

**AZ AUTONÓM JÁRMŰFORGALOM
MODELLEZHETŐSÉGE MIKROSZKOPIKUS
FORGALOMSZIMULÁCIÓS SZOFTVERBEN**
HORVÁTH MÁRTON TAMÁS, DR.
TETTAMANTI TAMÁS, DR. VARGA ISTVÁN

ABSZTRAKT

A közúti közlekedés jelentős változáson megy keresztül az informatika és az infokommunikációs technológia legkorszerűbb alkalmazásainak köszönhetően, amelyek mind a járművek mind az infrastruktúra szintjén jelentkeznek. A rendszer automatizáltsága egyre magasabb fokú, a trendek egyértelműen abba az irányba mutatnak, hogy a közlekedés a jövőben autonóm járművekkel fog megvalósulni. Kutatásunk során a járművezetési modellek autonóm járműveket mintázó áthangolásával végeztünk szimulációkat egy teszt autópályarészen a közlekedésmérnöki gyakorlatban használt VISSIM mikroszkopikus forgalomszimulációs szoftverrel. Cikkünk fő céljai: a járművezetési modell adaptálása autonóm járműforgalomhoz, a modellparaméterek érzékenységvizsgálata, valamint a fundamentális diagram megváltozásának elemzése.

1 BEVEZETŐ

Az utóbbi években egyre több gyártó kezdte el tesztelni autonóm járműveit valós közúti körülmények között. Ezek a járművek néhány éven (de legfeljebb egy-két évtizeden) belül ténylegesen megvásárolhatóvá válnak magánszemélyek számára is, így egyre nagyobb arányban lesznek jelen a forgalomban. Szintén nem elhanyagolható az a már jelenleg is megfigyelhető trend, hogy a közúton közlekedő járművek egyre nagyobb hányadán számos olyan vezetéstámogató rendszert alkalmaznak, amely adott helyzetekben a vezető szándékának megfelelően segít az irányításban vagy vészhelyzetbe akár át is veszi azt.

Az egyes járművek automatizáltságának növekedése kihatással van a forgalom lefolyására is: a járművek az infrastruktúrával, illetve egymással is képesek lesznek kommunikálni, több információval rendelkeznek majd, pontosabbá válik az adott sebesség tartása, lecsökken a követési távolság, stb. A valós forgalomban bekövetkező változásokat a kezdeti szakaszban virtuálisan – és egyben a legköltséghatékonyabb módon –

szimulációkkal lehet szemléltetni. A forgalomszimulációs szoftveren keresztül lehetőség nyílik arra, hogy megalapozott becslést adjunk az automatizált, illetve autonóm járművek forgalomra gyakorolt hatásáról. A cikkünkben egy ilyen analízis eredményeit ismertetjük. A vizsgálatot a Magyarországon is - tervezői és kutatói körökben egyaránt - dominánsan elterjedt forgalomszimulációs szoftverrel, a PTV VISSIM-mel végeztük el.

A cikk felépítése a következő: a 2. fejezetben a közúti járművek automatizáltsági szintjeit, a 3. fejezetben az autonóm járművek szimulációs lehetőségeit szemléltetjük. A 4. és 5. fejezetben a szimulációs hálózatot, valamint a járművezetési paraméterek módosítását mutatjuk be. A 6. és 7. fejezetekben a paraméterek egyenkénti, illetve együttes változtatásának hatásait ismertetjük. Majd a 8. fejezetben ezzel összefüggésben szemléltetjük a makroszkopikus forgalmi modell (fundamentális diagram) változását, végül a 9. fejezetben összefoglaljuk az eredményeket.

**2 A KÖZÚTI JÁRMŰ
AUTOMATIZÁLTSÁGÁNAK SZINTJEI**

Az autonóm jármű alapvető definíciója tekintetében azt mondhatjuk, hogy azokat a közúti gépkocsikat, amelyek képesek a környezetük fejlett érzékelésére, valamint humán vezető nélküli, szabályozott haladásra, autonóm közúti járműnek hívhatjuk (ezen autókat gyakran vezetőnélkülinek, önvezetőnek, vagy robotjárműnek is nevezik). Fontos azonban tisztázni, hogy a teljesen autonóm – vagyis önvezető – autó az automatizálási lehetőségek csúcsa, hiszen már a mai járművekben is számtalan automatikus eszköz (HW/SW) van jelen. A tisztánlátás végett tehát érdemes áttekinteni a SAE (Society of Automotive Engineers) International szervezet 2014-ben publikált jelentését, amely gyakorlatilag egy szabvány formájában definiálta az autonóm gépjárművek terminológiáját, ill. megfogalmazta azok szintjeit az automatizáltság tekintetében [1]. Az 1. táblázat ezeket a szinteket mutatja be. A táblázatban az „automata rendszer” kifejezés a gépjárművezetés-támogató rendszerre, azok kombinációjára, vagy az automata járművezető rendszerre utal.

Szint	SAE szint	Definíció	Kormányzás, gyorsítás/lassítás	Vezetési környezet figyelése	A dinamikus vezetési műveletek átvétele az automatikus rendszerek teljesítményének visszaesése esetén	Az automata rendszer alkalmassága
0	Nincs automatizáltság	A humán járművezető végez minden vezetési műveletet folyamatosan. A jármű teljes mértékben emberi irányítás alatt áll.	Humán járművezető	Humán járművezető	-	-
1	Gépjárművezetés támogatása	A gépjárművezetés-támogató rendszer a kormányzási vagy a fékezés/gyorsítási műveletet átveheti, ill. segítheti a biztonságosabb működtetést.	Humán járművezető és automata rendszer	Humán járművezető	Humán járművezető	Egyes működési körülmények között

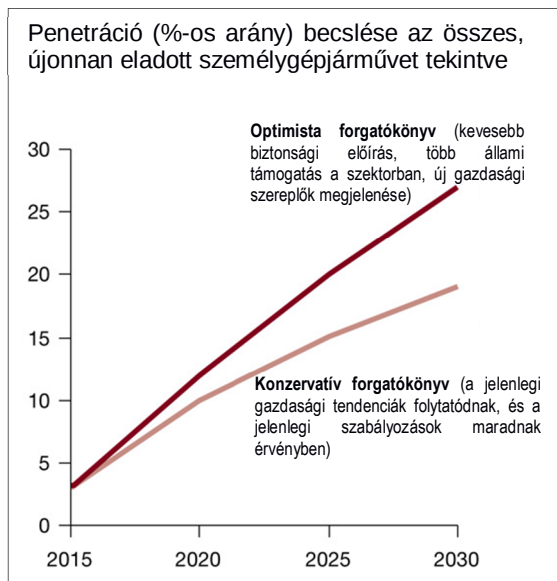
Szint	SAE szint	Definíció	Kormányzás, gyorsítás/lassítás	Vezetési környezet figyelése	A dinamikus vezetési műveletek átvétele az automatikus rendszerek teljesítményének visszaesése esetén	Az automata rendszer alkalmazása
		Mindemellett a jármű teljes mértékben emberi irányítás alatt áll.				
2	Részleges automatizáltság	A gépjárművezetés-támogató rendszer vagy rendszerek a kormányzási és a fékezési/gyorsítási műveleteket egyszerre átvehetik, ill. segíthetik a biztonságosabb működtetést. Mindemellett a jármű teljes mértékben emberi irányítás alatt áll.	Humán járművezető és automata rendszer	Humán járművezető	Humán járművezető	Egyes működési körülmények között
3	Feltételes automatizáltság	Az automata járművezető-rendszer irányítja az összes dinamikus vezetési műveletet feltételezve, hogy szükség esetén a humán járművezető megfelelően reagál egy beavatkozási kérésre vagy át tudja venni a vezetési műveleteket.	Automata rendszer	Automata rendszer	Humán járművezető	Egyes működési körülmények között
4	Magas szintű automatizáltság	Az automata járművezető-rendszer irányítja az összes dinamikus vezetési műveletet, még akkor is, ha a humán járművezető nem megfelelően reagál egy beavatkozási kérésre.	Automata rendszer	Automata rendszer	Automata rendszer	Egyes működési körülmények között
5	Teljes automatizáltság	Az automata járművezető-rendszer irányít minden dinamikus vezetési műveletet folyamatosan. Minden - a humán járművezető által is kezelhető - út-, ill. környezeti körülményt képes kezelni. A jármű ember nélkül is közlekedhet.	Automata rendszer	Automata rendszer	Automata rendszer	Minden működési körülmény között

1. táblázat: Az autonóm gépjárművek SAE (Society of Automotive Engineers) által megfogalmazott szintjei (forrás: [1])

Az 1. táblázat értelmezéséhez a SAE a következőket fogalmazta meg: „Ezek a szintek inkább irányadóak és technikai jellegűek, mint jogi definíciók. Nem utalnak a piaci bevezetés sorrendjére. Az egyes szinteken a minimális és nem a maximális rendszerképességek vannak definiálva. Egy adott gépjármű több automatikus vezetési tulajdonsággal rendelkezhet, ezáltal különböző szinteken üzemelhet attól függően, hogy mely képességeit alkalmazzuk.” [1]

A definiált szintek alapvetően azt mutatják meg, hogy a dinamikus vezetési műveletek hogyan oszlanak meg az ember és a gép között a 0. (nincs automatizáltság) szinttől az 5. (teljesen automata rendszer) szintig. A teljes automatizáltságig két evolúciós út lehetséges: a „valami mindenhol” és a „minden valahol” koncepciók [2]. Az első variációban az automatikus vezetési rendszerek fokozatosan fejlődve kerülnek beépítésre a hagyományos gépkocsikba, követve az 1. táblázat szerinti lépcsőket a 0. szinttől az 5. szintig. Ezen a fejlődési úton a járművezetők egyre több dinamikus vezetési műveletet engednek át az automata

rendszereknek. A másik - „minden valahol” - variáció szerint viszont a legmagasabb szintű automatizáltságú gépjárművek egyből „bevezethetők” és közlekedtetetők járművezető nélküli üzemmódban is a hagyományos autók mellett egészen addig, míg ki nem szorítják a régi, ill. részlegesen automatizált járműveket.



1. ábra: A részlegesen vagy teljesen automatizált személygépkocsik arányának változási trendje az IHS nemzetközi piackutató cég becslése alapján [3]

Az IHS nemzetközi piackutató szerint akár már 2025-re az összes újonnan eladott személygépjármű 20%-a részlegesen vagy teljesen automatizált lesz (lásd 1. ábra). Ugyanakkor még a kevésbé optimista forgatókönyv alapján is 2030-ig ez a szám 18% lesz. Ez pedig csupán 15 éven belül várható, ami a technológiai változás mértékét tekintve nagyon rövid idő.

3 AZ AUTONÓM JÁRMŰVEK SZIMULÁCIÓJÁNAK LEHETŐSÉGE VISSIM SZOFTVERREL

A feladatunk alapgondolatát az adta, hogy a mikroszkopikus forgalomszimulátorok gyakorlatilag önmagukban is már autonóm járműveket képeznek virtuálisan. Jóllehet e szoftvereket alapvetően a klasszikus humán vezetőségű járművek szimulálására hozták létre, a szimuláció miatt gépi járműkövetési modellt alkalmaznak, amelyek a környezetüket és a többi járművet figyelve automatikus módon hoznak döntéseket. Ez pedig lényegében véve már autonóm járművezetést jelent. Ennek megfelelően a PTV VISSIM alkalmas arra, hogy akár autógyártók is virtuálisan kiértékeljék az autonóm (vagy

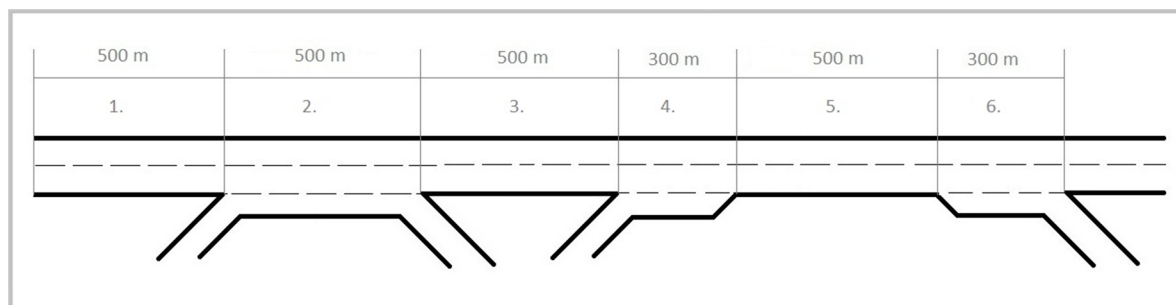
vezetéstámogató rendszerekkel felszerelt) járművek hatását a valós világ közlekedésére, túllépve az egyéni járművek szintjén [4]. A cikk írása idején a VISSIM-ben nem elérhető, dedikált autonóm járművekkel kapcsolatos modul, az automatizált járművek viselkedését egyszerűen a beépített Wiedemann-féle járművezetési modell vezetési paramétereinek megfelelő beállításával lehet elérni. A VISSIM két fő járművezetési modellt tartalmaz: a Wiedemann 74 és 99 jelzésűeket. Az autópályás forgalom leírására kifejlesztett Wiedemann 99 modell lényegesen nagyobb mértékben hangolható, mint az elsősorban városi környezet modellezéséhez javasolt Wiedemann 74 modell, amely egyébként a 99-es modell alapját is adja. Autonóm, illetve automatizált járművek VISSIM-ben történő vizsgálatára a szakirodalomban kevés példát találni, azokban is főleg a 99-es modell hangolására találhatunk példákat [5], [6], [7]. A feladat megvalósítása során Aria et al. [5] munkáját tekintettük kiindulási alpnak, és az abban használt hangolt járműmodell alapján végeztünk vizsgálatokat az autonóm járművek VISSIM-es szimulálhatóságára vonatkozóan.

A szimulációs analízist a VISSIM 8-as verziójában készítettük el.

Kutatásunk során az autonóm járművek 100%-os penetrációját feltételezve végeztünk vizsgálatokat a forgalmi lefolyásban várható változások megismerése céljából. Természetesen még köztes fázisokon is át kell esnie a közlekedés fejlődésének, amikor vegyesen lesznek jelen az utakon a különböző automatizáltsági szintű járművek. Ennek vizsgálata azonban nem tárgya jelen cikkünknek.

4 A SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLAT

A szimulációkhoz egy 2,7 kilométeres autópályarészt használtunk, amelyen 500-1000 méter között egy közös kiválási és becsatlakozási szakasz, 1500-1800 méter között egy önálló becsatlakozási, 2300-2600 méter között pedig egy önálló kihajtási lehetőség adott. Az autópálya alapvetően 2 sávós, azonban a becsatlakozási, illetve a kiválási szakaszokon 3 sávós. A sebességkorlátozás a főpályán 130 km/h, a le- és felhajtó ágakban 60 km/h. Az útszakaszokat a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A szimulált autópályarész

A szimulációkat a valós forgalmi körülmények között kialakuló kapacitásmaximumhoz közeli értékekkel végeztük el - [8] megállapításait követve. Így a főpályán 4400 egységjármű/óra forgalom lépett be, ehhez csatlakozott a felhajtó ágakban 400 egységjármű/óra. A kihajtóknál a főpályán haladók és a kihajtók aránya 10 az 1-hez volt. Ezzel az 5. szakaszon közel a Highway Capacity Manual [9] szerinti 2400 egységjármű/óra/sáv forgalomnagyság-maximum alakult ki. A szimulációkat autonóm, illetve hagyományos egységjárművekkel végeztük el, így azokban csak személygépjárművek szerepeltek.

5 A VISSIM JÁRMŰKÖVETÉSI MODELL ADAPTÁLÁSA AZ AUTONÓM JÁRMŰFORGALOMHOZ

Az autonóm járművek modellparamétereit a VISSIM járműkövetési modelljének áthangolásával állítottuk elő nagy részben alapozva Aria et al. [5] által a témában végzett átfogó kutatási munkára, illetve a szenzorok teljesítőképességére. A 2. táblázatban a paraméterek áthangolását mutatjuk be, az utolsó oszlopban feltüntetjük, hogy az új értékeket milyen forrásra alapozva, milyen indokkal vettük át. A táblázatban a járművezetési modellparamétereknek külön kódot is adtunk az egyszerűség kedvéért. A következő fejezetekben ezen kódokra hivatkozunk.

VISSIM járművezetési modellparaméter [kód] (magyar jelentés)	Alapértelmezett („default”) érték	Módosított érték	Indoklás, forrás
maximum look ahead distance [P1a] (maximális előrettekintési távolság)	250 m	200 m	A közúti járművekben alkalmazott radarok hatótávolsága kb. 200 m [10], [11].
maximum look back distance [P1b] (maximális hátratekintési távolság)	150 m	200 m	
minimum look ahead distance [P2a] (minimális előrettekintési távolság)	0 m	150 m	A járművezető-asszisztens szenzorok hatótávolságára alapozva [5].
minimum look back distance [P2b] (minimális hátratekintési távolság)	0 m	150 m	
number of observed vehicles [P3] (megfigyelt járművek száma)	2	7	A radarok hatótávolságából és a zavartalan forgalomáramlási sebességéből levezetve [5]. (A járművek közötti kommunikációt is feltételezve.)
headway time (CC1) [P4] (követési időköz)	0,9 s	0,3 s	[12] alapján
sebességeloszlás [P5]	130 km/h-nál: 80-170 km/h 60 km/h-nál: 58-68 km/h	130km/h-nál: 128-132 km/h 60 km/h-nál: 58-62 km/h	Autonóm, illetve automatizált járműveknél a sebesség tartása sokkal nagyobb pontossággal valósul meg, mint humán sofőr esetén [5]. (A sebességtartó automatika már ma is egészen elterjedt az új autók körében, azonban ezzel a VISSIM alapbeállításként nem számol. Megjegyzendő továbbá, hogy hagyományos, illetve autonóm egységjárművekkel számolunk, így személyautókra vonatkozó értékeket veszünk csak figyelembe.)
advanced merging [P6] (sávváltás a következő kanyarodás iránya szerint)	inaktív	aktív	Az autonóm, illetve automatizált járművek a követendő útvonallal pontosan tisztában vannak, így az opciót aktiváltuk [5] alapján. Megjegyzés: kézenfekvő lehet a csatlakozó útszakaszokon a „lane change ...m before” (sávváltás a csomópont előtt ... méterrel) érték megváltoztatása is, azonban a mai magyar mérnöki gyakorlatban ezt az opciót a tervezők humán sofőrös járművek szimulációja esetén is gyakran módosítják, így a különbség az autonóm járművekhez képest elveszik.
cooperative lane change - maximum speed difference [P7a] (kooperatív sávváltás - maximális sebességkülönbség)	inaktív	aktív, 3 km/h	A V2V kommunikáció elterjedésével a járműveknek lehetőségük lesz együttműködni a szomszédos járművekkel annak érdekében, hogy egymás sávváltási, illetve egyéb manővereit hatékonyabban segítsék, mint az a humán sofőrök esetében tapasztalható [13].
cooperative lane change - maximum collision time [P7b] (kooperatív sávváltás - maximális sávváltási idő)	inaktív	aktív, 10 s	

2. táblázat: A módosított járművezetési paraméterek

6 MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A méréseket feltöltött teszthálózaton végeztük, a hálózat feltöltődési ideje 120 másodperc volt. A szimulációs futtatásokat a 120-600 másodperc

közötti időintervallumra vonatkozóan értékeltük ki 30 különböző „random seed” (ez a paraméter felel a bemenő járműforgalom időbeli érkezésének véletlenszerűségért) értékeket alkalmazva, így a VISSIM futtatási logikájából előálló véletlenszerűségek kiküszöbölhetők. A hat darab szakaszon (lásd 2. ábra) megvizsgáltuk a járművek átlagsebességét, valamint a forgalomsűrűség és a relatív késés alakulását. Utóbbi értéke az átlagos

késési idő (a kívánt sebesség melletti eljutási időhöz képesti többlet idő) és az átlagos eljutási idő hányadosa. Az összesített mérési eredmények az alábbi táblázatokban láthatók, az elsőben a 30 mérés során mért átlagok, a másodikban a szórások.

Szakasz	Alapértelmezett („default”) paraméterek – átlag			Módosított (autonóm) paraméterek - átlag		
	Forgalom-sűrűség (j/m/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)	Forgalom-sűrűség (j/m/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
1.	41	107	13.10%	33.7	129.5	0.05%
2.	47	101	16.37%	38.7	122.8	2.99%
3.	42	104	15.82%	33.9	127.6	1.38%
4.	51	94	23.71%	36.8	128.8	0.26%
5.	50	94	23.57%	36.7	128.9	0.32%
6.	46	103	16.58%	39.5	128.1	2.23%

3. táblázat: A mérési eredmények (30 mérés átlaga)

Szakasz	Alapértelmezett („default”) paraméterek - szórás			Módosított (autonóm) paraméterek - szórás		
	Forgalom-sűrűség (j/m/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)	Forgalom-sűrűség (j/m/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
1.	2.33	2.54	0.02	1.42	0.06	0.00
2.	6.52	8.39	0.07	2.34	4.46	0.03
3.	2.70	2.98	0.02	1.94	2.43	0.02
4.	8.97	10.35	0.08	1.75	0.19	0.00
5.	4.42	4.84	0.04	1.67	0.88	0.01
6.	3.04	5.18	0.04	4.47	10.93	0.08

4. táblázat: A mérési eredmények szórása

Az alap paraméterek futtatási eredményei alapján látható, hogy a 4. és az 5. szakaszon – tehát a második felhajtó ponton, illetve azt követően, ahol a forgalom nagysága a kapacitásmaximumot eléri – az átlagsebesség érezhetően elmaradt a többi szakasztól, ezzel párhuzamosan a forgalomsűrűség és a relatív késés megnőtt. Tehát a felhajtón beérkező járművek nem tudtak problémamentesen becsatlakozni a főpálya áramlatába.

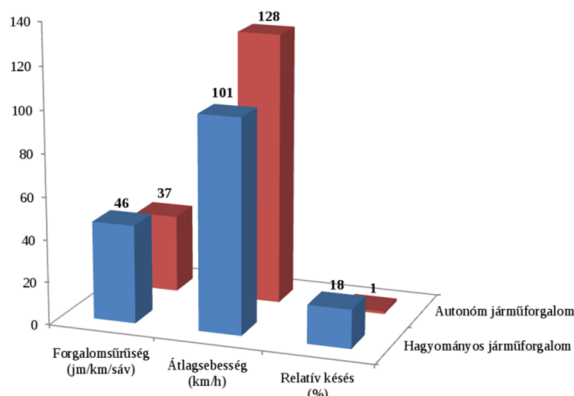
Az autonóm, illetve automatizált járműveket szimbolizáló paraméterekkel az átlagsebesség az összes szakaszon lényegesen megnőtt. Ennek oka, hogy az úthálózat telített volt, így a teljes áramlat haladását a leglassabbak sebessége határozta meg. Így az autonóm járműforgalom átlagsebessége sokkal magasabb lett a 130 ± 2 km/h érték alkalmazása miatt, összevetve az alapparaméteres beállítás szerinti 80 – 170 km/h-ás esettel. Külön kiemelésre érdemes a 4. és 5. szakasz, itt a hagyományos (járművezetős) esettel ellentétben a járművek sebessége a főpályához képest nem esett vissza, mert a főpályára való becsatlakozás

akadályozás nélkül megvalósult. Ennek feltételezett oka, hogy a járművek sokkal teljesebb képpel rendelkeztek a környező járművekről, így egymást segíteni tudták. A szimulációs vizsgálatokat egységjárművekkel végeztük, melyekre egységesen 130 km/h sebességkorlátozást vettünk alapul. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy az autonóm járművek megjelenésével előfordulhat, hogy a KRESZ is a későbbiekben változik, így az egyes járműkategóriákra nem feltétlenül a jelenlegi sebességi előírások fognak majd vonatkozni, a tehergépjárművek és személygépjárművek közti különbség változhat.

A szórásérték eredmények a 6. szakasz kivételével az előzetes mérési becsléseket támasztják alá. Az értékek mindenhol alacsonyabbak az autonóm járműves esetben, összehasonlítva az alap paraméteres változattal. Egy-egy változaton belül pedig azokon a szakaszokon tapasztalhatók nagyobb szórások, ahol a járműveknek be kellett csatlakozniuk a főáramlatba.

Összességében kijelenthető, hogy az autonóm, illetve automatizált járműveket reprezentáló paraméterek mellett a forgalom lefolyása szabályosabb lett. Az átlagsebesség megnőtt, a relatív késés lecsökkent. Emellett a forgalomsűrűség is csökkent. A szakaszok értékeit kiábrázolva mutatja a 3. ábra.

A szakaszok egyenkénti eredményeivel kapcsolatban megjegyzendő, hogy a VISSIM szakaszonként (lásd: 2. ábra) alkalmazza a fundamentális összefüggést (a forgalom nagyság (Q) egyenlő a forgalomsűrűség (ρ) és a térbeli átlagsebesség (V) szorzatával: $Q(\rho) = \rho \cdot V$). Az összefüggést adó három fő makroszkopikus paraméter közül a VISSIM csak a forgalom nagyságát és a térbeli átlagsebesség értékeit méri, a forgalomsűrűséget pedig ezek alapján számolja. Tekintve, hogy a szimulációk között a forgalom nagyság nem változott, a sebesség növekedésének így egyenes következménye a forgalomsűrűség csökkenése.



3. ábra: Az átlagos forgalomtechnikai paraméterek értékei a teljes hálózatra átlagolva

7 A MODELLPARAMÉTEREK ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA

Szakasz	P1 (maximális előre- és hátratekintési távolságok) változtatásának hatása			P2 (minimális előre- és hátratekintési távolságok) változtatásának hatása		
	Forgalomsűrűség (jm/km/sáv)	Átlagsebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)	Forgalomsűrűség (jm/km/sáv)	Átlagsebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
1.	-15.23	21.97	-17.53%	-14.83	21.01	-16.76%
2.	1.25	-1.14	-0.17%	0.41	0.62	-1.65%
3.	0.85	-4.09	3.18%	-0.84	-0.47	0.19%
4.	7.30	-5.86	4.61%	11.88	-13.29	10.60%
5.	12.26	-21.64	18.96%	7.73	-14.97	13.52%
6.	-2.70	3.58	-3.00%	2.72	-3.57	2.88%

5. táblázat: P1 (maximális előre- és hátratekintési távolságok) és P2 (minimális előre- és hátratekintési távolságok) változtatásának hatása a 2. táblázat alapértelmezett és módosított értékei alapján

P3 (figyelembe vett járművek száma) változtatásának hatása	P4 (követési időköz) változtatásának hatása
--	---

Az eddig ismertetett vizsgálataink arra vonatkoztak, hogy az alap verzióhoz képest az összes paraméter egyidejű megváltoztatásával milyen változás érhető el. A következőkben azt mutatjuk be, hogy milyen hatást eredményezett, ha az alap verzióhoz képest egyszerre csak egy paraméter hatását változtattuk meg. Az alábbi táblázatokban az látható, hogy milyen mértékben változtak a forgalmi változók értékei az egyes szakaszokon az alap verzió értékeihez képest. Az adott paraméter önálló változtatása abban az esetben volt sikeres, ha az átlagsebesség nőtt, míg a relatív késés csökkent. A P1-P7 paraméterváltoztatások a 2. táblázatban megadottak szerint történtek, az eredeti változatban az adott paraméter alapértelmezett értékével, a módosított verzióban az autonóm járműveket reprezentáló paraméterértékkel történt a szimulációk futtatása.

Az 5. táblázatból látható, hogy maximális és minimális előre- illetve hátratekintési távolságok (minimum és maximum look ahead és look back distance) önmagukban történő – autonóm járműveket imitáló – változtatása (a második táblázatban megadottak szerint) a szakaszok többségében kifejezetten hátrányos, a késések nőttek, az átlagsebesség csökkent. Ezen paraméterek (P1a, P1b és P2a, P2b) változtatásának hatása csak két-két szakaszon volt egyértelműen pozitív. Megjegyzendő, hogy a maximum look-ahead distance értéke az autonóm járműves esetben kisebb, mint a hagyományos járművek esetén.

A mérnöki becslésekkel ellentétben, hogy a figyelembe vett járművek számának (number of observed vehicles) (P3) növekedésével a forgalom lefolyásának jellemzői egy kivétellel minden szakaszon romlottak. Ezzel szemben a követési időköz (headway time) (P4) csökkentése egyértelműen pozitív hatást eredményezett, az összes vizsgált szakaszon javultak a forgalmi mutatók.

Szakasz	Forgalom-sűrűség (jm/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)	Forgalom-sűrűség (jm/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
1.	-14.83	21.01	-16.76%	-19.13	32.07	-25.70%
2.	2.46	-3.60	1.83%	-0.98	4.08	-4.49%
3.	-0.89	-0.53	0.22%	-3.11	5.10	-4.32%
4.	13.72	-16.11	12.88%	1.22	5.71	-4.82%
5.	4.46	-10.19	9.56%	-2.16	4.21	-2.09%
6.	3.19	-4.75	3.78%	-8.78	17.92	-14.49%

6. táblázat: P3 (figyelembe vett járművek száma) és P4 (követési időköz) változtatásának hatása a 2. táblázat alapértelmezett és módosított értékei alapján

Szakasz	P5 (sebességeloszlás) változtatásának hatása			P6 (sávválasztás a következő kanyarodás iránya szerint) változtatásának hatása		
	Forgalom-sűrűség (jm/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)	Forgalom-sűrűség (jm/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
1.	-22.90	43.81	-30.88%	-14.93	21.25	-16.95%
2.	14.61	-22.48	20.10%	0.49	0.46	-1.52%
3.	-3.19	5.59	-0.68%	1.22	-5.09	3.95%
4.	-5.95	23.51	-14.81%	6.34	-4.03	3.09%
5.	-8.61	20.28	-10.50%	9.54	-17.65	15.72%
6.	-16.76	38.19	-26.17%	-6.38	11.95	-9.74%

7. táblázat: P5 (sebességeloszlás) és P6 (sávválasztás a következő kanyarodás iránya szerint) paraméterek változtatásának hatása a 2. táblázat alapértelmezett és módosított értékei alapján

A sebességeloszlások (P5) egyenletesebbé tételével a forgalom lefolyása a 2. szakasz kivételével mindenhol pozitívan változott. Ezen a szakaszon felhajtás és kihajtás is történt, ahol a járművek sebessége csak alig tért el egymástól, így a sávváltások igen nehézkesé váltak, ha egyéb, a kooperativitást segítő paramétereken nem módosítottunk. A mérnöki becsléseknek ellentmond, hogy az „előre gondolkodást” kifejezetten segítő „advanced merging” (sávválasztás a következő kanyarodás iránya szerint) opció (P6) aktiválása nem mindenhol befolyásolta pozitív irányban a forgalom lefolyását. A hátrányos hatás több esetben is olyan szakaszokon jelentkezett, ahol se felhajtás, se kihajtás nem volt lehetséges.

Szakasz	P7 (kooperatív sávváltás) változtatásának hatása		
	Forgalom-sűrűség (jm/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
1.	-14.93	21.25	-16.95%
2.	0.29	0.86	-1.84%

Szakasz	P7 (kooperatív sávváltás) változtatásának hatása		
	Forgalom-sűrűség (jm/km/sáv)	Átlag-sebesség (km/h)	Relatív késés (átlagos késési idő / átlagos eljutási idő)
3.	0.95	-4.48	3.46%
4.	6.54	-4.34	3.32%
5.	10.61	-19.37	17.10%
6.	-3.51	5.82	-4.78%

8. táblázat: P7 (kooperatív sávváltás) változtatásának hatása a 2. táblázat alapértelmezett és módosított értékei alapján

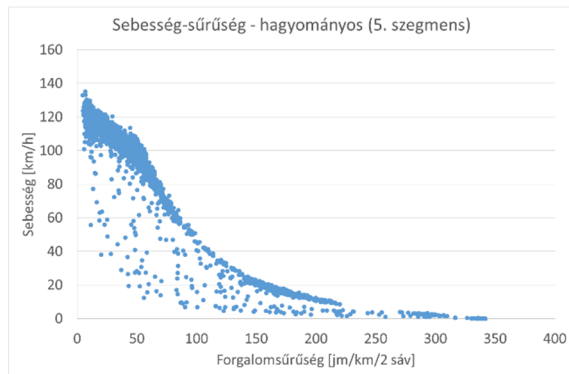
A kooperatív sávváltás (cooperative lane change) pozitív hatásai csak részben érvényesültek azokon a szakaszokon, ahol ki- vagy felhajtás lehetséges (lásd 8. táblázat). A 4. szakaszon, ahol felhajtás történt, elvárható lett volna a változás pozitív hatása, de ez mégsem történt meg. Összegzésként elmondható, hogy a paraméterek egyenkénti módosítása az 1., 2. és 6. szakaszokon szinte mindig előnyös hatást okoz. Az egyedi módosítások közül a leghatásosabb a követési

időköz csökkentése (P4), mely minden típusú szakaszon javulást eredményez. A sebességeloszlások egyenletesebbé tétele (P5) az esetek döntő többségében szintén hozzájárul a forgalom lefolyásának javulásához. A többi vizsgált paraméter egyenkénti változtatása esetén viszont nem tapasztalhattunk egyértelműen előnyös változást, sőt a figyelembe vett járművek számának (P3) önmagában történő növelése kifejezetten hátrányosnak tűnt.

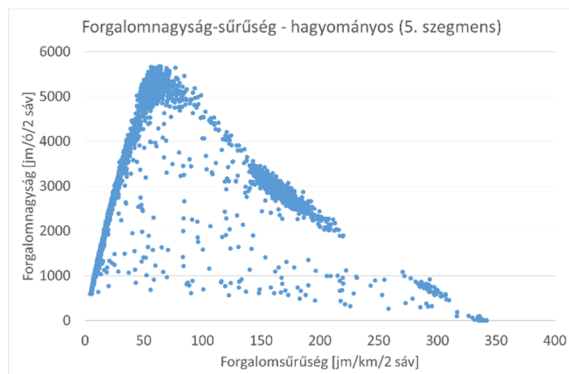
8 AZ AUTONÓM JÁRMŰFORGALOM HATÁSA A MAKROSZKOPIKUS FUNDAMENTÁLIS DIAGRAMRA

Ebben a fejezetben az autonóm járműforgalomra behangolt szimulációs környezetben végzett futtatások eredményeit mutatjuk be egyfajta kitekintésként. A közlekedéstudományban gyakorta alkalmazott fundamentális összefüggés [14] (amely a járműforgalom makroszkopikus dinamikáját írja le) jelentősen meg fog változni az autonóm járművek megjelenésével.

Fontos tapasztalat, hogy magának a VISSIM forgalomszimulációs szoftvernek az alapbeállítás szerinti járművezetési modellje sem tükrözi teljes mértékben a valós járművezetők viselkedését. A vizsgált, alapvetően 2 sávú útszakaszon a Highway Capacity Manual szerinti 4800 egységjármű/óra maximális forgalomnagyságot mintegy 15%-kal túllépi a hálózaton mért 5500 egységjármű/óra körüli érték. Azonban a fundamentális diagram alakja, illetve nevezetes pontjai tükrözik a valóságban tapasztaltakat (lásd 4. ábra és 5. ábra).



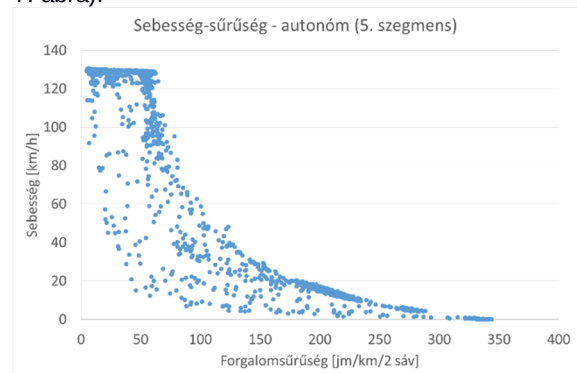
4. ábra Sebesség-sűrűség diagram (hagyományos)



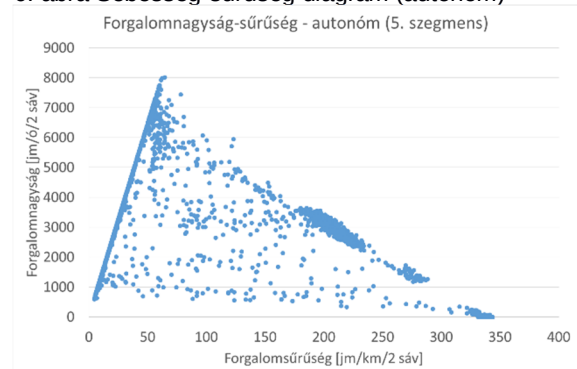
5. ábra Forgalomnagyság-sűrűség diagram (hagyományos)

Az autonóm járműves esetben a várakozásoknak megfelelően a hagyományos járművekhez képest több jármű, magasabb sebességgel tud közlekedni azonos forgalomsűrűség mellett. Jelentős változás következik be továbbá a diagramok alakjában is. A sebesség-sűrűség diagramon látható, hogy a 130 km/órás megengedett maximális sebességet a járművek sokkal nagyobb forgalomsűrűség mellett is képesek tartani, másképpen fogalmazva, alacsony forgalomsűrűség mellett a görbe vízszinteshez közeli szakasza annak eredménye, hogy a járművek gyorsabb haladásra is képesek lennének sebességhatárolás nélkül (lásd 6. ábra).

Ezzel összefüggésben a letörési pontig (kb. 60 jármű/km² sáv) a forgalomnagyság-sűrűség diagram pontjai közel egy egyenes mentén helyezkednek el, hiszen a fundamentális összefüggésben a sebesség ezen a szakaszon stabilan 130 km/h, így a forgalomnagyság változása ezen a szakaszon csak a forgalomsűrűség változásától függ. Magasabb forgalomsűrűségek esetén is közel egy egyenes mentén helyezkednek el a maximális forgalomnagyságok pontjai. Az autonóm esetben a forgalomnagyság-sűrűség diagramot lényegében két egyenes határolja (lásd 7. ábra).



6. ábra Sebesség-sűrűség diagram (autonóm)



7. ábra Forgalomnagyság-sűrűség diagram (autonóm)

9 ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkünkben az autonóm egységjárművek forgalomszimulációjának VISSIM-ben történő alkalmazhatóságát vizsgáltuk. A vizsgálataink alapján megállapítható, hogy szimulációs környezetben könnyen létre lehet hozni olyan járművezetési modellt, amely a jelenleg elérhető technológia alapján tükrözi az autonóm, illetve automatizált járművek jelenlegi szintjét. Cikkünkben

az autonóm egységjárművek 100%-os penetrációját hasonlítottuk össze a hagyományos járműforgalommal. Folytatólagos kutatásaink keretében az átmeneti fázis (vegyes forgalmi összetétellel akár a „valami mindenhol”, ill. a „minden valahol” elmélet szerint) szimulációs vizsgálatát tervezzük.

A feladat második részéből – az egyenkénti paramétermódosítások hatásának kiértékeléséből – látható, hogy kizárólag egy-egy paraméter önkényes változtatása az esetek jelentős részében nem hozott automatikus javulást a szimulált forgalom lefolyásában, sőt többször kifejezetten a várakozásokkal ellenkező eredményt kaptunk.

A közlekedést tervezőknek, ill. üzemeltetőknél fontos ésszben tartani, hogy az eddig használt klasszikus forgalommodellek hamarosan meg fognak változni. Ennek egyik látványos megjelenése a makroszkopikus fundamentális diagramban lesz kézzel fogható, amely alakja és kiterjedése is módosulni fog az autonóm járművek hatására.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki dr. Tóth Jánosnak, aki hasznos tanácsaival segítette a cikk megírását. A cikk a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült. A dolgozat elkészítésével kapcsolatos további köszönetnyilvánítás: EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00002: Autonóm járműrendszerek kutatása a zalaegerszegi autonóm tesztpályához kapcsolódóan - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SAE International: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems, SAE standard, nr. J3016_201401, 2014-01-16, http://standards.sae.org/j3016_201401
- [2] Automated and Autonomous Driving, Regulation under uncertainty, Corporate Partnership Board Report, OECD, International Transport Forum, 2015, www.internationaltransportforum.org
- [3] R. Viereckl, D. Ahlemann, A. Koster, S. Jursch: Connected Car Study 2015, Racing ahead with autonomous cars and digital innovation by Published: September 16, 2015, <http://www.strategyand.pwc.com/reports/connected-car-2015-study>
- [4] <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/use-cases/virtual-testing-of-autonomous-vehicles/>
- [5] E. Aria et al. Investigation of Automated Vehicle Effects on Driver's Behavior and Traffic Performance, Transportation Research Procedia, Volume 15, 2016, Pages 761–770
- [6] J. Bierstedt et al. Effects of Next-Generation Vehixles on Travel Demand and Highway Capacity, FP Think, January 2014
- [7] F. Bohm and K. Häger. Introduction os Autonomous vehicles in the Swedish Traffic System – Effects and Changes Due to the New Self-Driving Car Technology, MSc thesis, Uppsala Universitet, June 2015
- [8] Fi I., Útszakaszok kapacitása, szolgáltatási szintek, 38. Útügyi napok, 2013. szeptember
- [9] Transportation Research Board (2010). Highway Capacity Manual, TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- [10] <http://www.slideshare.net/lhzan119/autonomou-s-cars-by-ihazn>
- [11] Laquai, F., Duschl, M., and Rigoll, G. (2011). Impact and Modeling of Driver Behavior Due to Cooperative Assistance Systems. Springer-Verlag, no. 6777, pp. 473-482.
- [12] Gouy, M., Wiedemann, K., Stevens, A., Brunett, G. and Reed, N. (2014). Driving next to automated vehicle platoons: How do short time headways influence non-platoon drivers' longitudinal control? Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, vol. 27, pp. 264-273.
- [13] Leyn, U. and Vortisch, P. (2014). Calibrating VISSIM for the German Highway Capacity Manual. Karlsruhe Institute of Technology: Institute for Transport Studies, pp. 1-11.
- [14] Luspay T., Tettamanti T., Varga I.: Forgalmirányítás, Közúti járműforgalom modellezése és irányítása, ISBN 978-963-279-665-9, Typotex Kiadó, Budapest, 2011