



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Kandó Kálmán Doktori Iskola

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Gépjárműtechnológia Tanszék

**Autonóm járművek forgalommenedzsment folyamatainak modellezése,
különös tekintettel a biztonsági és hatékonysági szempontokra**

Tézisek

Pauer Gábor

Témavezető: **Dr. Török Árpád**

Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

1	A témaválasztás indoklása, aktualitása	1
2	A kutatás célkitűzései.....	3
2.1	Hipotézisek.....	5
3	Új tudományos eredmények.....	6
4	Az eredmények hasznosíthatósága és a továbbfejlesztés lehetőségei.....	18
	A szerző saját publikációi az értekezéssel kapcsolatban.....	20
	Irodalomjegyzék.....	22

1 A témaválasztás indoklása, aktualitása

A járműtechnológia gyors fejlődése a jövő közlekedési rendszereinek megváltoztatását vonja maga után. E tekintetben különösen jelentősek a járművek automatizálására vonatkozó törekvések, melyek az emberi beavatkozás szükségességét csökkentik.

A fejlett vezetéstámogató rendszerek (ADAS) már jelenleg is elérhetőek, növelve a járművek önállóságát a különböző vezetési feladatok segítése, befolyásolása révén. Példaként említhető a fejlett vészfékező rendszer (AEBS), a sávtartó asszisztens (LKAS), vagy az adaptív sebességtartó automatika (ACC). A hasonló rendszerek elterjedését a biztonság és a kényelem növelése motiválja. Ennek megfelelően a fejlesztések elsősorban a leggyakoribb, illetve leginkább kockázatos vezetési feladatok támogatására irányulnak (pl. gyalogosok vagy akadályok észlelése, ütközések elkerülése, a közlekedési környezet elemeinek felismerése) (Mallozzi et al., 2019). Az önvezető járművek (autonóm jármű – AV) fejlesztésének célja a magas szintű, vagy teljes automatizáltság elérése (Bimbraw, 2015), mely esetén a jármű adott körülmények között, vagy minden esetben képes ellátni az összes, vezetéssel kapcsolatos funkciót.

Az autonóm járművek elterjedésétől és a közlekedési rendszer ezzel együtt járó fejlődésétől számos előny várható (Becker és Axhausen, 2017; Fagnant és Kockelman, 2015; Tettamanti, Varga és Szalay, 2016; Narayanan et al., 2020; Litman, 2021):

- növekvő forgalombiztonság,
- hatékonyabb forgalomáramlás, megnövekedett kapacitás, csökkenő eljutási idők,
- csökkenő energiafelhasználás és szennyezés,
- nagyobb függetlenség a járművet nem vezetőik számára,
- a járművezetői stressz csökkenése, megnövekedett termelékenység az utazás során,
- járműmegosztási szolgáltatások támogatása.

A lehetséges hátrányok között a közlekedési és logisztikai szektorokban megszűnő munkahelyek, az adatbiztonsággal és kezeléssel kapcsolatos kérdések, a magas fejlesztési költségek, illetve a társadalmi méltányossággal kapcsolatos aggályok említhetők (Tettamanti, Varga és Szalay, 2016; Yuen et al., 2020).

Az autonóm közlekedési rendszerekkel kapcsolatos elvárások magasak, ugyanakkor a technológia fejlődésével, elterjedésével kapcsolatos tendenciákat nehéz előrebecsülni. Az

optimista iparági érdekeltek kellően megbízható és elérhető autonóm járműveket várnak 2030-ig, a közlekedési rendszer teljes automatizálása azonban csak évtizedek múlva valósulhat meg (Litman, 2021). Az autonóm közlekedési szolgáltatások lehatárolt, zárt környezetekben ennél hamarabb is megvalósulhatnak (pl. üzleti negyedek, egyetemi kampuszok, repülőterek esetén), ilyen esetekben ugyanis számos akadályozó tényező (pl. rossz minőségű utak, közlekedési jelzések, megbízhatatlan vezeték nélküli kommunikációs hálózat) elkerülhető.

A bemutatott megfontolások és technológiai trendek a témakör újdonságát és fontosságát hangsúlyozzák. A közlekedési rendszerek várható átalakulása számos új kutatási területet generál. A járműipari fejlesztéseken túl fontos a közlekedési rendszer további elemeinek (infrastruktúra, úthasználók, menedzsment, szabályozás, stb.) felkészítése a változásokra. Ez magában foglalja többek között az alábbi feladatokat:

- az úthálózattal, információs technológiai rendszerrel kapcsolatos szükségletek feltárása, elemek tervezése (Domínguez és Sanguino, 2019; Latham és Nattrass, 2019),
- az autonóm járművek társadalmi elfogadásának felmérése, értékelése (Golbabaie et al., 2020; Yuen et al., 2020),
- irányítási eljárások kidolgozása mikroszinten (pl. egyéni járművek útkövetése, sávváltási folyamatai) (Amer et al., 2017; Xu, Shi és Ji, 2017),
- forgalmi menedzsment folyamatok kidolgozása makroszinten (pl. kooperatív járműirányítás kereszteződésekben, hálózati szintű forgalomoptimalizálás) (Zhu és Ukkusuri, 2015; Hult et al., 2016; Horváth, Tettamanti és Varga, 2018; Tettamanti és Varga, 2019),
- a szabályozási keretrendszer értékelése és fejlesztése (Hevelke és Nida-Rümelin, 2015; Claybrook és Kildare, 2018),
- biztonsági, adatvédelmi és adatkezelési kérdések vizsgálata (Fagnant és Kockelman, 2015; Cui et al., 2019).

A fejlesztési folyamatok vizsgálatához, hatékony beavatkozások tervezéséhez az előzetes hatásvizsgálatok és utólagos értékelések elvégzése kiemelten fontos. Tekintettel az autonóm járművek fejlődésével és elterjedésével kapcsolatos számos ismeretlen, bizonytalan tényezőre, a forgalommal kapcsolatos értékelésekhez modellezési keretrendszerek és általános módszertanok kialakítása szükséges. Kutatásom során ilyen eljárások kidolgozására törekedtem, elsősorban a magasan automatizált közlekedési rendszerek forgalommenedzsment folyamatainak modellezésére összpontosítva, különös tekintettel a közlekedés biztonságára és hatékonyságára.

2 A kutatás célkitűzései

A járművek automatizálásában rejlő lehetőségek mentén kutatásom során egy teljesen automatizált személyközlekedési rendszert vizsgállok, melyben a járművek mozgásfolyamatait, döntéseit központilag befolyásolhatónak tekintem. Ez lehetőséget biztosít a rendszerszintű forgalommenedzsment megvalósítására.

A közlekedési rendszer működésének leképezése érdekében célom olyan, az autonóm forgalommenedzsment rendszer modellezésére alkalmas eljárás kidolgozása, mely a helyváltoztatáshoz kapcsolódó veszteségek (pl. utazási idő, baleseti kockázat) rendszerszintű minimalizálására képes. A közlekedésbiztonsággal kapcsolatos növekvő elvárások tükrében további célom az autonóm közlekedési rendszerek forgalombiztonságát jellemző paraméterek kidolgozása és vizsgálata. Más szavakkal, munkám célja a forgalom modellezése és biztonságának értékelése olyan környezetben, melyet kizárólag önvezető járművek használnak.

- A forgalommenedzsmentet megvalósító alapmodellek kidolgozása

A kutatási célok eléréséhez első lépésként az autonóm közlekedési rendszerek forgalommenedzsment folyamatait megvalósító modellezési keretrendszert dolgozom ki. Ehhez olyan eljárások vizsgálata szükséges, melyek a forgalomszétosztási problémát hatékonyan, akár valós időben képesek megoldani a forgalmi áramlatok megfelelő kialakítása révén. Fontos kutatási feladat továbbá az alapmodell kiterjesztési lehetőségeinek vizsgálata is, a különböző externális tényezők (pl. útdíj struktúra, forgalombiztonsági jellemzők) utazási igényekre, forgalomra és hatékonyságra gyakorolt hatásainak vizsgálata érdekében.

- Az alapmodellek továbbfejlesztése dinamikus modellé

Az alapmodell kidolgozása során gyűjtött tapasztalatok és eredmények alapján célom a modellezési keretrendszer továbbfejlesztése az egyéni járművek közlekedésének, döntéseinek meghatározása érdekében. Ehhez a vizsgált közlekedési környezet és idő diszkrétizálása, továbbá a kooperatív járműirányítás és a valós idejű forgalommenedzsment eszközeinek és céljainak kombinálása szükséges. A kidolgozott dinamikus modellnek képesnek kell lennie a közlekedési folyamatok hálózati szintű optimalizálására, miközben a forgalombiztonsági és járműdinamikai korlátok a járművek szintjén kerülnek leképezésre.

- A dinamikus modell alkalmazhatóságának vizsgálata és javítása

A dinamikus modell működőképességének vizsgálata érdekében a modell MATLAB szoftverben való leképezése, és különböző mintaúthálózatokon való alkalmazása szükséges. Figyelembe véve a tér és idő részletes felosztását, valamint a vizsgált járművek nagy számát, jelentős számítási igény merül fel. Ennek megfelelően meg kell vizsgálni a probléma komplexitásának csökkentését célzó eszközöket, lehetőségeket (a megengedett megoldásokra vonatkozó korlátok megsértése nélkül).

- Közlekedésbiztonsági vizsgálatok megalapozása az autonóm közlekedési rendszerben

A fentiekben leírt dinamikus modellel célom, hogy az autonóm közlekedési rendszer forgalmi folyamatainak leképezésével lehetőséget teremtsek a hatékonyság és közlekedésbiztonság vizsgálatára. Ez az optimalizálási célfüggvény vizsgálata mellett különböző biztonsági mutatók definiálását igényli. A mutatók a járművek mozgásának egyedi és egymáshoz képesti jellemzői alapján fejezik ki a forgalom biztonsági szintjét.

- A közlekedési környezet különböző leképezéseinek hatásvizsgálata

A közlekedési környezet leképezése egy központosított járműirányítási és menedzsment rendszer alapvető elemét képezi. A leképezés struktúrája kapcsolatot biztosít a fizikai infrastruktúra és az elméleti modell között a közlekedési folyamatok térbeli jellemzőinek meghatározása révén. A jelenlegi rendszerek főként a négyzetrács alapú hálózati struktúrát alkalmazzák, de számos további leképezés is tervezhető. Fentiek tükrében célom különböző hálózati struktúrák kidolgozása és alkalmazása a forgalmi optimalizáció hatékonyságára, és a közlekedésbiztonsági jellemzőkre gyakorolt hatások vizsgálata érdekében.

2.1 Hipotézisek

1. Az autonóm közlekedési rendszer forgalommenedzsment és útvonal tervezési feladatait ellátó alapmodell fejlesztése során célszerű a külső, externális paraméterek statikus rendszeroptimumra gyakorolt hatásainak vizsgálata.
2. A tér és az idő diszkrétizálásával a statikus modell továbbfejleszthető, így dinamikus módon is leírhatjuk az autonóm forgalommenedzsment rendszerhez kapcsolódó járműmozgásokat, valamint a rendszerszintű folyamatokat.
3. A korlátozó kifejezések számának megfelelő csökkentése révén a kidolgozott forgalommenedzsment modell megoldásához szükséges számítási igény csökkenthető, miközben az megengedett eredményekre vonatkozó korlátok nem sérülnek.
4. A kidolgozott modell által az autonóm közlekedési rendszerben modellezett forgalmi áramlatok biztonsága eltérő módokon jellemezhető.
5. A közlekedési hálózat hagyományos, négyzetrács alapú struktúrától eltérő, egyéb leképezései révén lehetőség nyílik a rendszer hatékonyságának és biztonságának javítására.

3 Új tudományos eredmények

A közúti közlekedés fejlődésének egyik legígéretesebb irányát a magasan automatizált járművek fejlesztése és jövőbeli elterjedése jelenti. A közlekedési rendszerben várható változások új kutatási kérdéseket vetnek fel, melyek közül a forgalommenedzsment folyamatok modellezését, illetve a közlekedésbiztonsági és hatékonysági szempontokat vizsgáltam. Számos egyéb előny mellett az autonóm járművek lehetőséget biztosítanak egy hatékony és biztonságos központi forgalommenedzsment rendszer kifejlesztésére azáltal, hogy biztosítják a közlekedő elemek irányíthatóságát.

Kutatási célom az volt, hogy – egy teljesen autonóm személyközlekedési rendszert feltételezve – olyan forgalommenedzsment eljárásokat fejlesszek ki, melyek a közlekedési hálózat terheltségének rendszerszintű minimalizálására alkalmazhatók. A modellek alkalmazásával a járművek útvonalait, trajektóriáit a központi rendszer állítja elő. A kidolgozott modellek és az autonóm közlekedési rendszerben általuk meghatározott forgalmi áramlatok felhasználásával további célom az hatékonyságot és a forgalombiztonságot jellemző mutatók definiálása és vizsgálata volt.

Kutatásom fő tudományos eredményei az alábbiak szerint foglalhatók össze.

- 1. Hatékonyságon alapuló és utazási költség-alapú eljárásokat dolgoztam ki a forgalom áramlásának hálózati szintű modellezéséhez az autonóm közlekedési rendszerben. A modellek alkalmazhatóságát a forgalomszétosztási probléma megoldásával bizonyítottam három különböző felépítésű mintauthálózaton. Az egyik kidolgozott módszer (második alapmodell) az útdíjstruktúra modellbe építése révén lehetővé teszi az utazók döntéseinek befolyásolását, biztosítva ezáltal külső tényezők hatásainak vizsgálhatóságát.**

Kutatásom első szakaszában olyan modellezési keretrendszer kidolgozását tűztem ki célul, amely alkalmas a forgalmi áramlatok eloszlásának statikus optimum szerinti meghatározására autonóm közlekedési rendszerben. Ezt a klasszikus forgalomszétosztási problémát megoldó eljárások kidolgozásával értem el. A forgalommenedzsment során alkalmazott cél a vizsgált úthálózaton a teljes utazási idő minimalizálása volt (1. egyenlet), figyelembe véve a hálózati elemek forgalomnagyságainak (x_j) és eljutási ideinek (t_j) szorzatösszegét, valamint a kiinduló-

(o_k) és célállomások (d_l) közt elmaradt/késleltetett utazások paramétereit (mennyiség ($X'(o_k-d_l)$) és kiugróan magas eljutási idők ($T'(o_k-d_l)$) az ilyen esetek minimalizálása érdekében).

$$F_{obj} = \sum_{j=1}^m (x_j * t_j) + \sum_{k,l=1}^{q,r} (X'(o_k-d_l) * T'(o_k-d_l)) \rightarrow \min \quad (1)$$

Az eljárás során az előre definiált közlekedési igényeket a korlátozó feltételek figyelembe vételével kellett kielégíteni (1. táblázat). A forgalmi áramlatok meghatározására disszertációmban két különböző, eltérő elven működő statikus forgalommenedzsment eljárás került kifejlesztésre. A modelleket a kapcsolódó optimalizálási probléma célfüggvénye és a korlátozó kifejezések definiálása révén alakítottam ki. A közlekedési hálózatot irányítatlan gráfokkal képeztem le. Az úthálózat struktúrája mellett néhány további paraméter (gráf élekhez rendelt kapacitás és eljutási idők, alternatív útvonalak, közlekedési igények) előre definiált, konstans adatként került figyelembe vételre. Az alapmodellek fő jellemzőit az 1. táblázatban foglaltam össze.

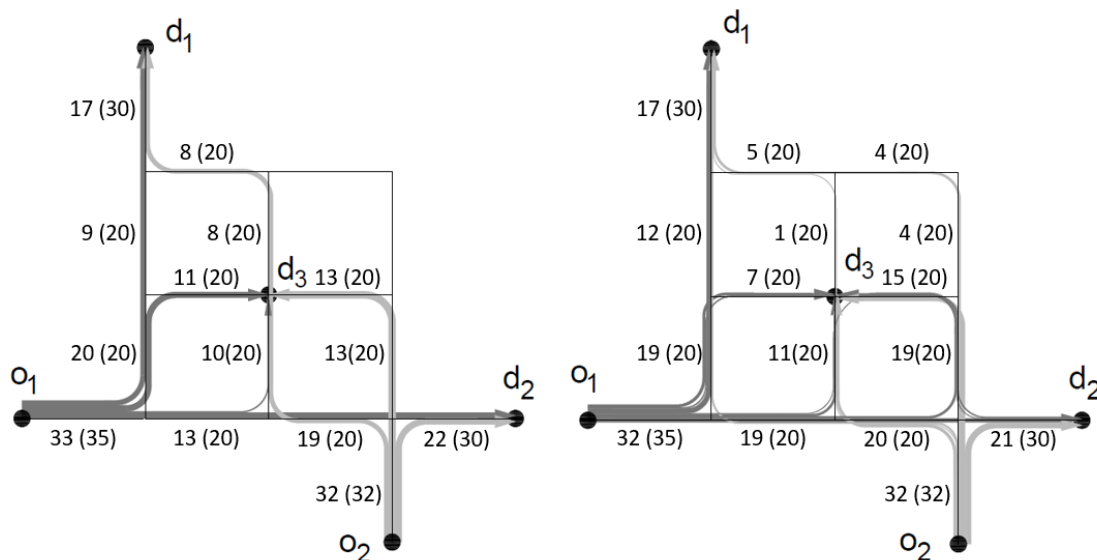
1. táblázat Az alapmodellek jellemzése

	Első alapmodell	Második alapmodell
Módszertan:	közvetlen irányítás	költségalapú irányítás
Modell változók:	az alternatív és fiktív útvonalak forgalomnagysága	az éleken való áthaladás költsége, és a fiktív útvonalak forgalomnagysága
Az optimalizáció célja:	az úthálózaton töltött teljes utazási idő minimalizálása a lehető legtöbb közlekedési igény kielégítése mellett	
Korlátozó feltételek:	a forgalomnagyságok nem negatív és egész értékűek	az élek költségei nem negatív értékűek
	a forgalomnagyság és az elmaradt utazások számának összege egyenlő az előre definiált közlekedési igényekkel	
	az élek (úthálózati elemek) kapacitása korlátozott	

Az első alapmodell a forgalmi áramlatokat változóként kezelve közvetlen forgalommenedzsmentet valósít meg. A módszer lehetővé teszi a forgalom leghatékonyabb szétosztását, előállítva az igények és a hálózat adataitól függő referencia optimumot.

A második alapmodell költségalapú forgalommenedzsmentet valósít meg, a forgalmi áramlatokat az útdíjstruktúra révén befolyásolva. Ebben az esetben az útszakaszok költségei az optimalizálandó változók. A modellben ezáltal az úthasználók döntései is figyelembe vételre kerültek az utazási hajlandóságukat leíró költségalapú függvény révén. A rendszer az utazási árak meghatározását az első modellel azonos cél (teljes utazási idő minimalizálása a lehető legtöbb közlekedési igény kielégítése mellett) mentén végzi.

A kidolgozott modellek fő eredménye a forgalomszétosztás optimalizációs problémájának leképezése volt. A modelleket a MATLAB környezetben implementáltam, alkalmazhatóságukat számpéldákon keresztül szemléltettem. Három mintahálózaton végeztem optimalizációt, mindkét modell alkalmazásával. Az eredményül kapott forgalmi áramlatokat Sankey diagramokon ábrázoltam, melyre példát az 1. ábra mutat.



1. ábra A harmadik vizsgált példahálózaton eredményül kapott forgalmi áramlatok (bal oldal: első alapmodell, jobb oldal: második alapmodell; zárójelben az élek kapacitása)

A költségalapú, második alapmodell az utazási igények, illetve az úthálózat struktúrájától függően egyenértékű, vagy valamivel kevésbé hatékony megoldásokat adott az első alapmodellhez képest. Új eredményként ugyanakkor lehetővé tette az utazói döntések befolyásolását az útdíjstruktúra kialakítása révén, megteremtve ezáltal külső, externális tényezők forgalommenedzsmentre gyakorolt hatásainak vizsgálhatóságát.

Az 1. tézishez kapcsolódó publikációk: (Pauer, 2017b; Török és Pauer, 2018; Pauer és Török, 2019a; Pauer és Török, 2019b; Pauer és Török, 2019c)

2. Egészértékű, bináris modellt dolgoztam ki az autonóm közlekedési rendszer forgalmi áramlatainak hálózati szintű modellezésére, figyelembe véve a releváns jármű szintű működési jellemzőket. Az alkalmazott döntési változó az egyéni járművek térbeli és időbeli elhelyezkedését diszkrét módon írta le, egészértékű, bináris értékkészlettel. A modellben a biztonságos közlekedéshez szükséges feltételeket (sebesség, gyorsulás és lassulás korlátozása, ütközések elkerülése) leképeztem és beépítettem. Ezt követően a modell számítási igényeit jelentősen csökkentő eljárásokat fejlesztettem ki. A módszerek az elhagyható, illetve redundáns korlátozó kifejezések kizárására szolgálnak, megtartva a modell eredményeinek megbízhatóságát. A csökkentett komplexitású modell alkalmazhatóságát és hatékonyságát mintapéldák megoldásával szemléltettem.

A vizsgált autonóm közlekedési rendszer még részletesebb forgalommenedzsmentjének megvalósíthatósága érdekében továbbfejlesztettem az alapmodelleket. Az idő és tér diszkrétizálásával olyan fejlett, makroszintű, dinamikus forgalommenedzsment modellt dolgoztam ki, mely alkalmas a közlekedési folyamatok mikroszintű meghatározására is. Ehhez 3 dimenziós döntési változót ($x_{k,j,i}$) alkalmaztam, mely a járművek (k) lokációit (i) időpillanatonként (j) írja le, egészértékű, bináris értékkészlettel.

Az alapmodellekhez hasonlóan a továbbfejlesztett modell célja a hálózat terheltségének minimalizálása volt a lehető legtöbb közlekedési igény kielégítése mellett, a definiált korlátozások figyelembe vételével. Ennek elérése érdekében a célfüggvény a járművek aktuálisan elfoglalt, illetve a célul szolgáló állomásai közötti távolságok összegének minimalizálására irányul a vizsgált időkeretben (2. egyenlet).

$$y_1 = f_1(x_{k,j,i} * c1^{(k)} * \mathbf{C3}) \rightarrow \min \quad (2)$$

A célfüggvény általánosított alakjában a járművek céllokációt kijelölő vektor ($c1^{(k)}$) és a lokáció párok közti legrövidebb útvonalak hosszát tartalmazó mátrix ($\mathbf{C3}$) szerepelnek. A függvény azt kívánja biztosítani, hogy a járművek a céllokációikat a lehető legrövidebb idő alatt elérjék.

A továbbfejlesztett modell esetén a hálózati szintű forgalommenedzsmentet tehát az egyéni járművek irányításán keresztül értem el. A közlekedési hálózat elemeinek és a járműveknek egymáshoz való kölcsönös, egyértelmű hozzárendelése érdekében négyzettrács alapú leképezést

alkalmaztam, melyben a vizsgált útszakaszokat egyforma alakú, irányított cellákra (lokációkra) bontottam fel (lásd 2. ábra).

A forgalmi áramlatok kezelése helyett az egyéni járművek szintjén történő beavatkozás újszerű koncepciója összetettebb forgalommenedzsmet megvalósítását, és a forgalom biztonságával, hatékonyságával kapcsolatos részletesebb vizsgálatok elvégzését tette lehetővé. A modell a járművek pozícióját minden időpillanatra vonatkozóan pontosan meghatározta, biztosítva a vizsgálatba vont korlátozások betartását, összhangban a foglaltsági rács koncepciójával (Elfes, 1989).

A modell korlátozó feltételeinek kidolgozása a következő megfontolásokon alapult.

- A megoldások megvalósíthatóságának biztosítása érdekében a lokációk és járművek egyértelmű, kölcsönös összerendelése volt szükséges:
 - a járművekhez hozzárendeltem a kiinduló lokációikat;
 - adott lokációban egy adott időpillanatban legfeljebb egy jármű helyezkedhetett el (kivéve a kiinduló. és céllokációkat);
 - adott jármű egy adott időpillanatban csak egy lokáción helyezkedhetett el.
- A forgalombiztonsági szempontokat az ütközések elkerülésével érvényesítettem:
 - az egy időlépésben történő, egymást keresztező járműmozgásokat a teljes vizsgált időintervallumon megtiltottam.
- A járműdinamikával kapcsolatos paramétereket figyelembe vettem:
 - a járművek sebesség, illetve
 - gyorsulás/lassulás értékei hálózati szintű korlátozást kaptak.

Disszertációm keretében a kidolgozott modell általánosított alakját mutattam be, az alkalmazhatóságot kisléptékű számpéldákon keresztül szemléltettem. Azonosítottam, hogy a modell alkalmazhatóságának fő korlátja abból adódik, hogy az idő és tér diszkretizálása, valamint a valós közlekedési rendszerekben figyelembe veendő járművek nagy száma jelentősen megnövelheti a változók számát. Ez növekvő számítási komplexitást és feldolgozási időt eredményez. A probléma mérséklése érdekében a bemutatott forgalommenedzsmet eljárás összetettségét csökkentő módszereket dolgoztam ki.

A fenti célok elérése érdekében a legjobb lehetséges megoldásként a korlátozó kifejezések számának mérséklését azonosítottam. A redundáns, illetve elhagyható esetek vizsgálatból való kizárása révén a modellben figyelembe vett korlátozó egyenletek és egyenlőtlenségek száma

úgy csökkenthető, hogy közben a megoldás megvalósíthatósága és a forgalommenedzsment hatékonysága sem sérül.

A kidolgozott egyszerűsítő eljárások alapelve a változók bizonyos értékeinek vizsgálatból való kizárása volt a sebességet, gyorsulást és lassulást korlátozó kifejezések esetén. Továbbá a kiinduló- és céllokációk vizsgálata – azok speciális tulajdonságai miatt (pl. a járművek az utazási folyamat során nem léphetnek kiinduló lokációra, és nem léphetnek el céllokációból) – szintén elhagyható volt némely korlátozó kifejezésből. Kiemelve egy példát: a modell kidolgozása során a sebességhatár betartására vonatkozó korlátozást - a 3. egyenletben feltüntetett módon - a változó teljes értékészletére vonatkozóan vizsgáltam.

$$f_4(x_{k,j,i}, x_{k,j+1,q}) * c_{3,i,q} \leq c_4; \text{ minden } k, j, i, q \text{ esetén} \quad (3)$$

ahol a j és $(j + 1)$ időpillanatokban beutazott i és q lokációk közötti távolságot $c_{3,i,q}$, míg a megengedett sebesség értékét c_4 jelölte.

A kidolgozott egyszerűsítő eljárás koncepciójában ugyanakkor azonosítottam, hogy a változó vizsgálandó értékeinek köre leszűkíthető azon esetekre, amikor a vizsgált lokációk közötti, C_3 mátrixban definiált legrövidebb távolságok értéke magasabb a megengedett sebességnél. Ennek megfelelően a 3. egyenlet vizsgált eseteinek köre az összes lehetséges lokáció pár vizsgálata helyett az alábbira szűkíthető:

$$\text{minden } k, j, i, q \text{ esetén; ha } c_{3,i,q} > c_4 \quad (4)$$

Az alkalmazott módszerek kapcsán különösen fontos volt annak biztosítása, hogy az egyszerűsítések ne sértsék a megoldás megvalósíthatóságát. Mivel az eljárások célja a modell módosítása volt, a hozzájuk kapcsolódó lehetséges kockázatok vizsgálata érdekében rendszerbiztonsági eljárásokat alkalmaztam. A fejlesztési folyamat során külön hangsúlyt fektettem a funkcionális biztonságra, azonosítva a modell nem megfelelő változtatásából eredő lehetséges veszélyeket, kockázatokat. Példaként említve, a $hazard_4$ jelölésű kockázat a sebességhatár megsértésének veszélyére utalt, mely a rendszer biztonsági szintjét és az útvonaltervezés megbízhatóságát is veszélyezteti (a balesetek súlyossága nagyban függ a sebességtől; a tiltott útvonalakat végtelen közeli távolság reprezentálta).

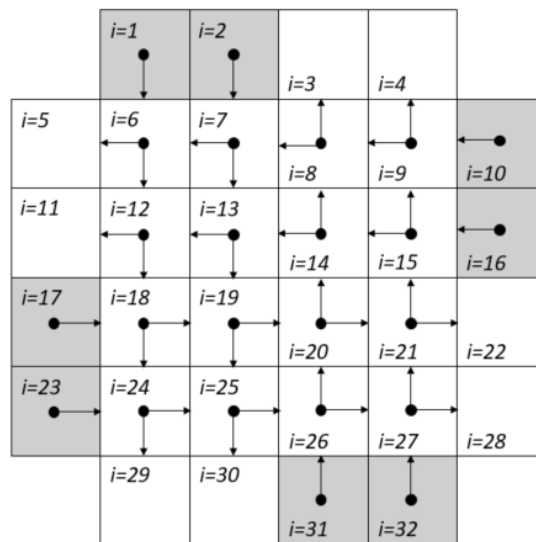
A kidolgozott egyszerűsítő eljárások (*method*) hatásait számpéldákon keresztül vizsgáltam. Az eredmények a korlátozó kifejezések számának szignifikáns csökkenését mutatták (a csökkenés meghaladta a 90%-ot az eljárások kombinált alkalmazása esetén), a modell

megbízhatóságának megsértése nélkül (2. táblázat). Ezáltal a modell alkalmazhatóságát jelentősen fejlesztettem, a kezelhető változók számát növelve, a futási időt csökkentve.

2. táblázat Az egyszerűsítő eljárások által elért csökkentés mértéke (példa)

	A vizsgált kifejezések számában mért csökkenés
<i>method</i> ₁	80.6%
<i>method</i> ₂	62.0%
<i>method</i> ₃	2.3%
<i>method</i> ₁ & <i>method</i> ₂	93.4%
<i>method</i> ₁ & <i>method</i> ₃	80.9%
<i>method</i> ₂ & <i>method</i> ₃	63.8%
<i>method</i> ₁ & <i>method</i> ₂ & <i>method</i> ₃	93.6%

A modell alkalmazhatóságának javulását egy növelt nagyságrendű, valóság-hű csomópontot reprezentáló példán (2. ábra) keresztül szemléltettem, 32 lokáció, 20 jármű, és 8 másodperces időkeret figyelembe vételével. Az optimalizációs feladat egyenleteinek és egyenlőtlenségeinek száma 16,000-29,000 között alakult az alkalmazott igénystruktúra függvényében, ami 10-88 másodperces futási időt eredményezett (alkalmazott hardver: Intel(R) Core(TM) i7-2620M CPU (2,70GHz), 4GB RAM).



2. ábra A növelt nagyságrendű példában alkalmazott úthálózat reprezentációja

Az optimalizáció eredménye alapján a kereszteződés 8 másodperc alatt kiürült az 1. alkalmazott igénystruktúra esetén (a kereszteződés minden ágán a külső sávban két jobbra kanyarodó és egy egyenesen haladó, valamint a belső sávban két balra kanyarodó járművet feltételezve). Az eredményül kapott útvonalakat a 3. táblázat oszlopaiban szemléltettem.

3. táblázat Az optimalizáció eredménye a növelt példa esetén (1. igénystruktúra)

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Indul	1	1	1	2	2	10	10	10	16	16	17	17	23	23	23	31	31	32	32	32
Cél	29	5	5	22	22	5	4	4	30	30	3	3	28	29	29	11	11	4	28	28
$j = 1$	1	1	1	2	2	10	10	10	16	16	17	17	23	23	23	31	31	32	32	32
$j = 2$	1	1	5	2	13	10	4	10	16	14	17	17	25	23	23	31	31	21	32	32
$j = 3$	6	1	5	2	21	10	4	10	16	13	17	17	25	23	29	26	31	9	32	28
$j = 4$	18	5	-	7	22	9	-	10	15	25	17	17	26	29	-	13	31	4	28	-
$j = 5$	29	-	-	20	-	6	-	4	14	30	18	17	28	-	-	11	26	-	-	-
$j = 6$	-	-	-	22	-	5	-	-	13	-	19	17	-	-	-	-	14	-	-	-
$j = 7$	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	8	18	-	-	-	-	12	-	-	-
$j = 8$	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-	3	14	-	-	-	-	11	-	-	-

Az igénystruktúra egyszerűsítése esetén (minden ágon az egyik balra kanyarodó mozgást egyenesen történő továbbhaladásra cserélve – 2. igénystruktúra) az eljárás a csomópontot 6 másodperc alatt ürítette ki (lásd 4. táblázat).

4. táblázat Az optimalizáció eredménye a növelt példa esetén (2. igénystruktúra)

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Indul	1	1	1	2	2	10	10	10	16	16	17	17	23	23	23	31	31	32	32	32
Cél	29	5	5	30	22	5	4	4	11	30	22	3	28	29	29	3	11	4	28	28
$j = 1$	1	1	1	2	2	10	10	10	16	16	17	17	23	23	23	31	31	32	32	32
$j = 2$	12	1	1	13	2	8	10	10	14	16	19	17	25	23	23	20	31	21	32	32
$j = 3$	18	1	5	19	7	8	4	10	12	16	21	17	25	23	29	14	26	15	28	32
$j = 4$	29	5	-	30	13	7	-	10	11	14	22	19	26	23	-	3	20	4	-	28
$j = 5$	-	-	-	-	19	5	-	4	-	13	-	20	28	29	-	-	14	-	-	-
$j = 6$	-	-	-	-	22	-	-	-	-	30	-	3	-	-	-	-	11	-	-	-

Az eredmények a csomóponti kapacitás tekintetében kiemelkedően hatékony forgalommenedzsment megvalósítását jelezték. A kapott értékek alapján a kereszteződésen egy óra alatt áthaladni képes járművek száma 9,000-12,000-re becsülhető (a balra kanyarodó, egyenesen haladó, illetve jobbra kanyarodó forgalom arányától függően). Barna és Schuchmann (2017) tanulmánya alapján egy hasonló felépítésű, jelzőlámpás irányítású csomópont maximális kapacitása 4,400-5,200 jármű/óra.

A 2. tézishez kapcsolódó publikációk: (Török és Pauer, 2018; Pauer és Török, 2021; Pauer és Török, 2022)

3. A vizsgált autonóm közlekedési modell biztonságának értékelésére alkalmas mutatókat definiáltam. A biztonsági mutatók a hálózaton megvalósult járműmozgások térbeli és időbeli jellemzői, valamint a sebességadatok alapján különböző típusú kockázatokat jellemeznek. A mutatók működését és alkalmazását számpéldán keresztül mutattam be.

Az autonóm közlekedési rendszer forgalmának biztonságával kapcsolatos szempontokra fókuszálva, a bemutatott dinamikus modell által nyújtott eredmények közlekedésbiztonsági szintjét jellemző indikátorokat definiáltam. A különböző biztonsági mutatók eltérő típusú kockázatokat jellemeznek, képleteik a járművek mozgásának térbeli és időbeli jellemzői, illetve a sebességadatok alapján kerültek definiálásra, az alábbiak szerint:

- CM : a mutató a keresztező járműmozgásokból adódó kockázatokat fejezi ki, az ilyen manőverek száma és időbeli távolsága alapján (lásd 5. egyenlet).

$$CM = \sum_{\substack{m,m,(t-1),(t-1),o,o,o,o \\ k,h,j,u,i,q,r,s=1 \\ k \neq h \\ u \neq j}} c7_{i-q,r-s} * (x_{k,j,i} * x_{k,j+1,q} * x_{h,u,r} * x_{h,u+1,s}) * \frac{1}{(u-j)^2} \quad (5)$$

ahol $c7_{i-q,r-s}$ értéke 1, ha az i és q , illetve r és s lokációk közti legrövidebb útvonalaknak van közös eleme (kivéve az útvonalak kiinduló lokációját), egyébként 0. Ily módon az első két szorzótényező szorzata 1-es értékkel azonosította, amennyiben bármely két jármű (k és h) bármely időlépések ($j, (j + 1)$ és $u, (u + 1)$) során olyan útvonalakat ($i - q$ és $r - s$) jártak be, melyek egymást keresztezik. A harmadik szorzótényezőt a fentiek szerinti keresztező járműmozgások kezdetének időbeli távolsága alapján képeztem.

- CF : a mutató a "szoros járműkövetésből" adódó kockázatokat fejezi ki az olyan manőverek számának összegzésével, amikor egy jármű olyan lokációra érkezik, melyet egy másik jármű ugyanazon időlépés során hagyott el.
- \overline{VN} : a mutató a közlekedésbiztonsági szintet a hálózati átlagsebesség alapján jellemzi, mely a vizsgált úthálózaton közlekedő járművek teljes időtartamra vetített sebességadatainak átlagolásával kerül kiszámításra.
- σ_{VV} : a mutató a közlekedésbiztonsági szintet az egyéni járművek sebességeinek inhomogenitása alapján jellemzi, melyet az egyes járművek időlépésenkénti sebességadatainak átlagos empirikus szórásaként értelmeztem.

- σ_{VN} : a mutató révén a sebességek inhomogenitása hálózati szinten is vizsgálatra kerül, a járművek időlépésenkénti sebességadatainak teljes időtartamra számított empirikus szórásaként.

A képleteket olyan módon határoztam meg, hogy mindegyik esetben a mutató alacsonyabb értéke utal a nagyobb forgalombiztonságra. Ez a keresztező mozgások, illetve szoros járműkövetési manőverek alacsonyabb számából vagy nagyobb időbeli távolságából (CM , CF), az alacsonyabb és egymáshoz képest egyenletesebb sebességadatokból (\overline{VN} , σ_{VN}), illetve az egyéni járművek egyenletesebb haladásából (σ_{VV}) adódhat.

A fenti megfontolások révén bármely közlekedési rendszer közlekedésbiztonsági szintje értékelhető, összevethető és rangsorolható. A mutatók funkcionalitását számpéldán keresztül szemléltettem, a korábban bemutatott közlekedési hálózaton (2. ábra) végzett optimalizációs feladat két megvalósítható eredményének ($FS1$, $FS2$) összevetésével. Az eredmények alapján $FS2$ mind a biztonság, mind a hatékonyság szempontjából kedvezőbbnek bizonyult (5. táblázat, y_1 az optimalizációs célfüggvény értékét jelöli).

5. táblázat A biztonsági mutatók értékei az összevetett megoldások esetén

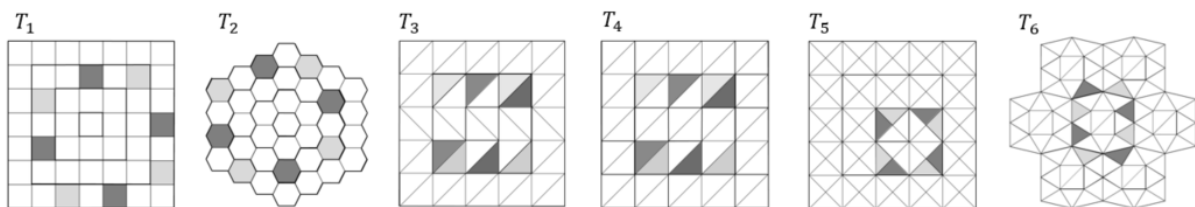
	$FS1$	$FS2$	Eltérés ($FS2/FS1$)
y_1 [m]	1130	1125	-0,4%
CM	49.056	48.444	-1.2%
CF	12	10	-16.7%
\overline{VN} [m/s]	8.333	8.696	+4.4%
σ_{VV}	1.963	1.861	-5.2%
σ_{VN}	2.985	2.935	-1.7%

A 3. tézishez kapcsolódó publikációk: (Török és Pauer, 2016; Pauer, 2017a; Török, Pauer és Berta, 2017b; Török és Pauer, 2017; Pauer, Sipos és Török, 2019; Pauer és Török, 2022)

4. Igazoltam, hogy az úthálózat különböző rácsszerkezetek alkalmazásával történő leképezése hatást gyakorol a kifejlesztett modell által eredményezett forgalmi áramlatok hatékonyságára és biztonságára. A hatásokat egy útkereszteződést reprezentáló példán keresztül vizsgáltam és számszerűsítettem. Ez alapján kimutattam, hogy a hagyományosan alkalmazott négyzetrács alapú hálózati struktúrához képest az egyéb sokszögekből (pl. hatszögek, háromszögek) képzett rácsszerkezetek alkalmazásával a modell hatékonysága és a biztonsági jellemzők is javíthatók.

A továbbfejlesztett, dinamikus forgalommenedzsment modell kidolgozása során a foglaltsági rács koncepcióval összhangban az úthálózatot négyzetrács alapú hálózatként képeztem le. Az alkalmazott struktúra a fizikai infrastruktúra és az elméleti modell közti kapcsolatot teremti meg, ugyanakkor a korábbi kutatások során kevés fókuszot kapott a különböző leképezési eljárások hatásainak vizsgálata.

Az autonóm közlekedési rendszerben megvalósított forgalommenedzsment hatékonysági és biztonsági szempontjainak további elemzése érdekében, új tudományos eredményként vizsgálat alá vontam különböző típusú rácsszerkezetek alkalmazásának hatásait. Ehhez különböző sokszögek felhasználásával képeztem hasonló nagyságrendű területet lefedő úthálózatokat (R), az 3. ábrán szemléltetett módon. Az alkalmazott poligonok méretét azonos sugarú beírható körök feltételezésével határoztam meg.



3. ábra Az alkalmazott rácsszerkezetek sematikus ábrája
(sötétszürke cellák: indulólokációk, világos szürke cellák: céllokációk)

Felhasználva az kidolgozott modellezési keretrendszert, az optimalizáció hatékonyságát a célfüggvény értéke és a járművek által összesen megtett távolság ($Dist$) alapján értékeltem a különböző esetekben. Az eredményül kapott forgalmi áramlatok biztonságának jellemzését a korábban definiált biztonsági mutatók alapján végeztem el (6. táblázat).

6. táblázat A különböző úthálózati struktúrák esetén kapott eredmények összevetése

	R^{T_1}	R^{T_2}	R^{T_3}	R^{T_4}	R^{T_5}	R^{T_6}
<i>Terület</i> [m ²]	600	585	655	655	583	624
y_1 [m]	1005	475	1346	945	865	1061
<i>Dist</i> [m]	320	245	273	270	260	282
<i>CM</i>	40.813	26.083	25.702	31.846	35.444	29.557
<i>CF</i>	10	5	12	12	14	13
\overline{VN} [m/s]	9.143	7.903	6.825	6.740	8.125	6.868
σ_{VV}	2.456	2.109	1.961	1.663	2.798	1.758
σ_{VN}	3.270	2.985	2.538	2.397	2.997	2.453

Az értékek alapján az úthálózat különböző rácsszerkezetekkel történő leképezése jelentősen befolyásolja a forgalomoptimalizáció eredményeit. A hagyományos négyzetrács alapú hálózati struktúra alkalmazása mind a hatékonyság, mind a forgalombiztonsági jellemzők terén kedvezőtlenebb értékeket eredményezett több egyéb struktúrához képest.

A hálózati elemek közti kapcsolatok nagy száma miatt előzetesen feltételezetteknek megfelelően a hatszög alakú alapsokszögek használata bizonyult a leghatékonyabb megoldásnak. Ebben az esetben a keresztező és szoros járműkövetési manőverek alapján képzett biztonsági mutatók értéke is kedvező volt. Ugyanakkor a hatékony forgalommenedzsment magasabb járműsebességeket eredményezett. Meg kell említeni továbbá azt is, hogy a lokációk közti kapcsolatok nagy száma a számítási igényeket is megnöveli.

A háromszög alapú struktúrákat a négyzetrács alapúnál alacsonyabb komplexitás jellemzi (minden lokációnak legfeljebb három szomszédja van). Ennek ellenére számos ilyen bemutatott leképezési struktúra esetén hasonló, vagy valamivel kedvezőbb hatékonysággal valósult meg a forgalommenedzsment, miközben több biztonsági mutató is kedvezőbb értéken alakult.

A 4. tézishez kapcsolódó publikációk: (Török, Pauer és Berta, 2017a; Török, Berta és Pauer, 2018; Pauer és Török, 2021; Pauer és Török, 2022)

4 Az eredmények hasznosíthatósága és a továbbfejlesztés lehetőségei

A kidolgozott alapmodellek a forgalmi áramlatok kezelése és szétosztása révén az autonóm közlekedési rendszer forgalommenedzsment feladatainak ellátására alkalmazhatók, a hálózati terheltség minimalizálása céljából. A második alapmodell új eredménye a forgalomoptimalizáció során az utazási folyamatok befolyásolása külső, externális tényezők modellbe építése révén. A kidolgozott koncepció mentén egyéb külső paraméterek (pl. forgalombiztonság, szennyezés) externális költségként való figyelembe vétele is lehetővé vált a forgalommenedzsment során. Disszertációmban az "utazási hajlandóságot" a forgalmakat a költségek függvényében leíró, lineáris összefüggéssel képeztem le. Ezen összefüggés adatokon alapuló, pontosabb meghatározása (akár az egyének, akár utazói csoportok szintjén) ugyanakkor fontos jövőbeli feladat a valósághű modellezéshez. A modell további validálását egy kiterjedt városi úthálózatra történő alkalmazása tenné lehetővé.

A fenti eredmények felhasználásával olyan továbbfejlesztett, dinamikus forgalommenedzsment modellt dolgoztam ki, mely a közlekedési folyamatokat a járművek szintjén kezelve hálózati szintű forgalomoptimalizációt képes megvalósítani. Ezáltal komplexebb forgalommenedzsment és a forgalmi folyamatok biztonságának, hatékonyságának részletesebb elemzése vált lehetővé. A forgalom biztonságos lebonyolódásához szükséges feltételeket a fejlesztés során figyelembe vettem. Az alkalmazott feltételezések finomításával az autonóm közlekedési rendszer működését leíró modell tovább pontosítható. Példaként említhető a járművek műszaki paramétereinek figyelembe vétele, a kanyarodás, vagy egyéb forgalmi manőverek megkülönböztetése, vagy a kiinduló lokációkon kezdő sebesség értelmezése.

A számítási komplexitás csökkentése és az alkalmazhatóság növelése érdekében a modellt egyszerűsítő eljárásokat dolgoztam ki. A számszerű példákon keresztül is bemutatott koncepció hatékony és biztonságos forgalommenedzsmentet tett lehetővé. Ily módon a modell alapot képez az autonóm közlekedési rendszerek központi irányítási feladataihoz, a hálózati szintű optimum figyelembevételével. A közlekedési hálózat megfelelő leképezésével a modell alkalmazható kisebb zárt rendszerek (pl. egyetemi kampuszok saját járműparkja) vagy infrastruktúra elemek (pl. csomópontok, útszakaszok) forgalommenedzsment feladatainak megvalósítására. Az ilyen alrendszerek összekapcsolása révén továbbá nagyobb területi

egységek forgalommenedzsmentje is megvalósítható a kidolgozott koncepció mentén. A modell hatékonysága és alkalmazhatósága tovább javítható komplex számítási feladatok megoldására optimalizált szoftveres és hardveres környezet alkalmazásával. Jövőbeli kutatásaim során célom a modell összetettségét tovább csökkentő eljárások kidolgozása. Példaként említhető olyan heurisztikák alkalmazása, melyek a vizsgálandó esetek számának csökkentésére irányulnak (pl. az alternatív útvonalak előzetes kijelölése, számuk korlátozása).

Az autonóm közlekedési rendszerben meghatározott forgalmi áramlatok biztonságának jellemzése érdekében különböző módszertani megfontolásokat alkalmaztam. A definiált biztonsági mutatók a különböző típusú kockázatok jellemzése révén alkalmasak a forgalommenedzsment eredményeinek közlekedésbiztonsági szempontú értékelésére. Eredményeim lehetőséget biztosítanak a jövőbeli kutatások során az autonóm közlekedési rendszerek forgalombiztonságának vizsgálatára, összevetésére és rangsorolására. A bemutatott koncepciók révén a különböző úthálózati felépítések, forgalmi vagy közlekedési igénystruktúrák, eltérő célfüggvények, stb. esetén megvalósított forgalommenedzsment értékelhető. A modellben a járművekre vonatkozóan azonos műszaki jellemzőket (pl. fékezési karakterisztika) feltételeztem. Ugyanakkor az eltérő műszaki paraméterek figyelembevétele fontos jövőbeli kutatási feladat. Ehhez elengedhetetlen, hogy a járművek, saját helyzetükre, aktuális műszaki, járműdinamikai állapotukra vonatkozóan a központi rendszert folyamatosan információval lássák el.

Az autonóm közlekedési rendszerben megvalósított forgalommenedzsment további elemzése érdekében vizsgálat alá vontam az úthálózat különböző rácsszerkezetekkel való leképezésének hatásait. Eredményeim alapján a leképezés során alkalmazott struktúra jelentősen befolyásolja a forgalomoptimalizáció hatékonysági és biztonsági szempontjait. Kutatásom során a hálózati struktúrákat intuitív módon határoztam meg. A kapott eredmények ugyanakkor arra utalnak, hogy a hálózat leképezéséhez használt rácsszerkezetek optimalizációja a jövőbeli fejlesztések fontos irányvonalát képezi. A további kutatások szintén kiemelendő területe a leképezési struktúra felbontásának növelése, amely pontosabban teszi lehetővé az alacsony sebességgel járó forgalmi műveletek (pl. gyalogos-jármű interakciók) kezelését. Ez a valós infrastruktúra elemek bármely rácsszerkezettel történő pontosabb, rugalmasabb leképezését is támogatná. Érdeemes továbbá megemlíteni, hogy a jelenlegi 2D módszer rugalmasan kiterjeszhető 3D környezetre is, mely hatékony segítséget nyújthat egyéb autonóm rendszerekkel kapcsolatos problémák (pl. pilóta nélküli repülőgépek irányítása) megoldásához.

A szerző saját publikációi az értekezéssel kapcsolatban

Pauer, G. (2017a). Development Potentials and Strategic Objectives of Intelligent Transport Systems Improving Road Safety. *Transport and Telecommunication*, 18(1), 15-24. <https://doi.org/10.1515/ttj-2017-0002>

Pauer, G. (2017b). Defining the Optimization Process of Traffic Distribution Problem with Linear Programming Approach in case of Autonomous Transportation System. *MOSATT 2017 Modern Safety Technologies in Transportation: Proceedings of the International Scientific Conference*, Herlány, Szlovákia. pp. 124-130. ISBN 978-80-553-2864-5

Pauer, G., Sipos, T., & Török, Á. (2019). Statistical Analysis of the Effects of Disruptive Factors of Driving in Simulated Environment. *Transport*, 34(1), 1-8. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.6724>

Pauer, G., & Török, Á. (2019a). Forgalom optimalizáció különböző felépítésű hálózatokon autonóm közlekedési rendszerben [Traffic optimization on networks of different structures in an autonomous transport system]. IX. Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, Magyarország, 2019.03.21-2019.03.22.

Pauer, G., & Török, Á. (2019b). Static System Optimum of Linear Traffic Distribution Problem Assuming an Intelligent and Autonomous Transportation System. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 47(1), 64-67. <https://doi.org/10.3311/PPtr.11548>

Pauer, G., & Török, Á. (2019c). Comparing System Optimum Based and User Decision Based Traffic Models in an Autonomous Transport System. *Promet - Traffic & Transportation*, 31(5), 581-589. <https://doi.org/10.7307/ptt.v31i5.3151>

Pauer, G., & Török, Á. (2021). Binary integer modeling of the traffic flow optimization problem, in the case of an autonomous transportation system. *Operations Research Letters*, 49(1), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2020.12.004>

Pauer, G., & Török, Á. (2022). Introducing a novel safety assessment method through the example of a reduced complexity binary integer autonomous transport model. *Reliability Engineering & System Safety*, 217, 108062. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108062>

Török, Á., Berta, T., & Pauer, G. (2018). A hazai infrastruktúra információs szempontból kritikus szakaszainak azonosítása statisztikai vizsgálatok alapján [Identification of information-

critical sections of the domestic infrastructure based on statistical studies]. VIII. Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, Magyarország, 2018.03.22-2018.03.23.

Török, Á., Pauer, G., & Berta, T. (2017a). Identification of Critical Infrastructure Sections Related to the Role of Information System. MOSATT 2017 Modern Safety Technologies in Transportation: Proceedings of the International Scientific Conference, Herlány, Szlovákia. pp. 184-190. ISBN 978-80-553-2864-5

Török, Á., Pauer, G., & Berta, T. (2017b). Analysing The Impact of Road Information System on Traffic Safety. *Procedia Engineering*, 187, 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.445>

Török, Á., & Pauer, G. (2016). Intelligens közlekedési rendszerek közlekedésbiztonsági rangsorolása [Road safety ranking of Intelligent Transport Systems]. *Statisztikai Szemle*, 94(4), 418-434. <https://doi.org/10.20311/stat2016.04.hu0418>

Török, Á., & Pauer, G. (2017). Assessment of the Current Status of Intelligent Transport Systems Serving the Improvement of Road Safety in Hungary. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 45(2), 77-83. <https://doi.org/10.3311/pptr.9279>

Török, Á., & Pauer, G. (2018). Optimization of Linear Traffic Distribution Problem in terms of the Road Toll Structure Assuming an Autonomous Transportation System. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 8(1), 112-124. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2018.8\(1\).08](https://doi.org/10.7708/ijtte.2018.8(1).08)

- Amer, N. H., Zamzuri, H., Hudha, K., & Kadir, Z. A. (2017). Modelling and Control Strategies in Path Tracking Control for Autonomous Ground Vehicles: A Review of State of the Art and Challenges. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 86(2), 225–254. <https://doi.org/10.1007/s10846-016-0442-0>
- Barna, S., & Schuchmann, G. (2017). Szintbeni közúti csomópontok teljesítőképessége – Jelzőlámpával irányított körforgalmú csomópontok alkalmazhatósága [The performance of road level junctions – The applicability of roundabout nodes with traffic lights]. *Közlekedéstudományi Szemle*, 67(6), 30–37. <https://doi.org/10.24228/ktsz.2017.6.3>
- Becker, F., & Axhausen, K. W. (2017). Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles. *Transportation*, 44(6), 1293–1306. <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9808-9>
- Bimbraw, K. (2015). Autonomous Cars: Past, Present and Future - A Review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology. *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Colmar, Franciaország. pp. 191-198. <https://doi.org/10.5220/0005540501910198>
- Claybrook, J., & Kildare, S. (2018). Autonomous vehicles: No driver. . .no regulation? *Science*, 361(6397), 36–37. <https://doi.org/10.1126/science.aau2715>
- Cui, J., Liew, L. S., Sabaliauskaite, G., & Zhou, F. (2019). A review on safety failures, security attacks, and available countermeasures for autonomous vehicles. *Ad Hoc Networks*, 90, 101823. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.12.006>
- Domínguez, J. M. L., & Sanguino, T. J. M. (2019). Review on V2X, I2X, and P2X Communications and Their Applications: A Comprehensive Analysis over Time. *Sensors*, 19(12), 2756. <https://doi.org/10.3390/s19122756>
- Elfes, A. (1989). Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation. *Computer*, 22(6), 46–57. <https://doi.org/10.1109/2.30720>

- Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
- Golbabaeei, F., Yigitcanlar, T., Paz, A., & Bunker, J. (2020). Individual Predictors of Autonomous Vehicle Public Acceptance and Intention to Use: A Systematic Review of the Literature. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040106>
- Hevelke, A., & Nida-Rümelin, J. (2015). Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. *Science and Engineering Ethics*, 21(3), 619–630. <https://doi.org/10.1007/s11948-014-9565-5>
- Horváth, M. T., Tettamanti, T., & Varga, I. (2018). Az autonóm járműforgalom modellezhetősége mikroszkopikus forgalomszimulációs szoftverben [Modelling of autonomous vehicle traffic in a microscopic traffic simulation software]. *Közlekedéstudományi Szemle*, 68(2), 34-44. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.2.3>
- Hult, R., Campos, G. R., Steinmetz, E., Hammarstrand, L., Falcone, P., & Wymeersch, H. (2016). Coordination of Cooperative Autonomous Vehicles: Toward safer and more efficient road transportation. *IEEE Signal Processing Magazine*, 33(6), 74–84. <https://doi.org/10.1109/msp.2016.2602005>
- Latham, A., & Nattrass, M. (2019). Autonomous vehicles, car-dominated environments, and cycling: Using an ethnography of infrastructure to reflect on the prospects of a new transportation technology. *Journal of Transport Geography*, 81, 102539. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102539>
- Litman, T. (2021, August 16). Autonomous Vehicle Implementation Predictions - Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org/avip.pdf>
- Mallozzi, P., Pelliccione, P., Knauss, A., Berger, C., & Mohammadiha, N. (2019). Autonomous Vehicles: State of the Art, Future Trends, and Challenges. *Automotive Systems and Software Engineering*, 347–367. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12157-0_16
- Narayanan, S., Chaniotakis, E., & Antoniou, C. (2020). Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111, 255–293. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.12.008>

- Tettamanti, T., & Varga, I. (2019). Az autonóm járművek forgalmi hatásai: a jármű-és forgalomirányítás kihívásai [The effect of autonomous vehicles: new challenges of vehicle and traffic control]. *Közlekedéstudományi Szemle*, 69(1), 35-41. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2019.1.4>
- Tettamanti, T., Varga, I., & Szalay, Z. (2016). Impacts of autonomous cars from a traffic engineering perspective. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 44(4), 244-250. <https://doi.org/10.3311/PPtr.9464>
- Xu, D., Shi, Y., & Ji, Z. (2017). Model-Free Adaptive Discrete-Time Integral Sliding-Mode-Constrained-Control for Autonomous 4WMV Parking Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 834–843. <https://doi.org/10.1109/tie.2017.2739680>
- Yuen, K. F., Wong, Y. D., Ma, F., & Wang, X. (2020). The determinants of public acceptance of autonomous vehicles: An innovation diffusion perspective. *Journal of Cleaner Production*, 270, 121904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121904>
- Zhu, F., & Ukkusuri, S. V. (2015). A linear programming formulation for autonomous intersection control within a dynamic traffic assignment and connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 55, 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.01.006>