziók az ipari folyamatok emisszióit is tartalmazzák.
2. A közlekedési emissziók a nemzetközi szállítás és légiforgalom emisszióinak 50%-át (az adott országból vagy régióból induló/oda érkező közlekedési igényekre vonatkoztatva) magában foglalja.
3. Az energiahatékonyság tartalmazza az „elkerült” közlekedést (pl. telekommunikáció).
4. Az elektromos és az üzemanyagcellás gépjárművek előnyeit két tényezőben (energiahatékonyságban, új üzemanyagra való átállásban) veszik figyelembe

Látható, hogy az eltérő modellek eltérő bemeneti adatigénnyel rendelkeznek, és eltérő előrebecslési időtávot használnak. Egyes modellek csak technológiai paramétereket hasznosítanak, mint például új hajtásmódok megjelenése és elterjedése, míg más modellek, a hosszú időtáv miatt, például, számolnak a gazdasági hatásokkal is. Ilyen lehet, például, az alternatív tüzelőanyagok elterjedésének lehetősége, a fosszilis tüzelőanyagok drágulása vagy a megváltozott közlekedéspolitikai környezet. Egyes modellek, ezen túlmenően, társadalmi folyamatokkal is számolnak, amelyek nem egyszerűen a populáció változását jelentik, hanem, például, a közforgalmi közösségi közlekedés használatának attitűdjét vagy a gyaloglási távolság változását. **Minél komplexebb egy modell, annál komplexebb (több, bonyolultabb) bemenő adat meghatározását és megadását igényli. Ráadásul nem is egyszerűen több paraméterről van szó, hanem a paraméterek idősoráról. Sok esetben ezeket a paramétereket, adatokat ma hazánkban nem gyűjtik, és nincs ilyen adatunk az elmúlt évtizedekről sem.**

A közúti közlekedéssel kapcsolatos emissziós modellek korszerűsítése és gyakorlati alkalmazása az elmúlt években, a számítási kapacitás és sebesség rohamos növekedése miatt, fejlődésnek indult. Értekezésemben az emissziós modelleket három különböző, evolúciós lépcsővel azonosítottam, és az összehasonlításuk érdekében ugyanazt a modellezési környezetet adtam meg (például, minden modellt 1 km hosszú egyenes úton, magyar gépjárműállomány adatbázisával, a városi forgalomra jellemző kétirányú, egy-egy forgalmi sávossal jellemeztem. A szikragyújtású motorok tüzelőanyaga a hazánkban általánosan hozzáférhető benzin-etanol keverék (Lakatos, 2015), illetve a kompressziós gyújtású motorokban (Barabás, 2015); (Tutak et al., 2015); (Zöldy és Török, 2015) az általánosan hozzáférhető gázolaj-biodízel keverék.

A közlekedési emissziós modellek első generációját a tüzelőanyag-fogyasztás alapú modellek alkotják (Szendrő, Török, 2014), (Astarita et al., 2015), melyek a károsanyag-kibocsátás mértékét az elégetett tüzelőanyagból számítják ki (4.3):

$$(4.3) \quad {}^1\varepsilon_i = \sum_{j=1}^n ({}^1\xi_{i,j} \cdot m_j) = \sum_{j=1}^n ({}^1\xi_{i,j} \cdot \varphi_j \cdot s_j \cdot \rho_j \cdot \beta_j)$$

ahol:

${}^1\xi_{i,j}$: a j. gépjárműcsoport i. károsanyag-kibocsátási paramétere
[g károsanyag · (g tüzelőanyag)⁻¹],

m_j : a j. gépjárműcsoport által elfogyasztott tüzelőanyag mennyisége
[10³ g tüza],

φ_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző tüzelőanyag-fogyasztás [l · 10⁻⁵ m],

s_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző futásteljesítmény [10³ m],

ρ_j : a j. gépjárműcsoportot meghajtó tüzelőanyag sűrűsége [10³ g · l⁻¹],

β_j : a j. gépjárműcsoportba tartozó gépjárművek száma [db]³⁹.

Látható, hogy a modell a kibocsátást a felhasznált tüzelőanyag mennyiségéből és a futásteljesítményből számolja, de figyelmen kívül hagyja a belsőégésű hűerőgépek fejlődését. Második generációs modellek az EURO környezetvédelmi osztályba sorolás alapú modellek (Csikós et al., 2015), a továbbiakban ezeket mutatom be (4.4):

$$(4.4) \quad {}^2\varepsilon_i = \sum_{j=1}^m ({}^2\xi_{i,j} \cdot s_j \cdot \beta_j)$$

ahol:

${}^2\xi_{i,j}$: a j. EURO környezetvédelmi besorolású gépjárműcsoport i. károsanyag kibocsátási paramétere [g károsanyag · (g tüzelőanyag)⁻¹],

s_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző futásteljesítmény [10³ m],

β_j : a j. gépjárműcsoportba tartozó gépjárművek száma [db]⁴⁰.

A modell a károsanyag-kibocsátást a belsőégésű hűerőgép által felhasznált tüzelőanyag mennyiségéből és a futásteljesítményből származtatja, figyelembe véve a

³⁹ A nemzetközi szakirodalom szerint, ezek a modellek a kompressziós és szikragyújtású belsőégésű hűerőgépeket különböztetik meg!

⁴⁰ A nemzetközi szakirodalom alapján ezek a modellek a kompressziós és szikragyújtású belsőégésű hűerőgépeket az EURO környezetvédelmi szabvány alapján különböztetik meg!

belsőégésű motor fejlődését, figyelmen kívül hagyva a belsőégésű hőerőgép pillanatnyi állapotát, és a közúti gépjármű sebességét.

Végezetül a legmodernebb sebesség alapú polinomiális becslési eljárást vizsgálták (Toşa et al., 2015); (Li et al., 2015); (Ntziachristos, Samaras, 2016). Ezekben a mikromodellekben felhasznált sebességeloszlásokat a makroszkopikus, fundamentális diagramból vezették le (Stamos et al., 2015); (Husnjak et al., 2015), (4.5):

$$(4.5) \quad {}^3\varepsilon_i = \sum_{i=1}^m ({}^3\xi_{i,j}(v) \cdot s_i \cdot \beta_i)$$

ahol:

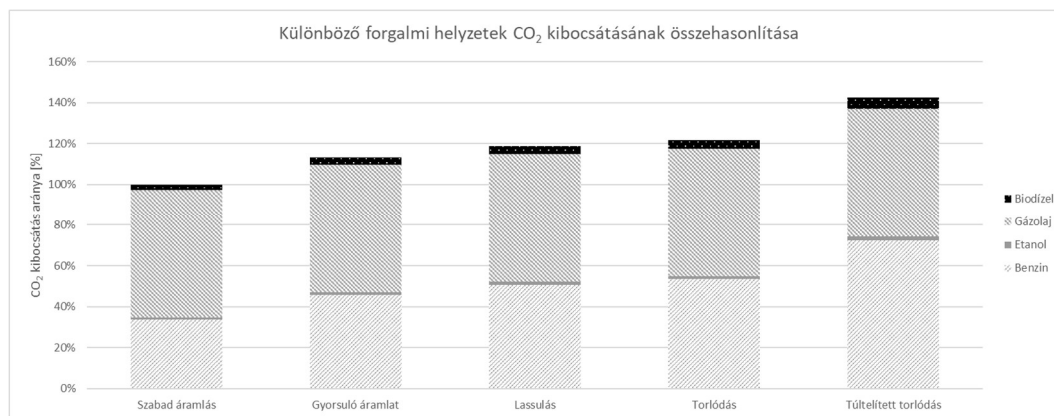
${}^3\xi_{i,j}$: a j. gépjárműcsoport i. károsanyag-kibocsátásának polinomiális közelítése $[g \text{ károsanyag} \cdot (g \text{ tüzelőanyag})^{-1}]$,

s_j : a j. gépjárműcsoportra jellemző futásteljesítmény $[10^3 \text{ m}]$,

β_j : a j. gépjárműcsoportba tartozó gépjárművek száma $[\text{db}]^{32}$.

Ebben a fejezetben a sebesség alapú emissziós modellek segítségével vizsgáltam meg a különböző városi közlekedési helyzetekből eredő sebességeloszlások emisszióra gyakorolt hatását, különös tekintettel a széndioxid-kibocsátásra. A modell alkalmas a CO, HC, NO_x és SO₂-kibocsátás becslésére is. A fentiek alapján figyelembe vettem a fosszilis tüzelőanyagok mellé kevert 4,4 V/V% biokomponenst is. Közúti gépjárművek sebességfüggő, másodfokú polinomiális becslést alkalmazó emissziós modelljénél

$(\xi_i = (a_i + c_i \cdot v + e_i \cdot v^2) \cdot (1 + b_i \cdot v + d_i \cdot v^2)^{-1})$ a hazai gépjárműállomány és tüzelőanyag-ellátásunk sajátosságait figyelembe vettem, és ezek alapján **számításokkal igazoltam, hogy az eltérő forgalmi helyzetek – az eltérő sebességeloszlások miatt – eltérő légnemű károsanyag-kibocsátással járó környezetterhelést eredményeznek. Ezek közül, kutatásaim során, kiemelten foglalkoztam a széndioxid-kibocsátással. Továbbá azt is megállapítottam, hogy a jelenleg használt biokomponensek hatása a széndioxid kibocsátás szempontjából nem szignifikáns (19. ábra):**



19. ábra Különböző forgalmi helyzetek széndioxid-kibocsátás összehasonlítása

Megállapítottam, hogy a

0,28 - 4,31 [m s⁻¹] sebességtartományban (túltelített torlódás) a széndioxid-kibocsátás az exponenciális sebességeloszlás $f_{Exp}(x; \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$ esetén volt a legnagyobb, míg

6,94 - 15,27 [m s⁻¹] sebességtartományban (szabad áramlás) normális sebességeloszlás $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$ esetén volt a legkisebb.

7 táblázat: Eltérő városi közlekedési helyzetek széndioxid-kibocsátásának összehasonlítása

	Benzin CO ₂ kibocsátás aránya	Etanol CO ₂ kibocsátás aránya	Gázolaj CO ₂ kibocsátás aránya	Biodízel CO ₂ kibocsátás aránya
Szabad áramlás	33,8%	0,9%	62,7%	2,6%
Gyorsuló áramlat	45,8%	1,2%	62,7%	3,5%
Lassulás	50,7%	1,4%	62,7%	3,9%
Torlódás	53,4%	1,5%	62,7%	4,1%
Túltelített torlódás	72,4%	2,0%	62,7%	5,6%

Kimutattam, hogy a túltelített torlódásos állapotban 40 %-kal több széndioxid kerül a levegőbe, mint szabad forgalmi áramlásban, és, sajnos, ezen a megújuló energiaforrások felhasználása nem javított.

A fejezet eredményeihez kapcsolódó publikációim: (Torok, 2016), (Zefreh, Török, 2016)⁴¹, (Torok, 2015), (Torok, 2015), (Horvath, Torok, 2015), (Andrejszki, et al., 2014)⁴², (Török, Török, 2014), (Szendrő, Török, 2014)⁴³, (Tánczos et al., 2011), (Török, 2009), (Tánczos, Török, 2007)

⁴¹ Ph.D. hallgatóm Maghrou Zefreh Mohammad tézist fogalmazott meg a publikáció alapján: Sebesség alapú kibocsátás becslési eljárással eltérő városi forgalmi helyzeteket hasonlítottam össze CO₂, NO_x, CO, PM és SO₂ kibocsátás szempontjából.

⁴² Ph.D. hallgatóm Andrejszki Tamás tézist fogalmazott meg a publikáció alapján: Megállapítottam, hogy az ENSZ által fejlesztett ForFITS program (melynek magyarországi pilot projektjét Tanszékünk vezette) alkalmas a közforgalmú közösségi közlekedés részarányának komplex modellezésre.

⁴³ Kollégám, Szendrő Gábor tézist fogalmazott meg a publikáció alapján: Megvizsgáltam a hazai motorizáció múltbeli, valamint várható alakulását a 2040-ig terjedő időszakra vonatkozóan, és a nemzetközi szakirodalom felhasználásával megállapítottam, hogy a prognosztizált GDP-növekedés, valamint egyéb társadalmi-gazdasági folyamatok eredményeképpen hazánk motorizációs foka a vizsgálati időtartam alatt folyamatos növekedést mutat. Ezt követően a nemzetközi modellezési szakirodalom felhasználásával számszerűsítettem a várható növekedés mértékét, valamint időbeli eloszlását. Megfelelő kalibrálás segítségével leírtam a hazai motorizációs görbe várható karakterisztikáját, fontosabb paramétereit.

5.

Személygépjármű közlekedés városi zajterhelése

Ebben a fejezetben a közúti közlekedés városi zajterhelésének becslését mutatom be. Elsőként bemutatom a zaj fogalmát, érzékelésének és mérésének elméleti hátterét, majd az előző fejezetkhez hasonlóan a zajmodellezés fejlődését. Végezetül összefoglalásként bemutatom a jelenlegi hazai helyzetre adaptált modelleredményeket.

„Fizikai meghatározás és mérés szempontjából a hang és zaj teljesen azonos fogalmak, csak az emberi értékelés különbözteti meg a kettőt egymástól. [...] A természetben a hangok összetett rezgések, akár zene, akár beszéd, akár zaj”⁴⁴. A hangok periodikus szinuszos hullámok. Ez a periodicitás térben és időben is jelentkezik. [...] A hangot az erőssége (hangnyomása) és a magassága (frekvenciája) határozza meg. Fontos tulajdonsága a hangnyomásnak, hogy az emberi fül is ezt érzékeli. A hangnyomás a hangrezgések által a közegben keltett váltakozó nyomás, mely a hangtér közvetlenül mérhető adata. [...] A hang lényegében olyan fizikai inger (rezgés, hullám), mely a hallószervben, mint fiziológiai inger (hangérzet) jelentkezik. Ebből a szempontból kétféle hangerősségről beszélünk: egyrészt a fizikai értelemben vett hangerősségről (objektív hangérzet), másrészt a hangérzet erősségéről (szubjektív hangérzet). A fizikai inger erősségét hangintenzitásnak, a hangérzet erősségét hangosságának nevezzük. A hanghullámban, mint minden hullámban, energia áramlik, hiszen a tér egy adott helyén a közeg részecskéi rezgésbe jönnek. [...] A szubjektív hangérzet függ a hang fizikai jellemzőitől és a hallószerv tulajdonságaitól, tehát egyéntől függő fizikai fogalom. [...] A hanghullám a fülben idegi impulzusokká

⁴⁴ Minden olyan hangot, amely nem szinuszos lefolyású, összetett hangnak nevezünk.

alakul, majd ez az ingerület váltja ki az agyban a hangérzetet. A műszerekkel mért objektív mérőszámok és az emberi hangérzet között nem lineáris a kapcsolat. Az emberi fül nem minden frekvencián egyformán érzékeny, hiszen eleve csak a 20 Hz és 20 kHz közötti frekvenciatartományban képes hangokat észlelni. A hangok észlelésének mind frekvencia-, mind hangnyomás korlátai is vannak. A még éppen hallható hang hangnyomása $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, amely érték a hallásküszöbnek felel meg. A hallható hangok felső határa körülbelül az a hangnyomás, amely fájdalmat okoz, ez a fájdalomküszöb. [...] A hang - vagy zaj - érzékelésének leírásához olyan skálára van szükség, mely követi az emberi fül érzékelésének skáláját. A természetes és mesterséges hangforrások hangteljesítménye igen nagy átfogású, 12 - 13 nagyságrendű. Ilyen széles tartományban nagyon nehéz számolni és mérni, így célszerűvé vált egy logaritmikus skála bevetése. Ezt a mesterséges skálát, Alexander Graham Bellről, a telefon amerikai feltalálójáról nevezték el decibelnek, amely dimenzió nélküli viszonyító (relatív) mértékegység, gyakorlati jelölése: dB. A dB-skála $2 \cdot 10^{-5}$ Pa - nál, a hallásküszöbnél kezdődik, mely kiindulópontja a vonatkoztatási nyomás. Ezt 0 dB - lel jelöljük. [...] Mivel a dB skála logaritmikus, vagyis a hangerősség megkétszereződése nem jelent megkétszereződést dB egységekben is, ezért a hangnyomásszint értékeit nem lehet kivonni egymásból vagy összeadni, csak a szintekhez tartozó hangnyomásokat és intenzitásokat. Kétszeres hangnyomásszint (például megkétszereződött közúti forgalom) 3 dB-es hangnyomásszint növekedést eredményez. [...] Olyan zajmérő műszert használunk, mely nem csak, hogy követi fülünk érzékenységét, de abban a mértékegységben fejezi ki az eredményeket, amely az emberre gyakorolt hatást is megadja. Mintavételkor a mért hangok erősségét súlyozzák, hogy az erősen hallott hangok jobban számítsanak, mint a kevésbé hallottak. Mivel az emberi hallás nem egyformán érzékeny minden frekvenciára, a különböző frekvenciájú, de egyenlő hangnyomásszintű hangokat nem érezzük ugyanolyan hangosnak. Ennek értelmében a hallás frekvenciafüggésének modellezésére a zajszintmérőkbe idő- és frekvenciaszűrőket építenek be. Frekvenciasúlyozással lehet szabályozni a zajszintmérő érzékenységét. Beszélhetünk A, B, C, D frekvenciasúlyozásról, a szűrő típusától függően. Az A szűrő használata a legelterjedtebb (az A-hangnyomásszint a hangnyomásszint-mérőkbe beépített A-

szűrővel mért hangnyomásszint, amely a műszerről közvetlenül leolvasható. (Bite, 2016)

A modern társadalmak iparilag fejlett életmódja drámai hatást gyakorolt a környezetre. Napjainkban a környezeti zaj világméretű problémává vált, és a környezeti hatások ellenőrzése a városi területek egyik legfontosabb problémája (Hunyadi, 2014). A városi területeken a közúti közlekedési zaj a legjelentősebb. A repülőtereket általában a városokon kívül helyezik el, és a vasutat általában úgy tervezik, hogy ritkán haladjanak át a lakónegyedeken (Guarnaccia, 2013). Városi területen a közutak és a közút használók koncentrációja igen magas, így a legnagyobb problémát a közúti forgalom áramlásából eredő zaj jelenti, amelyet pontosan meg kell becsülni és kezelni kell a megfelelő mérséklő⁴⁵ eszközök segítségével. Bár a közúti zaj általában nem elég hangos ahhoz, hogy hallási problémákat okozzon, az elfogadhatatlan zajszintnek való folyamatos kitettség káros egészségügyi hatásokat eredményezhet (Hurtley, 2009). Ezenkívül a környezeti zajnak való kitettség bosszúsággal, alvászavarral, kognitív képesség csökkenésével és szív- és érrendszeri állapot romlásával járhat (Babisch et al., 2013), (Clark et al., 2012), (Clark et al., 2013). A környezeti zajnak való kitettség egyre jobban terjed városaink növekedésével, a közúti közlekedés forgalmának növekedésével és az éjszakai csendes időszak csökkenésével. Általánosan a zajszint az A-szűrővel mért intenzitásátlagból képzett szint, a pillanatnyi zajszintek négyzetösszegének időszerinti integrálközepértéke (5.1):

$$(5.1) \quad L_{Aeq,T} = 10 \cdot \log \left[(t_2 - t_1)^{-1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} (p_A^2(t) dt \cdot p_0^{-2}) \right]$$

ahol:

$L_{Aeq,T}$: Egyenértékű zajszint [dB(A)],

p_0 : referencia hangnyomás [μ Pa],

$p_A(t)$: A-szűrővel súlyozott hangnyomás időfüggvénye,

t : idő [s].

⁴⁵ Zajvédelemben is megkülönböztetünk mérséklő (mitigációs) és alkalmazkodási (adaptációs) eljárásokat.

A fenti modell (Burgess, 1978) hazai alkalmazása során általában a hangnyomásszint változását, időfüggvényét a közúti forgalomnagysága, illetve ritkábban még a forgalomnagysága és összetétele alapján becslik meg. Ezen első generációs, illetve második generációs becsléseknél a gépjárművek sebessége nem kerül figyelembe vételre. Ezért értekezésemben a harmadik generációs modellekkel foglalkoztam, melyet az alábbiakban mutatok be.

Általában a közúti forgalom által kibocsátott zaj becsléséhez zajkibocsátási és zajterjedési modellre van szükség, amely a gépjármű mozgásjellemzőit rögzíti, nevezetesen a sebességét és a gyorsulását, illetve az ehhez tartozó hangteljesítményszinteket (Can, Aumond, 2018). Az ASJ RTN-modell (Japán Akusztikus Társaság - közúti forgalmi zaj előrejelzési modellje) egyetlen járművet tekint, úgy mint a vizsgált út mentén elhelyezkedő, minden irányú pontforrást, és előrejelzi az egyes járművek által kibocsátott zajt. Azért választottam ezt a modellt, mert ez nem forgalomnagyságtól, hanem sebességtől függően írja le a zajkibocsátást. A modell különböző gépjárműkategóriákat és forgalmi helyzeteket különböztet meg (állandó és nem egyenletes forgalom, gyorsulás és lassulás futási állapota). Nagy előnye a többi modellel szemben, hogy sebesség függő zaj kibocsátási modell. Számítása az alábbiak szerint történik (Sakamoto, 2015) (5.2):

$$(5.2) \quad L_{WA} = \varphi + \kappa \cdot \log(v) + \tau$$

ahol:

L_{WA} : A-súlyozott hangnyomás szint (minden egyes gépjármű külön emissziója) [dB(A)],

v : gépjármű haladási sebessége [$m \cdot s^{-1}$],

φ : regressziós együttható,

κ : regressziós együttható,

τ : útpálya kialakítási paraméter (útburkolat típusa, útpálya lejtése stb.).

Továbbá a zaj terjedését a forráshelyről az előrejelzési pontra az alábbiak szerint kell előre jelezni (5.2):

$$(5.1) \quad L_{A,i} = L_{WA,i} - 8 - 20 \cdot \log(r_i) + \Delta L_{\text{corr},i}$$

ahol:

$L_{A,i}$: A-súlyozott hangnyomás szint (zajszint a mérési ponton) [dB(A)],

r_i : közvetlen távolság az i. zajforrás és az előrejelzés pont között (m),

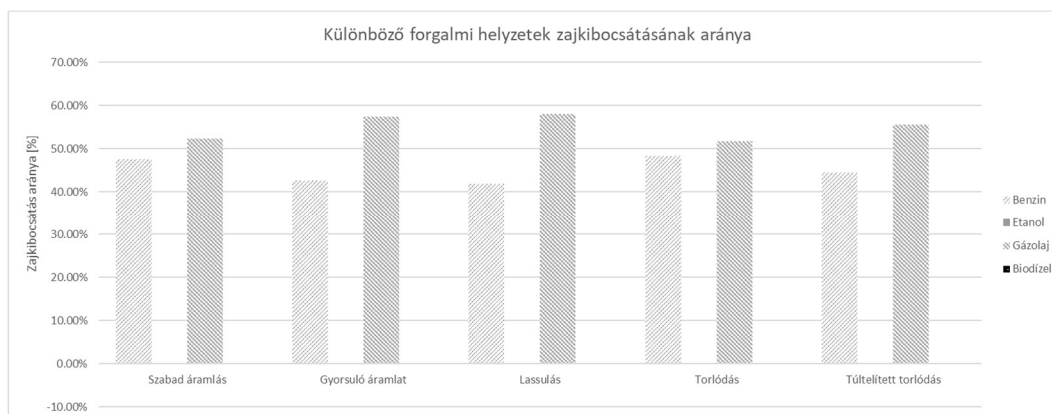
$L_{\text{corr},i}$: korrekció a talaj és a légköri abszorpció miatt [dB (A)].

A jelenlegi fejezet fő célja, hogy elméleti úton vizsgálja meg a különböző városi forgalmi körülmények hatását a városi közúti forgalom zajkibocsátásra. Összehasonlítom az egyes forgalmi helyzetekben előidézett közúti közlekedési zajt, különös tekintettel a hazai sajátosságokra. A második fejezetben különböző városi forgalmi viszonyokat mutattam be, eltérő forgalmi sebesség eloszlásokkal reprezentálva. Érdeemes megemlíteni, hogy a sebességeloszlás hatását a közúti zaj kibocsátásra már vizsgálták, például Watts és munkatársai (Watts et al., 2004). Rámutattak, hogy a normális eloszlásra vonatkozó feltevések nem túl robusztusak a túltelített forgalom lehetséges időszakai miatt, így a haladási sebesség szórásának becslése félrevezető lehet az egyéni, mikro szintű adatok hiánya miatt (Calvo et al., 2012). Ebben a fejezetben nem csak a mérésekre alapozott különböző városi forgalmi helyzetek zajkibocsátása kerül megbecslésre a fenti módszer segítségével, hanem figyelembe véve a hazai helyzetet, a biotüzelőanyag komponensek eltérő akusztikai tulajdonságai is számításba kerülnek.

Irodalmi áttekintésből kiderült, hogy a biodízel alkalmazása (100 v/v% bekeverés esetén) 1%-kal emeli meg a hangnyomás szintet (Zhen et al., 2012), (Sanjid et al., 2014) (Patel et al., 2016a), (Patel et al. 2016b), míg az etanol hozzákeverése 1%-kal csökkenti (Deng, Chen, Wang, Zhen, Xie, 2018) azt.

Ebben a fejezetben a sebesség alapú zajemissziós modell segítségével vizsgáltam meg az eltérő városi közlekedési helyzetekből eredő sebességeloszlások hatását a zajemisszióra. A fentiek alapján, figyelembe vettem a fosszilis tüzelőanyagok

mellé kevert 4,4 V/V% biokomponenst is, és számításokkal igazoltam, hogy az eltérő forgalmi helyzetek – az eltérő sebességeloszlások miatt – eltérő zajterhelést eredményeznek. Továbbá azt is megállapítottam, hogy a jelenleg használt biokomponensek hatása nem szignifikáns a zajterhelés szempontjából (20. ábra):



20. ábra Zajterhelés összehasonlítása különböző városi forgalmi helyzetekben

Megállapítottam, hogy a

0,27 – 9,45 [m · s⁻¹] sebességtartományban (lassulás) a zajterhelés a Khi-négyszet sebességeloszlás

$f_{Ch}(x; \tau) = 2^{-(\tau/2)} \cdot \Gamma^{-1} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^{-1} \cdot x^{\left(\frac{\tau}{2}-1\right)} \cdot \exp\left[-\frac{x}{2}\right]$ esetén volt a legkisebb, míg a

6,75 – 14,85 [m · s⁻¹] sebességtartományban (szabad áramlás), a normális sebességeloszlás $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$ esetén volt a legnagyobb a zajterhelés (8 táblázat):

8 táblázat: **Eltérő városi közlekedési helyzetek széndioxid-kibocsátásának összehasonlítása**

	Zajkibocsátás aránya benzinből	Zajkibocsátás aránya etanolból	Zajkibocsátás aránya gázolajból	Zajkibocsátás aránya biodízelből
<i>Szabad áramlás</i>	47,61%	-0,19%	52,39%	0,21%
<i>Gyorsuló áramlat</i>	42,65%	-0,17%	57,35%	0,23%
<i>Lassulás</i>	41,93%	-0,17%	58,07%	0,23%
<i>Torlódás</i>	48,34%	-0,19%	51,66%	0,21%
<i>Túltelített torlódás</i>	44,42%	-0,18%	55,58%	0,22%

Kimutattam, hogy szabad áramlás állapotában 14 %-kal nagyobb a zajterhelés, mint túltelített torlódás esetén.

A fejezet eredményeihez kapcsolódó publikációim: (Markovits-Somogyi, Török, 2006), (Török, 2006a), (Zefreh, Torok, 2018b)⁴⁶

⁴⁶ Ph.D. hallgatóm Maghrour Zefreh Mohammad tézist fogalmazott meg a publikáció alapján: *Eltérő városi forgalmi helyzetekben jelentkező zajterhelést az ASJ-RTN-modell segítségével megbeccsültem.*

6.

Összefoglalás - Új tudományos eredmények összefoglalása

6.1. Új tudományos eredmények

1. tézis: Megállapítottam, hogy a matematikai statisztikai módszerekkel feltárt városi közlekedési forgalmi helyzetek megfeleltethetők a nemzetközi (amerikai-német) szabványrendszernek. A kidolgozott módszer alkalmas a sebesség valószínűségi függvények meghatározására és ezek alapján a forgalmi áramlati állapotok definiálására városi körülmények között.

2.1 tézis: Megállapítottam, hogy a közúti közlekedés energiafelhasználására vonatkozó makrosztintű becslés pontossága nagy mértékben függ a modellparaméterek számától. A becslési eljárás pontossága a vizsgálatba bevont paraméterek számának növelésével, a számítási kapacitás fejlődése miatt, jelentősen javítható.

2.2 tézis: A sebességfüggő, másodfokú polinomiális becslő modellt alkalmazva ($EF_j = (a_j + c_j \cdot v + e_j \cdot v^2) \cdot (1 + b_j \cdot v + d_j \cdot v^2)^{-1}$), figyelembe vettem a hazai gépjárműállomány és tüzelőanyag-ellátásunk sajátosságait, és ezek alapján megállapítottam, hogy az eltérő forgalmi helyzetek – az eltérő sebességeloszlások következtében – eltérő energiafelhasználást eredményeznek. Azt is megállapítottam, hogy a jelenleg használt biokomponensek hatása az energiafelhasználás szempontjából még nem szignifikáns.

2.3 tézis: Megállapítottam, hogy a $0,28 - 4,31 [m \cdot s^{-1}]$ sebességtartományban (túltelített torlódás) az energiaszükséglet az exponenciális sebesség eloszlás $f_{Exp}(x; \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$ esetén volt a legnagyobb, míg a $6,94 - 15,28 [m \cdot s^{-1}]$ sebességtartományban (szabad áramlás) az energiaszükséglet normális sebességeloszlás $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$ esetén volt a legkisebb. Kimutattam, hogy a

tútelített, torlódásos állapotban 2-szer annyi energiát használtak fel, a megújuló energia részaránya minden esetben elenyészőnek tekinthető.

3.1 tézis: Emissziós modellek segítségével vizsgáltam meg a különböző városi közlekedési helyzetekből eredő sebességeloszlások széndioxid kibocsátásra gyakorolt hatását. A fentiek alapján figyelembe vettem a fosszilis tüzelőanyagok mellé kevert 4,4 V/V% biokomponenst is. Közúti gépjárművek sebességfüggő, másodfokú polinomiális becslést alkalmazó, emissziós modelljénél ($\xi_i = (a_i + c_i \cdot v + e_i \cdot v^2) \cdot (1 + b_i \cdot v + d_i \cdot v^2)^{-1}$) figyelembe vettem a hazai gépjárműállomány és tüzelőanyag-ellátásunk sajátosságait, és ezek alapján megállapítottam, hogy a különböző városi forgalmi helyzetek – az eltérő sebességeloszlások miatt – eltérő széndioxid kibocsátását eredményeznek. Azt is kimutattam, hogy a jelenleg használt biokomponensek hatása a széndioxid-kibocsátásra szempontjából még nem szignifikáns.

3.2 tézis: Megállapítottam, hogy a 0,28 - 4,31 [m s⁻¹] sebességtartományban (tútelített torlódás) a széndioxid-kibocsátás az exponenciális sebességeloszlás $f_{Exp}(x; \lambda) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$ esetén volt a legnagyobb, míg a 6,94 - 15,27 [m s⁻¹] sebességtartományban (szabad áramlás) a normális sebességeloszlás $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$ esetén volt a legkisebb. Kimutattam, hogy a tútelített, torlódásos állapotban 40 %-kal több széndioxid kerül a levegőbe, mint szabad áramlás esetén.

4.1 tézis: Emissziós model segítségével vizsgáltam meg az eltérő városi közlekedési helyzetekből eredő sebességeloszlások hatását a zaj emisszióra. A fentiek alapján figyelembe vettem a fosszilis tüzelőanyagok mellé kevert 4,4V/V% biokomponenst is. Közúti gépjárművek sebességfüggő zaj emissziós modelljénél figyelembe vettem a hazai gépjárműállomány és tüzelőanyag-ellátásunk sajátosságait, és ezek alapján megállapítottam, hogy az eltérő forgalmi helyzetek – az eltérő sebességeloszlások miatt – eltérő zajterhelést eredményeznek. Továbbá azt is megállapítottam, hogy a jelenleg használt biokomponensek hatása még nem szignifikáns a környezetterhelés szempontjából.

4.2 tézis: Megállapítottam, hogy 0,27 - 9,45 [m · s⁻¹] sebességtartományban (lassulás) a Khi-négyszet sebességeloszlás $f_{Ch}(x; \tau) = 2^{-(\tau/2)} \cdot \Gamma^{-1} \cdot \left(\frac{\tau}{2}\right)^{-1} \cdot x^{\left(\frac{\tau}{2}-1\right)} \cdot \exp\left[-\frac{x}{2}\right]$

esetén volt a legkisebb a zajterhelés, míg $6,75 - 14,85 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ sebességtartományban (szabad áramlás), a normális sebességeloszlás $f_N(x; \alpha; \mu) = \exp[-2^{-1} \cdot (x - \mu)^2 \cdot (\alpha)^{-2}] \cdot [\alpha \cdot (2\pi)^{1/2}]^{-1}$ esetén volt a legnagyobb a zajterhelés. A szabad áramlás állapotában 18 %-kal nagyobb volt a zajterhelés.

6.2. A tudományos eredmények hasznosíthatósága

A városi közúti közlekedés kibocsátásának modellezése (az energetikai és környezetvédelmi szemléletmódot matematikai statisztikai eszközökkel integráló modellezési tevékenység) a közlekedéstudomány eddig kevésbé kutatott területét mutattam be interdiszciplináris kutatásomban, amely a városi egyéni közúti közlekedés externális hatásainak mélyebb vizsgálatára megfelelő alapot nyújthat. A témakör további kutatása a városi úthasználati díjak tudományosan elfogadható meghatározásának szempontjából is komoly társadalmi és gazdasági érdeklődésre tarthat számot⁴⁷.

A közúti közlekedési szektor jelentősége mind a nemzetgazdasági értéknöveléshez való hozzájárulás, mind a foglalkoztatotti létszám, mind a környezetterhelés, mind pedig az energiafogyasztás szempontjából egész Európában és Magyarországon egyaránt megkérdőjelezhetetlen. Energiaigénye nemzetgazdasági szinten egyre nő, s a vonatkozó komplex – több szempont együttes kezelését igénylő – kutatási és fejlesztési projektek megalapozása és végrehajtása a felhasználók és a döntéshozók számára elengedhetetlen. A kialakított modellek gyakorlati alkalmazhatósága lehetővé teszi a városi közúti közlekedési szektor működésének pontosabb megismerését, hatékonyabb optimalizálását, ezzel energiamegtakarítást, a CO₂-kibocsátás csökkentését eredményezve. Kutatásaim alapján sikerült a városi közúti közlekedés környezetterhelését tudományos eszközök alkalmazásával megállapítani, ami megfelelő alapot szolgáltat a társadalmilag igazságos ár- és díjképzési rendszer bevezetésére. A kutatás várható eredményeinek hasznosulása

⁴⁷ Az EU útdíj-számítási módszerekre vonatkozó Irányelvében az útdíj környezetvédelmi összetevőjének számítását éppen az elfogadhatóan pontos számítási modellek és azok alkalmazásához szükséges bemenő adatok általános hiánya miatt évek óta halogatja.

tudományos és társadalmi szinten egyaránt tetten érhető. A kidolgozott eljárás azóta több városi mintaterületen ipari alkalmazásra került, úgy mint Budapest, Szekszárd, Pécs.

.A kifejlesztett módszerek folyamatosan bekerülnek az oktatásba, korszerűsítve a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karának tananyagát. Munkásságom tudományos kritikai fogadtatása kedvező, amelyet a Karunkon a szakterületi átlaghoz képest magas publikációs és hivatkozási számom mutat.

7.

Irodalom – tézisek témájában megjelent közlemények

7.1. Fontosabb publikációk jegyzéke

Könyvek/Könyvfejezetek

- Az Európai Községek Bizottsága. (2009). FEHÉR KÖNYV Az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás: egy európai fellépési keret felé (No. COM(2009) 147). Brüsszel: Az Európai Községek Bizottsága. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0147:FIN:HU:PDF>
- Az Európai Unió Tanácsa. (2013). Az éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodásra vonatkozó uniós stratégia (No. 11151/13). Brüsszel: Az Európai Unió Tanácsa.
- Bite, P. (2016). A közlekedési zaj figyelembevételének szabályai, számítása és a zaj csillapításának módjai. Budapest: Magyar Mérnöki Kamara. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiHq6zsn9vfAhVGIIAKHTaLDEQQFjAAegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fmmk.hu%2Fkozlekedes%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F08%2FA-K%25C3%2596ZLEKED%25C3%2589SI-ZAJ-FIGYELEMBEV%25C3%2589TELe.pdf&usg=AOvVaw3xM5rr6wG_3viFqMaNYqOu
- Casella, G., Berger, R. (2002). Statistical Inference, Duxbury advanced series in statistics and decision sciences. Thomson Learning. <https://mybiostats.files.wordpress.com/2015/03/casella-berger.pdf>
- D'Agostino, R. (2017). Goodness-of-fit-techniques. Routledge. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351444569>
- Európai Bizottság. (2007). ZÖLD KÖNYV - A városi mobilitás új kultúrája felé. Európai Bizottság. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0551&from=EN>
- Európai Bizottság. (2011). FEHÉR KÖNYV Útiterv az egységes európai közlekedési térség megvalósításához – Úton egy versenyképes és erőforrás-hatékony közlekedési rendszer felé (No. COM(2011) 144). Brüsszel: Európai Bizottság. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=EN>
- Európai Bizottság. (2013). ZÖLD KÖNYV: Az éghajlat- és energiapolitika 2030-ra szóló kerete (No. COM(2013) 169). Brüsszel: Európai Bizottság. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0169:FIN:HU:PDF>
- European Commission. (2010). EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth (p. 35). European Commission.
- European Environment Agency. (2013). Trends and projections in Europe 2013 – Tracking progress towards Europe's climate and energy targets until 2020 (No. EEA Report

- No 10/2013). European Environment Agency.
<http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-2013>
- European Environment Agency. (2014a). Progress towards 2008 – 2012 Kyoto targets in Europe. European Environment Agency).
<http://www.eea.europa.eu/publications/progress-towards-2008-2012-kyoto>
- European Environment Agency. (2014b). Trends and projections in Europe 2014. European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2014>
- Hranac, R., Sterzin, E., Krechmer, D., Rakha, H. A., Farzaneh, M., Arafteh, M., others. (2006). Empirical studies on traffic flow in inclement weather (No. FHWA-HOP-07-073) (p. 108). Federal Highway Administration.
<https://ops.fhwa.dot.gov/publications/weatherempirical/weatherempirical.pdf>
- Hurtley, C. (2009). Night noise guidelines for Europe. WHO Regional Office Europe.
- Kerner, B. S. (2010). Introduction to Modern Traffic Flow Theory and Control: The Long Road to Three-Phase Traffic Theory (1st ed.). Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-02605-8
- Közlekedési, Vízügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium. (2008). Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia 2008–2025 (p. 114). Budapest: Közlekedési, Vízügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium, <http://www.kvvm.hu/cimg/documents/nas080214.pdf>
- Kövesné Gilicze É., Füzy F. (2000): Közúti forgalomtechnika gyakorlatok, Műegyetemi Kiadó, p81
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Grubler, A., Riahi, K., Roehrl, R., Rogner, H.-H., Victor, N. (2000). Special report on emissions scenarios (SRES), a special report of Working Group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, Nemzeti Alkalmazkodási Központ. (2013). Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia 2014–2025 kitekintéssel 2050-re (p. 198). Budapest: Nemzeti Alkalmazkodási Központ.
http://nak.mfgi.hu/sites/default/files/files/NES_final_131016_kikuld_kozig_egyeztetes.pdf
- Ntziachristos, L., Samaras, Z. (2016). Emission Guide Book for Transport. Bruxelles: European Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Schmieten G. (2010): Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs, Technische Universität Dresden, Studienarbeit, p222
- Transport Research Board (TRB) (2010): Highway Capacity Manual, Washington
- Tunver, S., Carson, J., Wilkinson, L., Travis, K., Zimmerman, C. (2010). Traffic monitoring: A guidebook. Federal Highway Administration U.S. Department Of Transportation.
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=2ahUKEwj5yN2EyoHfAhVCGCwKHbunAXYQFjAJegQIBxAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ctiponline.org%2Fpublications%2Fview_file.ashx%3FfileID%3D139&usg=AOvVaw2Py3uB6YUNpvH8kvYvQws7

Folyóiratcikkek

- Ambühl, L., Loder, A., Bliemer, M., Menendez, M., Axhausen, K. W. (2017). A functional form for the macroscopic fundamental diagram with a physical meaning. *Arbeitsberichte Verkehr und Raumplanung*, 1306. DOI: 10.3929/ethz-b-000207171
- Babisch, W., Pershagen, G., Selander, J., Houthuijs, D., Breugelmans, O., Cadum, E., (2013). Noise annoyance—a modifier of the association between noise level and cardiovascular health? *Science of the Total Environment*, 452:50–57. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.02.034
- Bassani, M., Catani, L., Cirillo, C., Mutani, G. (2016). Night-time and daytime operating speed distribution in urban arterials. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 42:56–69. DOI: 10.1016/j.trf.2016.06.020
- Bellomo, N., Dogbe, C. (2011). On the modeling of traffic and crowds: A survey of models, speculations, and perspectives. *SIAM review*, 53(3):409–463. DOI: 10.1137/090746677
- Bényei, A., Deák, O., Orosz, C., Kovács, A. (1989). Közlekedési szokásjellemzők vizsgálata Budapesten. *Belügyi Szemle (1963–1990)*, 27(9):42–46.
- Bényei, A., Fi, I. (1991). Results of Hungarian Measurements in Connection with Capacity of Unsignalised Intersections Carrying out Capacity Calculation. In *Intersections without Traffic Signals II* (pp. 226–237). Springer.
- Bennaceur, K., Gielen, D. (2010). Energy technology modelling of major carbon abatement options. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4(2):309–315. DOI: 10.1016/j.ijggc.2009.10.002
- Brackstone, M., McDonald, M. (1999). Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):181–196. DOI: 10.1016/S1369-8478(00)00005-X
- Burgess, M. (1978). Relationship between L10 and Leq for noise from road traffic, *Australian Road Research*, 8(3):15–8.
- Buthe, B., Pütz, T., Staats, J. (2015). Entwurf - Methodik für die Raumwirksamkeitsanalyse Bundesverkehrswegeplanung, *Bundesinstitute für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*, p57
- Calvo, J. A., Álvarez-Caldas, C., San Román, J. L., Cobo, P. (2012). Influence of vehicle driving parameters on the noise caused by passenger cars in urban traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(7):509–513. DOI: 10.1016/j.trd.2012.06.002
- Can, A., Aumond, P. (2018). Estimation of road traffic noise emissions: The influence of speed and acceleration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58:155–171. DOI: 10.1016/j.trd.2017.12.002
- Cassidy, M. J., Bertini, R. L. (1999). Some traffic features at freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(1):25–42. DOI: 10.1016/S0191-2615(98)00023-X
- Castro, M., Sánchez, J. A., Vaquero, C. M., Iglesias, L., Rodríguez-Solano, R. (2008). Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(5):325–331.
- Clark, C., Crombie, R., Head, J., Van Kamp, I., Van Kempen, E., Stansfeld, S. A. (2012). Does traffic-related air pollution explain associations of aircraft and road traffic noise exposure on children's health and cognition? A secondary analysis of the United

- Kingdom sample from the RANCH project. *American Journal of Epidemiology*, 176(4):327–337. DOI: 10.1093/aje/kws012
- Clark, C., Head, J., Stansfeld, S. A. (2013). Longitudinal effects of aircraft noise exposure on children's health and cognition: a six-year follow-up of the UK RANCH cohort. *Journal of Environmental Psychology*, 35:1–9. DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.03.002
- Csiszár, Cs., Sándor, Zs. (2017). Method for analysis and prediction of dwell times at stops in local bus transportation. *Transport*, 32(3):302–313. DOI: 10.3846/16484142.2016.1190402
- Daganzo, C. F. (1994). The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28(4):269–287. DOI: 10.1016/0191-2615(94)90002-7
- Deng, X., Chen, Z., Wang, X., Zhen, H., Xie, R. (2018). Exhaust noise, performance and emission characteristics of spark ignition engine fuelled with pure gasoline and hydrous ethanol gasoline blends. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12:55–63. DOI: 10.1016/j.csite.2018.02.004
- Dey, P. P., Chandra, S., Gangopadhya, S. (2006). Speed distribution curves under mixed traffic conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 132(6):475–481. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:6(475)
- Du, Y., Deng, F., Liao, F., Ji, Y. (2017). Understanding the distribution characteristics of bus speed based on geocoded data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 82:337–357. DOI: 10.1016/j.trc.2017.07.004
- Edie, L. C. (1961). Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. *Operations Research*, 9(1):66–76. DOI: 10.1287/opre.9.1.66
- Fontaras, G., Kouridis, H., Samaras, Z., Elst, D., Gense, R. (2007). Use of a vehicle-modelling tool for predicting CO₂ emissions in the framework of European regulations for light goods vehicles. *Atmospheric Environment*, 41(14):3009–3021. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.004
- Fulton, L., Cazzola, P., Cuenot, F. (2009). IEA Mobility Model (MoMo) and its use in the ETP 2008. *Energy Policy*, 37(10):3758–3768. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.07.065
- Gielen, D., Taylor, M. (2007). Modelling industrial energy use: the IEAs energy technology perspectives. *Energy Economics*, 29(4):889–912. DOI: 10.1016/j.eneco.2007.01.008
- Gerlach, J. (2007). Von den RAS-N zu den RIN: neue Regeln fuer die Netzgestaltung und-bewertung/From RAS-N to RIN: new regulations for network design and assessment. *Straßenverkehrstechnik*, 51(6).
- Haight, F. A., Mosher, W. W. (1962). A practical method for improving the accuracy of vehicular speed distribution measurements. *Highway Research Board Bulletin*, 341:92–116.
- Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of Modern Physics*, 73(4):1067. DOI: 10.1103/RevModPhys.73.1067
- Hoogendoorn, S. P., Bovy, P. H. (2001). 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. DOI: 10.1177/095965180121500402
- Holló, P., Eksler, V., Zukowska, J. (2010). Road safety performance indicators and their explanatory value: A critical view based on the experience of Central European countries. *Safety Science*, 48(9):1142–1150. DOI: 10.1016/j.ssci.2010.03.002
- Holló, P., Henézi, D., Berta, T. (2018). Comparison of self-reported and observed road safety performance indicators. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 46(3):117–121.

- Hunyadi, D. (2014). Calculation model of road traffic noise annoyance rate in urban areas. *Pollack Periodica*, 9(1):41–48. DOI: 10.1556/Pollack.9.2014.1.5
- Hustim, M., Fujimoto, K. (2012). Road Traffic Noise under Heterogeneous Traffic Condition in Makassar City, Indonesia. *Journal of Habitat Engineering and Design*, 4(1):109–118.
- Iannone, G., Guarnaccia, C., Quartieri, J. (2013). Speed distribution influence in road traffic noise prediction. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(3):493–501. DOI: 10.30638/eemj.2013.061
- Jun, J. (2010). Understanding the variability of speed distributions under mixed traffic conditions caused by holiday traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4):599–610. DOI: 10.1016/j.trc.2009.12.005
- Karoliny, M., Gáspár, L. (2015). Investigation and Design of Durable Pavement Structure Rehabilitation. *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, 16(1):30–54.
- Kerner, B. S., Rehborn, H. (1996). Experimental features and characteristics of traffic jams. *Physical Review E*, 53(2):1297. DOI: 10.1103/PhysRevE.53.R1297
- Kioutsoukis, I., Kouridis, C., Gkatzoflias, D., Dilara, P., Ntziachristos, L. (2010). Uncertainty and sensitivity analysis of national road transport inventories compiled with COPERT 4. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2(6):7690–7691. DOI: 10.1016/j.sbspro.2010.05.181
- Kövesné-Gilicze, É., Debreczeni, G., Füzy, F. (1989). Evaluation of the effects of the time factor in passenger traffic. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 17(1):43–53.
- Laval, J. A. (2011). Hysteresis in traffic flow revisited: An improved measurement method. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(2):385–391. DOI: 10.1016/j.trb.2010.07.006
- Li, M. Z. (2008). A generic characterization of equilibrium speed-flow curves. *Transportation Science*, 42(2):220–235. DOI: 10.1287/trsc.1070.0201
- Liao, F., Rasouli, S., Timmermans, H. (2014). Incorporating activity-travel time uncertainty and stochastic space-time prisms in multistate supernetworks for activity-travel scheduling. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(5):928–945. DOI: 10.1080/13658816.2014.887086
- Lighthill, M. J., Whitham, G. B. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 229(1178):317–345.
- Llorca, C., Moreno, A. T., Lenorzer, A., Casas, J., Garcia, A. (2015). Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transportation research part C: emerging technologies*, 52:157–172. DOI: 10.1016/j.trc.2014.06.001
- Maurya, A., Dey, S., Das, S. (2015). Speed and time headway distribution under mixed traffic condition. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11:1774–1792. DOI: 10.11175/easts.11.1774
- Orosz, G., Wilson, R. E., Stépán, G. (2010). Traffic jams: dynamics and control. *Phil. Trans. R. Soc.*, 368:4455–4479. DOI: 10.1098/rsta.2010.0205
- Pálvölgyi, T., Szendrő, G. (2012). Trends and indicators for sustainable mobility in Hungary. *Acta Oeconomica*, 1: 125–132.
- Papageorgiou, M. (1998). Some remarks on macroscopic traffic flow modelling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(5):323–329. DOI: 10.1016/S0965-8564(97)00048-7
- Park, B., Schneeberger, J. (2003). Microscopic simulation model calibration and validation: case study of VISSIM simulation model for a coordinated actuated signal system. *Transportation Research Record*, 1856(1):185–192.

- Patel, C., Agarwal, A. K., Tiwari, N., Lee, S., Lee, C. S., Park, S. (2016a). Combustion, noise, vibrations and spray characterization for Karanja biodiesel fuelled engine. *Applied Thermal Engineering*, 106:506–517. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.025
- Patel, C., Lee, S., Tiwari, N., Agarwal, A. K., Lee, C. S., Park, S. (2016b). Spray characterization, combustion, noise and vibrations investigations of Jatropha biodiesel fuelled genset engine. *Fuel*, 185, pp. 410–420. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.08.003
- Pino-Cortés, E., Díaz-Robles, L. A., Cubillos, F., Fu, J. S., Vergara-Fernández, A. (2015). Sensitivity analysis of biodiesel blends on Benzo [a] pyrene and main emissions using MOVES: A case study in Temuco, Chile. *Science of the Total Environment*, 537:352–359.
- Richards, P. I. (1956). Shock waves on the highway. *Operations Research*, 4(1), pp. 42–51.
- Sakamoto, S. (2015). Road traffic noise prediction model “ASJ RTN-Model 2013”: Report of the Research Committee on Road Traffic Noise. *Acoustical Science and Technology*, 36(2):49–108. DOI: 10.1250/ast.36.49
- Siskos, P., Capros, P., De Vita, A. (2015). CO₂ and energy efficiency car standards in the EU in the context of a decarbonisation strategy: A model-based policy assessment. *Energy Policy*, 84:22–34. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.04.024
- Smulders, S. (1990). Control of freeway traffic flow by variable speed signs. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(2):111–132. DOI: 10.1016/0191-2615(90)90023-R
- Szlávik, J., Csete, M. (2012). Climate and Energy Policy in Hungary. *Energies*, 5(12):494–517. DOI: 10.3390/en5020494
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4):485–498.
- Treiber, M., Kesting, A., Helbing, D. (2010). Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(8–9):983–1000. DOI: 10.1016/j.trb.2010.03.004
- Treiterer, J., Myers, J. (1974). The hysteresis phenomenon in traffic flow. *Transportation and Traffic Theory*, 6:13–38.
- Trozzi, C., Vaccaro, R., Crocetti, S. (1996). Speed frequency distribution in air pollutants' emissions estimate from road traffic. *Science of the Total Environment*, 189:181–185. DOI: 10.1016/0048-9697(96)05208-4
- Vadeby, A., Forsman, A. (2017). Changes in speed distribution: Applying aggregated safety effect models to individual vehicle speeds. *Accident Analysis & Prevention*, 103:20–28. DOI: 10.1016/j.aap.2017.03.012
- van Wageningen-Kessels, F., Van Lint, H., Vuik, K., Hoogendoorn, S. (2015). Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4):445–473. DOI: 10.1007/s13676-014-0045-5
- Wallace, H., Jobson, B., Erickson, M., McCoskey, J., VanReken, T., Lamb, B., (2012). Comparison of wintertime CO to NO_x ratios to MOVES and MOBILE6.2 on-road emissions inventories. *Atmospheric Environment*, 63:289–297. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.08.062
- Wilson, R. E., Ward, J. A. (2011). Car-following models: fifty years of linear stability analysis – a mathematical perspective. *Transportation Planning and Technology*, 34(1):3–18. DOI: 10.1080/03081060.2011.530826
- Wu, Y., Song, G., Yu, L. (2014). Sensitive analysis of emission rates in MOVES for developing site-specific emission database. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 32:193–206. DOI: 10.1016/j.trd.2014.07.009

- Yao, Z., Wei, H., Perugu, H., Liu, H., Li, Z. (2014). Sensitivity analysis of project level MOVES running emission rates for light and heavy duty vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(2):81–96. DOI: 10.1016/S2095-7564(15)30092-1
- Zhang, H. M. (1999). A mathematical theory of traffic hysteresis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 33(1):1–23.
- Zhang, H. M. (2001). New perspectives on continuum traffic flow models. *Networks and Spatial Economics*, 1(1–2):9–33. DOI: 10.1023/A:1011539112438
- Zhang, K., Batterman, S. (2010). Near-road air pollutant concentrations of CO and PM_{2.5}: A comparison of MOBILE6.2/CALINE4 and generalized additive models. *Atmospheric Environment*, 44(14):1740–1748. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.02.008
- Zöldy, M. (2011). Ethanol–biodiesel–diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines. *Transport*, 26(3):303–309. DOI: 10.3846/16484142.2011.623824
- Zou, Y., Zhang, Y. (2011). Use of skew-normal and skew-t distributions for mixture modeling of freeway speed data. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* pp. 67–75. <https://trrjournalonline.trb.org/doi/abs/10.3141/2260-08>

Konferenci cikkek

- Csete M, Zöldy M, Szilávik J. (2007). Regional Development Perspectives of Production and Utilisation Renewable Fuels in Hungary. In Kiss P, (Eds.), IYCE 2007. International Youth Conference on Energetics. Budapest: BME.
- Berki, Z., Monigl, J. (2017). Trip generation and distribution modelling in Budapest. *Transportation Research Procedia*, 27, pp. 172–179.
- Drake, J., Schofer, J. L. (1967). A statistical analysis of speed-density hypotheses. In 45th Annual Meeting of the Transportation Research Board (Vol. 145, pp. 112–117). Washington D.C.: Highway Research Board. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=693312>
- Fi I. (2013): Útszakaszok kapacitása, szolgáltatási szintek, hogy ott avatkozzunk be, ahol az a leghatékonyabb, 38. Ütügyi Napok, Hajdúszoboszló, KTE, 2013. szeptember 4-5.
- Greenshields, B., Channing, W., Miller, H. (1935). A study of traffic capacity. In *Proceedings of the Fourteenth Annual Meeting of the Highway Research Board Held at Washington, D.C.* (Vol. 1935, pp. 448–447). Washington, D.C.: National Research Council (USA), Highway Research Board. <https://trid.trb.org/view/120649>
- Greenshields, B. D., Thompson, J., Dickinson, H., Swinton, R. (1934). The photographic method of studying traffic behavior. In *Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the Highway Research Board held at Washington, D.C* (Vol. 13, p. 18). Washington D.C.: Highway Research Board. http://tft.eng.usf.edu/greenshields/docs/greenshields_1934.pdf
- Guarnaccia, C. (2013). Advanced tools for traffic noise modelling and prediction. *WSEAS Transactions on Systems*, 12(2), pp. 121–130.
- Kukely Gy.; Aba A.; Fleischer T. (2017). New framework for monitoring urban mobility in European cities. *Transportation research procedia*, 24: 155–162.
- Leong, H. (1968). The distribution and trend of free speeds on two lane two way rural highways in New South Wales. In 4th, Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 1968, Melbourne (Vol. 4). <https://trid.trb.org/view/1209374>
- McLean, J. (1979). Observed speed distributions and rural road traffic operations. In *Australian Road Research Board Conference Proc* (Vol. 9). <https://trid.trb.org/view/152390>
- Minh, C. C., Sano, K., Matsumoto, S. (2005). The speed, flow and headway analyses of motorcycle traffic. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, pp. 1496–1508. DOI: 10.11175/easts.6.1496
- Newell, G. F. (1965). Instability in dense highway traffic: a review. Párizs: Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://trid.trb.org/view/585574>
- Sanjid, A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Abedin, M. J., Rahman, S. M. A. (2014). Experimental Investigation of Mustard Biodiesel Blend Properties, Performance, Exhaust Emission and Noise in an Unmodified Diesel Engine. *APCBEE Procedia*, 10, pp. 149–153. DOI: 10.1016/j.apcbee.2014.10.033
- Wang, H., Li, J., Chen, Q.-Y., Ni, D. (2009). Speed-Density Relationship: From Deterministic to Stochastic. Paper 09-1527. In *TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers DVD*. Washington D.C., United States: Transportation Research Board. <https://trid.trb.org/view/881222>
- Wang, Y., Dong, W., Zhang, L., Chin, D., Papageorgiou, M., Rose, G., Young, W. (2012). Speed modeling and travel time estimation based on truncated normal and lognormal distributions. *Transportation Research Record*, 2315(1), pp. 66–72. DOI: 10.3141/2315-07

- Watts, G., van Maercke, D., van Leeuwen, H., Barelds, R., Beuving, M., Defrance, J., ... Witte, J. (2004). Effects of speed distributions on the Harmonnoise model predictions. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 2004, pp. 2530–2536). Institute of Noise Control Engineering.
- Zhen, D., Tesfa, B., Yuan, X., Wang, R., Gu, F., Ball, A. D. (2012). An investigation of the acoustic characteristics of a compression ignition engine operating with biodiesel blends. *Journal of Physics: Conference Series*, 364:012015. DOI:10.1088/1742-6596/364/1/012015

7.2. Tézispontokhoz kapcsolódó saját közlemények jegyzéke

Könyvek/Könyvfejezetek

Folyóiratcikkek

- Andrejszki, T., Gangonells, M., Molnar, E., Török, Á. (2014). ForFITS: a New Help in Transport Decision Making for a Sustainable Future. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 42(2), pp. 119–124. DOI: 10.3311/PPtr.7442
- Baranyai, D., Andrejszki, T., Török, Á. (2015). Statisztikai előrebecslés és visszafejtés a közlekedésben közlekedésinformatikai eszközök segítségével. *Dunakavics*, 3(5), pp. 31–36.
- Bereczky, Á., Török, Á. (2011). International literature review on the possibilities of biodiesel production. *Periodica Polytechnica-Transportation Engineering*, 39(1), pp. 31. DOI: 10.3311/pp.tr.2011-1.06
- Bereczky Ákos. (2012). Alternative Fuels and Technologies for Compression Ignition Internal Combustion Engines. *Journal Of Kones*, 19(4), pp. 43–53.
- Berta, T., Török, Á. (2009). Azonos útpálya kialakítás esetében a szabályozás megváltoztatásának hatása a közúti járművek haladási sebességére. *Közlekedéstudományi Szemle*, 59(2), pp. 48–51.
- Horvath, E., Torok, A. (2015). Development of road transport emission standards. *Production Engineering Archives*, 7/2, pp. 6–10. DOI: 10.30657/pea.2015.07.02
- Markovits-Somogyi Rita, Török Ádám. (2006). HEATCO kutatási jelentés a Magyarországon végzett zajjal kapcsolatos fizetési hajlandóságról. *Műszaki Infrmáció - Környezetvédelem*, 17, pp. 99–107.
- Siwale, L., Kristóf, L., Adam, T., Bereczky, A., Mbarawa, M., Penninger, A., Kolesnikov, A. (2013). Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine. *Fuel*, 107, pp. 409–418. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.11.083
- Szendrő, G, Csete, M., Török, Á. (2014). The Sectoral Adaptive Capacity Index of Hungarian Road Transport. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, 22(2), pp. 99–106. DOI: 10.3311/PPso.7377
- Szendrő G., Török Á. (2014). Theoretical investigation of environmental development pathways in the road transport sector in the European Region. *Transport*, 29(1), pp. 12–17. DOI: 10.3846/16484142.2014.893538
- Szendrő G., Török Á. (2016). Kibocsátásbecslési eljárások és modellek összehasonlítása. *MŰSZAKI SZEMLE*, 19(1), pp. 33–40.
- Tánczos Lászlóné, Molnár Sándor, Török Ádám, Molnár Márk. (2011). Future trends in road transport systems in Hungary and in the Eu. *International Journal Of Critical Infastructure*, 7(2), pp. 163–175.
- Tánczos Lé, Török Á. (2007). The linkage between climate change and energy consumption of Hungary in the road transportation sector. *Transport*, 22, pp. 134–138.
- Torok, A. (2015). Monte-Carlo simulation of road transport emission. *INTERNATIONAL Journal For Traffic And Transport Engineering*, 5(3), pp. 278–285. DOI: 10.7708/ijtte.2015.5(3).05
- Torok, A. (2016). Transport Infrastructure Role In Climate Resilience: A Case Study In Hungary. *International Journal For Traffic And Transport Engineering*, 6(2), pp. 188–195. DOI: 10.7708/ijtte.2016.6(2).06

- Török, Á., Berta, T. (2009). Layout effect of roadway on road vehicle speeds. *Pollack Periodica : An International Journal For Engineering And Information Sciences*, 4, pp. 115–120. DOI: 10.1556/Pollack.4.2009.1.12
- Torok, A., Torok, A., Heinitz, F. (2014). Usage of Production Functions in the Comparative Analysis of Transport Related Fuel Consumption. *Transport And Telecommunication Journal*, 15(4). DOI: 10.2478/ttj-2014-0025
- Török, A., Zefreh, M. (2016). Assessing the Need for Applying Multimodal Speed Distribution in Road Transport Macro Emission Estimation. *Acta Technica Jaurinensis*, 9(2), pp. 118–127. DOI: 10.14513/actatechjaur.v9.n2. 402
- Török Á. (2006a). A zajszennyezéssel kapcsolatos fizetési hajlandóság meghatározása kérdőíves felmérés segítségével. *Közlekedéstudományi Szemle*, 56, pp. 222–224.
- Török Ádám. (2006b). Klímaváltozás és a közlekedés kölcsönhatása. *Agro-21 Füzetek*, 47, pp. 27–30.
- Török Á. (2008). Közúti közlekedési szektor klimatikus költségei. *Közlekedéstudományi Szemle*, 2008/4, pp. 28–30.
- Torok Adam. (2015). Comparative analysis between the theories of road transport safety and emission. *Transport*, pp. 1–6. DOI: 10.3846/16484142.2015.1062798
- Török, Ár, Török, Ád. (2014). Macroeconomic analysis of road vehicles related environmental pollution in Hungary. *Central European Journal Of Engineering*, 4(2), pp. 186–191. DOI: 10.2478/s13531-013-0147-0
- Török, Á. (2009). Theoretical estimation of the environmental impact of biofuel mixtures. *Transport*, 24(1), pp. 26–29. DOI: 10.3846/1648-4142.2009.24.26-29
- Uhlik, K., Szabados, G., Török, Á., (2012). Elaboration of a Program to Facilitate the Implementation of the Directive 2009/33/EC on the Promotion of Clean and Energy-Efficient Road Motor Vehicles. *International Journal For Traffic And Transport Engineering*, 2(3). <http://www.doaj.org/doaj?func=fulltext&ald=1157601>
- Zefreh, M., Torok, A. (2016). Improving Traffic Flow Characteristics by Suppressing Shared Taxis Maneuvers. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 44(2), pp. 69–74. DOI: 10.3311/PPtr.8226
- Zefreh, M., Torok, A. (2018a). Single loop detector data validation and imputation of missing data. *Measurement*, 116, pp. 193–198. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.10.066
- Zefreh, M., Torok, A. (2018b). Theoretical Comparison of the Effects of Different Traffic Conditions on Urban Road Traffic Noise. *Journal of Advanced Transportation*, 2018. DOI: 10.1155/2018/7949574
- Zefreh, M., Torok, A., Meszaros, F. (2017). Average vehicles length in two-lane urban roads: A case study in Budapest. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 45(4), pp. 218–222. DOI: 10.3311/PPtr.10744.
- Zöldy, M., Török, Á. (2015). Road Transport Liquid Fuel Today and Tomorrow: Literature Overview. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 43(4), pp. 172–176. DOI: 10.3311/PPtr.8095

Konferenci cikkek

- Andrejszki, T., Török, Á. (2017). Energia felhasználás becslése a közúti közlekedésben. In XXV. OGÉT – Országos Gépészeti Találkozó 2017 (Vol. XXV, p. 400). Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság.
- Markovits-Somogyi R., Török Á. (2010). Statistical Analysis of the Hungarian vehicle. In Vilemas J. (Eds.) pp. 275–284.
http://www.iaee2010.org/sites/default/ufiles/Adam_Torok.pdf
- Török Á, Bereczky Á. (2009). Future trends of transport related biodiesel production. In Dr Biró Károly Ágoston, Dr Sebestyén-Pál György (Eds.) pp. 16–20.
- Zefreh, M., Baranyai, D., Torok, A. (2016). Assessing the Possibility of Presenting a Semi-Stochastic Speed-Density Function. In MATEC Web of Conferences (Vol. 81, p. 04002). EDP Sciences. DOI: 10.1051/mateconf/20168104002
- Zefreh, M., Török, Á. (2016). Where does the Development of Road Transport Emission Macro Modelling Lead? In C. Klein, B. Donnellan, M. Helfert, SMARTGREENS 2016: Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems: Rome, Italy, April 23–25, 2016 (Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication). Setúbal: SCITEPRESS – Science and Technology Publications, Lda.
<http://www.scitepress.org/Papers/2016/59018/59018.pdf>

8.

I. melléklet

A. táblázat Hurokdetektorból származó nyers adatok

Time	Long Name	smoothed_all_vol	smoothed_all_occ
06.05.2013 00:00:00	D710.8	15.725258	8.3125
06.05.2013 00:01:30	D710.8	11.793943	9.234375
06.05.2013 00:03:00	D710.8	8.845458	11.175781
06.05.2013 00:04:30	D710.8	6.6340933	13.881836
06.05.2013 00:06:00	D710.8	4.9755697	17.161377
06.05.2013 00:07:30	D710.8	3.7316775	20.871033
06.05.2013 00:09:00	D710.8	2.798758	24.903275
06.05.2013 00:10:30	D710.8	2.0990686	29.177456
06.05.2013 00:12:00	D710.8	1.5743014	33.63309
06.05.2013 00:13:30	D710.8	1.180726	38.22482
06.05.2013 00:15:00	D710.8	0.88554454	42.918613
06.05.2013 00:16:30	D710.8	0.6641584	47.68896
06.05.2013 00:18:00	D710.8	0.49811882	51.26672
06.05.2013 00:19:30	D710.8	0.3735891	53.95004
06.05.2013 00:21:00	D710.8	0.28019184	55.962532
06.05.2013 00:22:30	D710.8	0.21014388	57.471897
06.05.2013 00:24:00	D710.8	0.1576079	58.603924
06.05.2013 00:25:30	D710.8	0.11820593	59.45294
06.05.2013 00:27:00	D710.8	0.08865444	60.089706
06.05.2013 00:28:30	D710.8	10.066491	45.31728
06.05.2013 00:30:00	D710.8	7.549868	34.23796
06.05.2013 00:31:30	D710.8	5.662401	25.92847
06.05.2013 00:33:00	D710.8	4.246801	19.696352
06.05.2013 00:34:30	D710.8	3.1851006	15.0222645
06.05.2013 00:36:00	D710.8	2.3888254	11.516698
06.05.2013 00:37:30	D710.8	1.7916191	8.887524
06.05.2013 00:39:00	D710.8	1.3437144	6.9156427
06.05.2013 00:40:30	D710.8	1.0077858	5.4367323
06.05.2013 00:42:00	D710.8	0.7558393	4.327549
06.05.2013 00:43:30	D710.8	0.56687945	3.4956617
06.05.2013 00:45:00	D710.8	0.4251596	2.8717463
06.05.2013 00:46:30	D710.8	0.3188697	2.4038098
06.05.2013 00:48:00	D710.8	0.23915228	2.0528574

8.

II. melléklet - Érzékenység vizsgálat

Ebben a mellékletben az eloszlási függvények érzékenységi elemzését elvégeztük el. Figyelembe vettük, hogy a az eltérő forgalmi körülmények (telített áramlás, szabad áramlás, lassuló áramlás, gyorsuló áramlás, eltérő sebességbecslési hibákat okozhatnak. A A–F. táblázatok az érzékenység vizsgálat eredményeit mutatják be. Az érzékenység vizsgálatból egyértelműen látható (A táblázat), hogy a normál eloszlás továbbra is a legjobban illeszkedő eloszlás szabad áramlás esetén (minél alacsonyabb az illesztési jószág hibaértéke annál jobban illeszkedik a minta eloszlás a mérési eredményekre). Ugyanez vonatkozik a log-normál eloszlásra szabad áramlás körülmények között (B táblázatban). A béta eloszlás a legjobban illeszthető a gyorsuló áramlás esetén (C táblázat). Exponenciális eloszlás illeszthető legjobban a tútelített torlódások adataira (D táblázat) és a gamma-eloszlás a torlódási adatokra (E táblázat). Meg kell jegyezni, hogy az érzékenységi elemzés eredményei lassított áramlási körülmények között azt mutatják, hogy a Log-normál eloszlás jobban illeszkedik, mint a Chi-négyzet eloszlás, figyelembe véve a sebesség becslésekor a + 30% és -20% hibaszinteket (F táblázat). A többi hibaszintnél azonban a chi-négyzet eloszlás a legjobban illeszkedő.

A táblázat A mért sebességértékek (km / h) és a függvényillesztés jóságának megállapítása szabad áramlás mellett, figyelembe véve a sebességbecslés különböző hibaszintjeit

Goodness-of-fit tests	Weibull	Normal	Log-normal	Gamma	Uniform	Error Level
Kolmogorov-Smirnov	0,05504001	0,04283302	0,05084550	0,04434948	0,1492870	+ 5 %
Cramer-von Mises	0,07640241	0,02727461	0,04373036	0,02922211	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54684425	0,18708341	0,31058764	0,20827640	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	777,7321	773,2594	775,5032	773,8661	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	783,2565	778,7837	781,0275	779,3905	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05499471	0,04283302	0,05084550	0,04440133	0,1492870	+ 10 %
Cramer-von Mises	0,07625297	0,02727461	0,04373036	0,02929997	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54639501	0,18708341	0,31058764	0,20862067	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	788,6178	784,1450	786,3888	784,7518	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	794,1422	789,6694	791,9132	790,2762	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05503531	0,04283302	0,05084550	0,04431115	0,1492870	+ 15 %
Cramer-von Mises	0,07636038	0,02727461	0,04373036	0,02916014	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54673476	0,18708341	0,31058764	0,20787495	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	799,0195	794,5468	796,7905	795,1535	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	804,5439	800,0711	802,3149	800,6779	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05500568	0,04283302	0,05084550	0,04437475	0,1492870	+ 20 %
Cramer-von Mises	0,07626643	0,02727461	0,04373036	0,02925770	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54645018	0,18708341	0,31058764	0,20836851	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	808,9785	804,5057	806,7495	805,1125	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	814,5028	810,0301	812,2738	810,6368	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05509182	0,04283302	0,05084550	0,04429315	0,1492870	- 5 %
Cramer-von Mises	0,07654561	0,02727461	0,04373036	0,02913593	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54729315	0,18708341	0,31058764	0,20784474	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	754,3126	749,8398	752,0836	750,4466	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	759,8370	755,3642	757,6080	755,9710	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05492876	0,04283302	0,05084550	0,04432825	0,1492870	- 10 %
Cramer-von Mises	0,07614922	0,02727461	0,04373036	0,02918784	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54601521	0,18708341	0,31058764	0,20805714	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	741,6609	737,1881	739,4319	737,7949	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	747,1853	742,7124	744,9562	743,3192	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05501837	0,04283302	0,05084550	0,04436164	0,1492870	- 15 %
Cramer-von Mises	0,07633856	0,02727461	0,04373036	0,02923681	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54664741	0,18708341	0,31058764	0,20824154	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	728,2858	723,8130	726,0568	724,4198	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	733,8102	729,3374	731,5812	729,9442	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,05509583	0,04283302	0,05084550	0,04432034	0,1492870	- 20 %
Cramer-von Mises	0,07654531	0,02727461	0,04373036	0,02917514	0,8036464	
Anderson-Darling	0,54730092	0,18708341	0,31058764	0,20797707	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	714,0996	709,6269	711,8707	710,2337	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	719,6240	715,1512	717,3950	715,7580	NA	

B. táblázat: A mért sebességértékek (km / h) és a függvényillesztés jóságának megállapítása zavart áramlás mellett, figyelembe véve a sebességbecslés különböző hibaszintjeit

Goodness-of-fit tests	Weibull	Normal	Log-normal	Gamma	Uniform	Error Level
Kolmogorov-Smirnov	0,09705827	0,07834848	0,05738510	0,06447334	0,1660802	+ 5 %
Cramer-von Mises	0,17364430	0,06128168	0,03939531	0,04246622	0,8325637	
Anderson-Darling	1,14189121	0,35862117	0,22840086	0,24244124	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	698,7769	688,6895	687,4441	687,4508	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	704,1779	694,0905	692,8451	692,8517	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,09713114	0,07834848	0,05738510	0,06464948	0,1660802	+ 10 %
Cramer-von Mises	0,17394637	0,06128168	0,03939531	0,04253815	0,8325637	
Anderson-Darling	1,14278860	0,35862117	0,22840086	0,24249715	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	709,0113	698,9239	697,6785	697,6852	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	714,4123	704,3249	703,0795	703,0861	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,09717136	0,07834848	0,05738510	0,06456792	0,1660802	+ 15 %
Cramer-von Mises	0,17420127	0,06128168	0,03939531	0,04254718	0,8325637	
Anderson-Darling	1,14356743	0,35862117	0,22840086	0,24276696	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	718,7907	708,7033	707,4579	707,4646	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	724,1917	714,1042	712,8589	712,8655	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,09701301	0,07834848	0,05738510	0,06457777	0,1660802	+ 20 %
Cramer-von Mises	0,17349244	0,06128168	0,03939531	0,04255825	0,8325637	
Anderson-Darling	1,14144892	0,35862117	0,22840086	0,24281917	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	728,1538	718,0664	716,821	716,8277	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	733,5548	723,4674	722,222	722,2286	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,09711641	0,07834848	0,05738510	0,06452301	0,1660802	- 5 %
Cramer-von Mises	0,17387197	0,06128168	0,03939531	0,04251763	0,8325637	
Anderson-Darling	1,14256438	0,35862117	0,22840086	0,24267438	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	676,7586	666,6711	665,4258	665,4324	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	682,1595	672,0721	670,8267	670,8334	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,0970845	0,07834848	0,05738510	0,06454240	0,1660802	- 10 %
Cramer-von Mises	0,1738569	0,06128168	0,03939531	0,04251456	0,8325637	
Anderson-Darling	1,1425470	0,35862117	0,22840086	0,24260415	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	664,8638	654,7763	653,5310	653,5376	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	670,2647	660,1773	658,9319	658,9386	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,09769744	0,07834848	0,05738510	0,06457408	0,1660802	- 15 %
Cramer-von Mises	0,17641785	0,06128168	0,03939531	0,04255090	0,8325637	
Anderson-Darling	1,15020960	0,35862117	0,22840086	0,24277725	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	652,2892	642,2015	640,9561	640,9628	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	657,6901	647,6025	646,3571	646,3637	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0,09707671	0,07834848	0,05738510	0,06453655	0,1660802	- 20 %
Cramer-von Mises	0,17369209	0,06128168	0,03939531	0,04251853	0,8325637	
Anderson-Darling	1,14202651	0,35862117	0,22840086	0,24264652	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	638,9515	628,8641	627,6187	627,6254	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	644,3525	634,2650	633,0197	633,0263	NA	

C. táblázat: A mért sebességértékek (km / h) és a függvényillesztés jóságának megállapítása lassuló áramlás mellett, figyelembe véve a sebességbecslés különböző hibaszintjeit

Goodness-of-fit tests	Weibull	Normal	Log-normal	Chi-square	Logistic	Error Level
Kolmogorov-Smirnov	0,0701749	0,07159481	0,049447	0,0387195	0,0520098	+ 5 %
Cramer-von Mises	0,0820011	0,08189015	0,057922	0,020483	0,053909	
Anderson-Darling	0,527909	0,52451279	0,430514	0,1739470	0,4695351	
Akaike's Information Criterion (AIC)	753,9579	754,6487	753,7931	748,2034	757,5318	
Bayesian Information Criterion (BIC)	759,4822	760,1730	759,3175	750,9656	763,0561	
Kolmogorov-Smirnov	0,070178	0,07159481	0,049447	0,042939	0,052009	+ 10 %
Cramer-von Mises	0,0819992	0,08189015	0,057922	0,022589	0,053909	
Anderson-Darling	0,527898	0,52451279	0,430514	0,205743	0,46953	
Akaike's Information Criterion (AIC)	764,8435	765,5344	764,6788	759,1470	768,4175	
Bayesian Information Criterion (BIC)	770,3679	771,0587	770,2032	761,9091	773,9418	
Kolmogorov-Smirnov	0,0701627	0,07159481	0,049447	0,046885	0,05200	+ 15 %
Cramer-von Mises	0,0819881	0,08189015	0,057922	0,028056	0,05390	
Anderson-Darling	0,527879	0,52451279	0,43051	0,2701413	0,46953	
Akaike's Information Criterion (AIC)	775,2453	775,9361	775,0805	769,8442	778,8192	
Bayesian Information Criterion (BIC)	780,7696	781,4604	780,6049	772,6063	784,3435	
Kolmogorov-Smirnov	0,0701606	0,07159481	0,049447	0,050561	0,052009	+ 20 %
Cramer-von Mises	0,0819917	0,08189015	0,057922	0,036487	0,05390	
Anderson-Darling	0,527894	0,52451279	0,43051	0,364503	0,469535	
Akaike's Information Criterion (AIC)	785,2042	785,8950	785,0395	780,3162	788,7781	
Bayesian Information Criterion (BIC)	790,7286	791,4194	790,5638	783,0784	794,3025	
Kolmogorov-Smirnov	0,070135	0,07159481	0,049447	0,05727	0,052009	+ 30 %
Cramer-von Mises	0,081902	0,08189015	0,057922	0,060439	0,053909	
Anderson-Darling	0,527618	0,52451279	0,430514	0,632097	0,469535	
Akaike's Information Criterion (AIC)	803,9342	804,6250	803,7695	800,6567	807,5081	
Bayesian Information Criterion (BIC)	809,4585	810,1494	809,2938	803,4189	813,0325	
Kolmogorov-Smirnov	0,07013	0,07159481	0,049447	0,03879	0,052009	- 5 %
Cramer-von Mises	0,08191911	0,08189015	0,05792	0,0286151	0,05390	
Anderson-Darling	0,527672	0,52451279	0,430514	0,2217057	0,469535	
Akaike's Information Criterion (AIC)	730,5383	731,2292	730,3736	725,4766	734,1123	
Bayesian Information Criterion (BIC)	736,0627	736,7535	735,8979	728,2388	739,6366	
Kolmogorov-Smirnov	0,070243	0,07159481	0,049447	0,043276	0,052009	- 10 %
Cramer-von Mises	0,0821781	0,08189015	0,05792	0,040212	0,053909	
Anderson-Darling	0,528432	0,52451279	0,43051	0,3091979	0,469535	
Akaike's Information Criterion (AIC)	717,8866	718,5774	717,7219	713,6326	721,4605	
Bayesian Information Criterion (BIC)	723,4110	724,1018	723,2462	716,3948	726,9849	
Kolmogorov-Smirnov	0,070086	0,07159481	0,049447	0,047901	0,052008	- 15 %
Cramer-von Mises	0,0817156	0,08189015	0,057922	0,057999	0,05390933	
Anderson-Darling	0,527042	0,52451279	0,430514	0,445547	0,469535	
Akaike's Information Criterion (AIC)	704,5115	705,2024	704,3468	701,4191	708,0855	
Bayesian Information Criterion (BIC)	710,0359	710,7267	709,8712	704,1813	713,6098	
Kolmogorov-Smirnov	0,070101	0,07159481	0,049447	0,052685	0,0520098	- 20 %
Cramer-von Mises	0,081835	0,08189015	0,05792	0,083060	0,053909	
Anderson-Darling	0,527432	0,52451279	0,430514	0,6365167	0,469535	
Akaike's Information Criterion (AIC)	690,3254	691,0162	690,1606	688,7906	693,8993	
Bayesian Information Criterion (BIC)	695,8497	696,5405	695,6850	691,5528	699,4237	

D. táblázat: A mért sebességértékek (km / h) és a függvényillesztés jóságának megállapítása gyorsuló áramlás mellett, figyelembe véve a sebességbecslés különböző hibaszintjeit

Goodness-of-fit tests	Weibull	Normal	Log-normal	Gamma	Beta	Error Level
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06305521	+ 5 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381228	0,07394376	
Anderson-Darling	2,1875908	2,0322768	7,2177582	4,8177793	0,58546846	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81705	-22,34524	62,59546	21,00191	-53,58349	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24207	-16,77025	68,17044	26,57689	-48,00851	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06318114	+ 10 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381227	0,07421670	
Anderson-Darling	2,1875907	2,0322768	7,2177582	4,8177790	0,58777253	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81705	-22,34523	62,59546	21,00191	-53,58391	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24207	-16,77025	68,17045	26,57689	-48,00892	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06333252	+ 15 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381227	0,07457412	
Anderson-Darling	2,1875907	2,0322768	7,2177582	4,8177788	0,59062494	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81705	-22,34523	62,59547	21,00191	-53,58435	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24206	-16,77025	68,17045	26,57690	-48,00937	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06342779	+ 20 %
Cramer-von Mises	0,3430217	0,3299080	1,2681188	0,8381226	0,07481655	
Anderson-Darling	2,1875907	2,0322768	7,2177582	4,8177786	0,59264767	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81705	-22,34523	62,59547	21,00191	-53,58483	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24206	-16,77025	68,17045	26,57690	-48,00984	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06277775	- 5 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381230	0,07326392	
Anderson-Darling	2,1875908	2,0322768	7,2177582	4,8177798	0,57992461	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81706	-22,34524	62,59546	21,00190	-53,58280	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24207	-16,77026	68,17044	26,57689	-48,00782	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06261044	- 10 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381231	0,07287825	
Anderson-Darling	2,1875908	2,0322768	7,2177582	4,8177801	0,57677902	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81706	-22,34525	62,59545	21,00190	-53,58254	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24208	-16,77026	68,17044	26,57688	-48,00755	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06246411	- 15 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381231	0,07255211	
Anderson-Darling	2,1875909	2,0322768	7,2177582	4,8177805	0,57401147	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81707	-22,34525	62,59545	21,00189	-53,58234	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24208	-16,77027	68,17043	26,57688	-48,00736	
Kolmogorov-Smirnov	0,1110442	0,1081006	0,1743946	0,1537265	0,06225249	- 20 %
Cramer-von Mises	0,3430218	0,3299080	1,2681188	0,8381233	0,07209495	
Anderson-Darling	2,1875909	2,0322768	7,2177582	4,8177809	0,57027639	
Akaike's Information Criterion (AIC)	-18,81707	-22,34525	62,59544	21,00189	-53,58223	
Bayesian Information Criterion (BIC)	-13,24209	-16,77027	68,17043	26,57687	-48,00724	

E. táblázat: A mért sebességértékek (km / h) és a függvényillesztés jóságának megállapítása torlódásos áramlás mellett, figyelembe véve a sebességbecslés különböző hibaszintjeit

Goodness-of-fit tests	Weibull	Log-normal	Gamma	Exponential	Error Level
Kolmogorov-Smirnov	0,1191751	0,1352376	0,1227149	0,1076295	+ 5 %
Cramer-von Mises	0,2231884	0,3314802	0,2325473	0,1913169	
Anderson-Darling	1,6539557	2,2459483	1,7130743	1,6000141	
Akaike's Information Criterion (AIC)	481,8644	484,1806	481,7615	484,4919	
Bayesian Information Criterion (BIC)	486,8417	489,1579	486,7388	486,9805	
Kolmogorov-Smirnov	0,1191709	0,1352376	0,1227370	0,1076295	+ 10 %
Cramer-von Mises	0,2232515	0,3314802	0,2325796	0,1913170	
Anderson-Darling	1,6543600	2,2459483	1,7133271	1,6000142	
Akaike's Information Criterion (AIC)	490,1450	492,4612	490,0421	492,7725	
Bayesian Information Criterion (BIC)	495,1222	497,4385	495,0193	495,2611	
Kolmogorov-Smirnov	0,1192183	0,1352376	0,1227447	0,1076295	+ 15 %
Cramer-von Mises	0,2233920	0,3314802	0,2325964	0,1913169	
Anderson-Darling	1,6552271	2,2459483	1,7134469	1,6000141	
Akaike's Information Criterion (AIC)	498,0574	500,3736	497,9545	500,6849	
Bayesian Information Criterion (BIC)	503,0347	505,3509	502,9317	503,1735	
Kolmogorov-Smirnov	0,1191851	0,1352376	0,1227905	0,1076295	+ 20 %
Cramer-von Mises	0,2232403	0,3314802	0,2326136	0,1913169	
Anderson-Darling	1,6542800	2,2459483	1,7136850	1,6000141	
Akaike's Information Criterion (AIC)	505,6330	507,9492	505,5301	508,2605	
Bayesian Information Criterion (BIC)	510,6103	512,9265	510,5074	510,7491	
Kolmogorov-Smirnov	0,1192193	0,1352376	0,1227425	0,1076295	- 5 %
Cramer-von Mises	0,2233885	0,3314802	0,2324279	0,1913170	
Anderson-Darling	1,6552042	2,2459483	1,7124725	1,6000142	
Akaike's Information Criterion (AIC)	464,0496	466,3658	463,9466	466,6770	
Bayesian Information Criterion (BIC)	469,0268	471,3430	468,9239	469,1657	
Kolmogorov-Smirnov	0,119168	0,1352376	0,1227722	0,1076295	- 10 %
Cramer-von Mises	0,223297	0,3314802	0,2326957	0,1913169	
Anderson-Darling	1,654652	2,2459483	1,7141004	1,6000141	
Akaike's Information Criterion (AIC)	454,4256	456,7418	454,3227	457,0531	
Bayesian Information Criterion (BIC)	459,4029	461,7191	459,2999	459,5417	
Kolmogorov-Smirnov	0,1192008	0,1352376	0,1227363	0,1076295	- 15 %
Cramer-von Mises	0,2232869	0,3314802	0,2324706	0,1913170	
Anderson-Darling	1,6545681	2,2459483	1,7126990	1,6000141	
Akaike's Information Criterion (AIC)	444,2514	446,5676	444,1485	446,8789	
Bayesian Information Criterion (BIC)	449,2287	451,5449	449,1257	449,3675	
Kolmogorov-Smirnov	0,1192119	0,1352376	0,1227209	0,1076295	- 20 %
Cramer-von Mises	0,2232823	0,3314802	0,2324812	0,1913170	
Anderson-Darling	1,6545321	2,2459483	1,7127131	1,6000141	
Akaike's Information Criterion (AIC)	433,4602	435,7764	433,3573	436,0877	
Bayesian Information Criterion (BIC)	438,4375	440,7537	438,3346	438,5763	

F. táblázat: A mért sebességértékek (km / h) és a függvényillesztés jóságának megállapítása túltelített torlódás mellett, figyelembe véve a sebességbecslés különböző hibaszintjeit

Goodness-of-fit tests	Weibull	Normal	Log-normal	Gamma	Uniform	Error Level
Kolmogorov-Smirnov	0.08003632	0.07312253	0.07517967	0.06268930	0.2401795	+ 5 %
Cramer-von Mises	0.10982133	0.08314372	0.07244533	0.05777517	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86457138	0.61695308	0.44767556	0.38458526	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	618.4569	614.1415	609.0544	609.0750	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	623.8760	619.5606	614.4734	614.4941	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.08020147	0.07312253	0.07517967	0.06270179	0.2401795	+ 10 %
Cramer-von Mises	0.11038349	0.08314372	0.07244533	0.05776189	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86640945	0.61695308	0.44767556	0.38448749	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	628.7843	624.469	619.3818	619.4024	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	634.2034	629.888	624.8009	624.8215	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.08022457	0.07312253	0.07517967	0.06276694	0.2401795	+ 15 %
Cramer-von Mises	0.11046431	0.08314372	0.07244533	0.05787347	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86667554	0.61695308	0.44767556	0.38515794	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	638.6526	634.3373	629.2501	629.2707	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	644.0717	639.7563	634.6692	634.6898	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.08008344	0.07312253	0.07517967	0.06276391	0.2401795	+ 20 %
Cramer-von Mises	0.10998905	0.08314372	0.07244533	0.05782003	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86512414	0.61695308	0.44767556	0.38481160	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	648.1009	643.7855	638.6984	638.719	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	653.5199	649.2046	644.1174	644.138	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.08017335	0.07312253	0.07517967	0.06265826	0.2401795	- 5 %
Cramer-von Mises	0.11025152	0.08314372	0.07244533	0.05774832	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86595356	0.61695308	0.44767556	0.38443757	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	596.2384	591.9230	586.8359	586.8565	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	601.6574	597.3421	592.2549	592.2755	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.08009915	0.07312253	0.07517967	0.06276749	0.2401795	- 10 %
Cramer-von Mises	0.11008298	0.08314372	0.07244533	0.05791712	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86545828	0.61695308	0.44767556	0.38544280	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	584.2354	579.9201	574.8329	574.8536	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	589.6545	585.3392	580.2520	580.2726	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.08019808	0.07312253	0.07517967	0.06272397	0.2401795	- 15 %
Cramer-von Mises	0.11034252	0.08314372	0.07244533	0.05789188	1.7901477	
Anderson-Darling	0.86625584	0.61695308	0.44767556	0.38531653	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	571.5463	567.2309	562.1438	562.1644	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	576.9653	572.6500	567.5628	567.5834	NA	
Kolmogorov-Smirnov	0.0801243	0.07312253	0.07517967	0.06269706	0.2401795	- 20 %
Cramer-von Mises	0.1101419	0.08314372	0.07244533	0.05784111	1.7901477	
Anderson-Darling	0.8656331	0.61695308	0.44767556	0.38500877	Inf	
Akaike's Information Criterion (AIC)	558.0876	553.7723	548.6851	548.7057	NA	
Bayesian Information Criterion (BIC)	563.5067	559.1913	554.1042	554.1248	NA	

