

# Tézisfüzet

## V2X kommunikáció alapú irányítások fejlesztése és vizsgálata mixed reality módszerekkel

*Szerző:*

**Ormándi Tamás**



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

*Témavezető:*

**Dr. Varga Balázs**

2025. szeptember 19.

# Bevezetés

A járműkommunikáció (V2X, Vehicle-to-Everything) korszaka jelentős változást hoz az intelligens közlekedési rendszerekben, lehetővé téve a valós idejű adatcserét a járművek, az infrastruktúra, a gyalogosok és a különböző hálózatok között. Az olyan vezeték nélküli technológiák fejlődésével, mint a rövidtávú kommunikáció (DSRC (Dedicated short-range communications)) [1] és a Mobil V2X (C-V2X (Cellular-V2X)) [2] a járművek képesek kommunikálni környezetükkel, ezáltal növelik a közlekedés biztonságát, csökkentik a torlódásokat és javítják a teljes közlekedés határfokát. Ezek az új kommunikációs technológiák számos új alkalmazásnak adnak lehetőséget. Ilyen alkalmazások lehetnek például a balesetek elkerülésére irányuló vezetéstámogató rendszerek, a jelzőlámpák optimalizálása, a járművek együttműködése a forgalomban, valamint az autonóm járművek navigációja is.

Az autonóm közúti csomópontok irányítása nagy szerepet tölt be napjaink kutatásaiban. Ezekben a kutatásokban olyan új autonóm kereszteződésirányítási algoritmusokat fejlesztenek és vizsgálnak, amelyek képesek lesznek a jövőben a járművek mozgásának koordinálására és optimalizálására, mindezt a V2X kommunikációra támaszkodva [3–5]. Ezeknek a kutatásoknak a túlnyomó része azonban figyelmen kívül hagyja a vezeték nélküli kommunikációs technológiából adódó olyan kihívásokat, mint a késleltetések, rádiós zavarások [6], az üzenetek ütközéséből vagy a kommunikáció tökéletlenségéből származó csomagvesztések [7], a jelerősséget befolyásoló tényezők [8], a kommunikációs csatorna túlterheltsége [9] és a különböző hardverek megbízhatósága. Ezeknek a tényezőknek a figyelmen kívül hagyása és azok kommunikáción alapuló algoritmusokra gyakorolt hatásának vizsgálata további kutatást igényel. A kommunikáció minőségének romlása közvetlen hatással van az irányítási algoritmusok teljesítményére és megbízhatóságára, hiszen ezen algoritmusok a kommunikáción keresztül érkező adatokra támaszkodnak valós időben. Az algoritmusok teljesítményének csökkenése amellet, hogy a kereszteződés átteresztőképességét csökkenti, balesetekhez is vezethet. A kereszteződésirányítási algoritmusokat két fő csoportba sorolhatjuk. Léteznek az úgynevezett központosított megoldások [10–12], amelyek teljes mértékben egy központi hardverre támaszkodnak (pl. RSU (Road-Side Unit) vagy felhőszolgáltatás), illetve a decentralizált (elosztott) megoldások [13–15], amely során az áthaladási sorrend meghatározásában több eszköz (pl. a járművekben található OBU-k (On-Board Unit)) egyszerre vesz részt. Mindkét megközelítésnek megvannak a

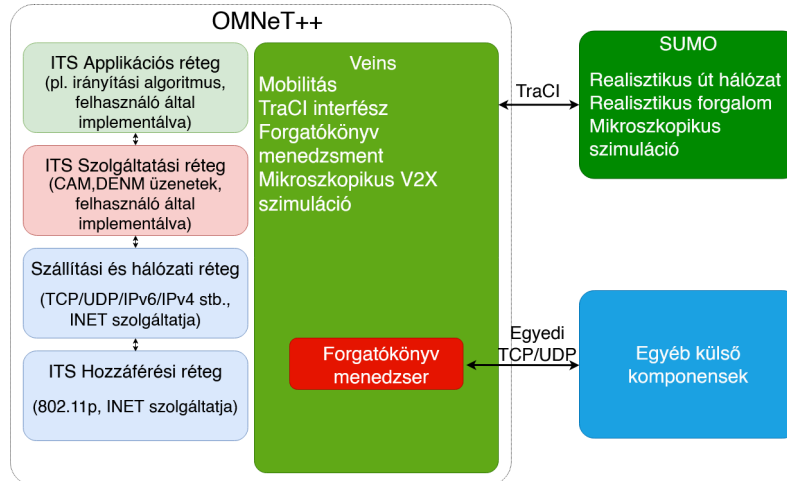
---

magya előnyei és hátrányai. A központosított megoldás során az RSU vagy egy központi szerver meghibásodása esetén a teljes rendszer működésképtelenné válhat, míg az elosztott megoldások esetén a járművek közvetlenül egymással kommunikálnak, így egy esetlegesen hibás kommunikációs eszköz esetében is tovább működhet a kereszteződés irányítása, hiszen a hibás járművön kívül a többi jármű továbbra is képes kommunikálni egymással. Ezeknek az algoritmusoknak a fejlesztése során elengedhetetlen a szigorú tesztelés és validáció, amely kihívásokat jelent, hiszen a kommunikáción alapuló megoldások komplexitása drágává és időigényessé teszi ezeket a folyamatokat. Tovább nehezíti a tesztelést, hogy a kommunikálni képes járművek száma jelenleg nagyon alacsony, így a jövőben felmerülő nagyszámú kommunikáló jármű komplex hatásait nagyon nehéz reprodukálni egy valós teszt során. A részletes tesztelés szükségességét tovább fokozza, hogy ezeknek a rendszereknek kiberbiztonsági szempontból is helyt kell állniuk, hiszen a vezeték nélküli kommunikáció új támadási felületet nyújt a potenciális támadók számára. Ahhoz, hogy a vezeték nélküli kommunikáción alapuló megoldások széleskörűen elfogadottak legyenek, az adatvédelem és a biztonság megőrzése elengedhetetlen.

A járművek valós idejű mozgását vezeték nélküli kommunikáción keresztül biztonságosan koordinálni képes központosított rendszerek eszközei, valamint azok telepítése költséges, így azokat általában csak a sűrű forgalmú, több sávós kereszteződések esetében érdemes megvalósítani. Ettől függetlenül, a kisebb, alacsony forgalmú kereszteződések esetében is szükség van olyan egyszerű, robusztus és biztonságos megoldásokra, ahol a központosított megoldás nem megvalósítható. Elosztott algoritmusok segítségével költség-hatékony módon valósítható meg a kereszteződések irányítása, hiszen ilyenkor kizárólag a járművekre támaszkodik a rendszer, így nem szükséges központosított hardverek telepítése. Az elosztott megoldások esetében a járművek közvetlenül kommunikálnak egymással, lehetővé téve számukra, hogy megosszák egymással a kereszteződésre, illetve a járművekre vonatkozó információkat és közös döntéseket hozzanak a megosztott információk alapján. Ez a megközelítés csökkenti a rendszer összetettségét az infrastruktúra szempontjából, miközben növeli a támadásokkal és zavarokkal szembeni ellenállását.

Habár számtalan szimulációs eszköz áll rendelkezésre a vezeték nélküli kommunikáció modellezésére, addig ezek a szimulátorok a mikroszkopikus (ágens alapú) megközelítésük miatt nagyon lassúak. A sűrű városi forgalom kommunikációjának szimulációja túlságosan is idő igényes és nem teszi lehetővé a V2X alkalmazások valós tesztelését. Az olyan tesztelési módszerek, mint a jármű a hurokban (VIL, Vehicle-In-the-Loop), illetve a kevert valóság-alapú tesztelés megkövetelnék a vezeték nélküli kommunikáció valós idejű szimulációját, amely a jelenlegi szimulációs megoldásokkal nem integrálható ezekben a rendszerekbe valós forgalmi körülmények között (pl. sűrű forgalom). Ahhoz, hogy a szimuláció nagy futási teljesítményt nyújtson úgy, hogy mellette a szimuláció nagy pontossága is megmaradjon, szükség van egy új V2X szimulációs módszerre, amely képes kiaknázi mind a mikroszkopikus (ágens alapú), mind a makroszkopikus (aggregált)

megközelítések előnyeit. Ebben a disszertációban egy nagypontosságú koszimulációs keretrendszer került felhasználásra a különböző algoritmusok fejlesztéséhez, vizsgálatához, valamint egy új teszt keretrendszer kifejlesztéséhez, amely kevert valóság alapon működik. A keretrendszer általános architektúráját az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. Koszimulációs rendszer architektúrája.

A keretrendszerben az OMNeT++ mint hálózat szimulátor van jelen, amely futtatja a Veins és INET keretrendszereket a különböző kommunikációs rétegek modellezésére, valamint a SUMO szimulátorral való szinkronizációhoz, amely valóság-hű forgalmat nyújt.

A valós idejű V2X szimuláció segítségével annak kevert valóság-alapú tesztrendszerbe integrálhatóságának lehetőségei is megnyílnak, melynek segítségével a valós járműves tesztelés V2X hardverek közreműködésével végezhető. Ennek köszönhetően a V2X kommunikáció alapú irányítási megoldásokat olyan valós körülmények között lehet tesztelni, amelyek a valós forgalom kommunikációs hatásait is figyelembe veszik. A rendszer segítségével a tesztelt jármű köré olyan rugalmas kevert (valós és virtuális) környezetet lehet alkotni, amely segít a kommunikáció alapú algoritmusok részletes tesztelésében és validálásában szélsőséges forgatókönyvek esetében is. A kontrollált környezetben a fizikai és virtuális elemek együttműködésével bármilyen szituáció reprodukálható, amely a valóságban is előfordulhat, így az algoritmusok teljesítménye a valóságban mérhető és kiértékelhető. A rendszer egy új V2X szimulációs megközelítés segítségével képes megvalósítani a nagyszámú kommunikációt a valós fizikai térben V2X hardveren keresztül, így realizálva a virtuális járművek kommunikációját a valós EGO (tesztelés alatt álló) járművek számára. Ez a módszer elősegíti a V2X kommunikáción alapuló irányítási algoritmusok kiértékelését, valamint értékes betekintést nyújt azok teljesítményébe és hatékonyságába. A rendszer kiegészíthető egy szoftver által definiált rádióval (SDR), amely képes valóság-hű rádiós zavarokat megvalósítani ezzel tovább növelve a tesztelési keretrendszer pontosságát. A valós idejű szimulációs megoldás segítségével a V2X szimulációs modellek is kiaknázhatóak úgy, hogy azok a tesztelést támogassák és pontosabban reprezentálják

---

a virtuális forgalmat a valós járművek számára. A digitális iker technológia segítségével a valós és virtuális járművek közötti távolságból adódó hatások is figyelembe vehetőek, amely tovább növeli a valóság-hű körülményeket a tesztelés során.

# Tudományos eredmények összefoglalása

## 1. Tézis

### 1. Tézis

Kidolgoztam egy új módszertant a vezeték nélküli kommunikáción alapuló irányítási megoldások érzékenységvizsgálatára nagypontosságú szimuláció segítségével. Kimutattam, hogy a korszerű kereszteződésirányítási algoritmusok érzékenyen reagálnak a kommunikációs késleltetésekre és csomagveszteségekre. A kommunikáció degradációja a forgalom átlagsebességében akár 122%-os növekedést, az útszakaszok foglaltságában pedig akár 17%-os abszolút eltérést okozott, valamint a baleseti kockázat jelentős emelkedését eredményezte. Azonosítottam az egyes algoritmusokra jellemző kiberbiztonsági kockázatokat és a számítási teljesítményből adódó késleltetéseket, továbbá FMEA elemzést végeztem V2X-kompatibilis autonóm járművekre és autonóm csomópontokra vonatkozóan.

Kapcsolódó publikációk: [A, B, C, D, J]

A szakirodalomban számos vezeték nélküli kommunikáción alapuló algoritmust fejlesztettek ki, amelyek célja az autonóm csomópontok optimális és biztonságos irányítása. Ezek az algoritmusok mind központosított mind elosztott formában léteznek és az algoritmusok összetettsége is változó. A tézisben megvizsgáltam és bemutattam ezek előnyeit, hátrányait, limitációit, valamint a valós alkalmazás során felmerülő kihívásait. Amíg a szakirodalomban publikált megoldások jelentős többsége figyelmen kívül hagyja a kommunikációra ható tényezőket és bizonytalanságokat (lásd az 1. táblázatban), addig a tézisben vizsgált algoritmusok egy nagypontosságú szimulációs környezetben kerültek implementálásra. Ez a szimulációs keretrendszer figyelembe veszi az összes kommunikációs réteg hatásait, kezdve a fizikai rétegtől (rádiójel terjedése, zajok), egészen az alkalmazási réteggel (az irányítási algoritmusok implementációja). A szimuláció során a szabványos kommunikációs üzenetek bináris szinten a szabványos kódolásukkal együtt vannak modellezve, így a rendszerben rejlő késleltetések is pontosabban kerülnek modellezésre.

Az implementált algoritmusok a következők:

1. Érkezési sorrend alapú algoritmus (FCFS (First-Come, First-Served)), amely a ke-

1. táblázat. Összehasonlító táblázat a csúcstechnológias megoldásokról és azok problémáiról. ✓ azt jelenti, hogy az adott algoritmus típusra a probléma jelen van. Algoritmus típusok esetében zárójelben szerepel az implementált algoritmus neve.

Algoritmus típusa	Probléma					
	Az irányítás teljes leállása	Szellem járművek	Magas kommunikációs arány	Szigorú trajektória követés	Magas automatizáltsági szint	Magas számítási igény
Központosított (FCFS, Virtuális jelzőlámpa, MCTS)	✓	✓	✓	-	✓	✓
Elosztott (CAM-alapú)	X	✓	✓	-	✓	X
Tér-időbeli megoldások (Rács-alapú)	-	✓	✓	✓	✓	✓
Trajektória tervezés	-	✓	✓	✓	✓	X

resztesződéshez legközelebbi járművet engedi csak belépni a keresztesződésbe.

2. A CAM alapú algoritmus, amely a jobbkéz szabály alapján működik.
3. A virtuális jelzőlámpa, a jelzőlámpák jelzéseképeit kizárólag V2X üzeneteken keresztül valósítja meg.
4. A Monte Carlo fa keresési algoritmus (MCTS (Monte Carlo Tree Search)), amely a járművek sebességét szabályozza a keresztesződésen való sima és biztonságos áthaladás érdekében úgy, hogy a legjobb sorrendet részesíti előnyben az algoritmus.
5. A rács alapú algoritmus, amely az egész keresztesződést négyzetrács elemekbe diszkrétizálja és az érkező járművek trajektóriát foglalnak le a keresztesződésen belül.

Az algoritmusok analíziséhez olyan változatos teszteseteket hoztam létre, amelyek céltan vizsgálják a különböző sűrűségű forgalom, a fontosabb kommunikációs tényezők (pl. csomagvesztések, késleltetések, zaj) hatásait az adott algoritmusra. Az algoritmusok forgalomra gyakorolt hatásait kielemeztem és megvizsgáltam a keresztesződés áteresztőképességét és biztonságát. Az algoritmusok teljesítményének kiértékeléséhez különböző forgalmi paramétereket használtam: az átlagos sebességet (lásd az 2. táblázatban), az egyes élek kihasználtságát (lásd a 3. táblázatban) és az eldobott kommunikációs üzenetek számát. A szimulációk során különböző szintű rádiós zajt alkalmaztam, amely hatással volt a késleltetésekre és a sikeresen fogadott üzenetek számára is. A szimulációkat az összes zajszint és forgalom sűrűség kombinációjára lefuttattam, így nagyszámú szimulációs adatot gyűjtöttem. Az algoritmusokat kiberbiztonsági szempontból is megvizsgáltam, bizonyos esetekben szimulált támadásokkal is, amelyek potenciális forrásai lehetnek akár baleseteknek is. Az algoritmusok teljesítményét és forgalomra gyakorolt hatásait összehasonlítottam. Az összetett algoritmusok esetében megvizsgáltam azok számítási igényét is.

2. táblázat. Az algoritmusok átlagos járműsebességének összefoglalója minden szimulációs esetben. Az értékek m/s-ban vannak megadva. A "Magas" magas forgalmi sűrűséget jelent, míg az "Alacsony" alacsony forgalmi sűrűségű esetekre vonatkozik. A legjobban teljesítő algoritmus szürkével van kiemelve.

Algoritmus	Magas - zajmentes	Magas - alacsony zaj	Magas - erős zaj	Alacsony - zajmentes	Alacsony - alacsony zaj	Alacsony - erős zaj
FCFS	1.7084	0.8313	0.4414	0.5878	0.9841	0.7322
CAM alapú	2.9763	3.1546	3.1687	12.1183	12.2631	12.2662
Virtuális Jelzőlámpa	1.5119	1.4922	1.4885	2.1881	2.0531	2.037
MCTS	5.4411	6.4223	6.1848	8.9163	8.8118	11.0629
Rács alapú	2.1256	2.6378	2.14	2.017	2.3466	1.5473

Az algoritmusok részletes vizsgálatán felül bemutatásra került az autonóm kereszteződések és V2X-kompatibilis autonóm járművek Hibamód- és Hatáselemzése (FMEA), amely a szoftveres hibalehetőségeken túl a hardveres és környezeti hatásokat is figyelembe vette.

Az elemzés fő konklúziói, hogy az algoritmusok jelentős érzékenységet mutatnak az elhanyagolt kommunikációs tényezőkkel (pl. adatvesztés, késleltetés, zaj) szemben, amelyek negatívan befolyásolják a kereszteződés biztonságát és áteresztőképességét. A megállapítások kiemelik annak fontosságát, hogy a kereszteződésirányítási algoritmusok tervezésekor és vizsgálatakor figyelembe kell venni a kommunikációs tényezőket, mivel ezek jelentős hatással lehetnek a teljesítményükre és biztonságukra, ami különösen fontos a biztonságkritikus alkalmazások esetében. Az olyan algoritmusok esetében, amelyek akár több paraméter finomhangolásán alapulnak, illetve összetett számításokat végeznek, érzékenyebbek a kommunikáció hibáira, míg az egyszerű algoritmusok robusztusabbak ezekkel szemben. Az eredmények alapján az újonnan fejlesztett algoritmusokat részletesen meg kell vizsgálni szélsőséges körülmények között is, hogy képesek-e kezelni a kommunikáció hibáit, valamint a kibertámadásokat.

Ezeknek az algoritmusoknak garantálniuk kell a biztonságot és a balesetek elkerülését, még akkor is ha a kommunikációban súlyosabb hibák lépnek fel, függetlenül attól, hogy az algoritmus központosított vagy elosztott. Ajánlott a redundáns rendszerek alkalmazása akár szenzoros megoldásokra való váltással, amennyiben arra szükség van.

3. táblázat. Az átlagos útszakasz-kihasználtsági adatok összefoglalója. A táblázat a négy él kihasználtsági értékének átlagát tartalmazza. A különbségek a különböző esetekre vonatkoznak (zaj mentes, alacsony zaj és erős zaj). A legjobban teljesítő algoritmus kiemelve szerepel.

Algoritmus és eset	Magas forgalom	Különbség	Alacsony forgalom	Különbség
FCFS zaj nélkül	57.52%	-	58.87%	-
FCFS alacsony zajjal	59.66%	-2.14%	51.11%	7.76%
FCFS erős zajjal	62.03%	-2.37%	55.67%	-4.56%
CAM alapú zaj nélkül	41.19%	-	4.55%	-
CAM alapú alacsony zajjal	39.86%	1.33%	4.48%	0.07%
CAM alapú erős zajjal	39.21%	0.65%	4.49%	-0.01%
Virtuális jelzőlámpa zaj nélkül	58.02%	-	44.72%	-
Virtuális jelzőlámpa alacsony zajjal	58.17%	-0.15%	46.96%	-2.24%
Virtuális jelzőlámpa erős zajjal	58.22%	-0.05%	47.22%	-0.26%
MCTS zaj nélkül	16.71%	-	5.3%	-
MCTS alacsony zajjal	13.51%	3.2%	4.74%	0.56%
MCTS erős zajjal	14.45%	-0.94%	3.96%	0.78%
Rács alapú zaj nélkül	54.61%	-	43.85%	-
Rács alapú alacsony zajjal	50.76%	3.85%	37.47%	6.38%
Rács alapú erős zajjal	54.39%	-3.63%	51.76%	-14.29%

## 2. Tézis

### 2. Tézis

Kifejlesztettem egy elosztott kereszteződésirányítási algoritmust, amely V2X kommunikáción alapul és a kereszteződések áteresztőképességének és biztonságának javítását célozza. Az algoritmus teljesítményét nagy pontosságú szimulációval elemeztem különböző rádiós zajszintek és csomagvesztések mellett. Az elemzés eredményei alapján az algoritmus az alap szimulációs egyenrangú kereszteződéses esettel szemben 29%-kal csökkentette a várakozási időt, valamint 99%-kal csökkentette a hálózatban eltöltött idő szórásnégyzetét. Az algoritmust teszteltem kiberbiztonsági szempontból is: az algoritmus mind a kommunikáció hibáira, mind a kibertámadásokra robusztus maradt. Ezen kívül az algoritmust valós járművekkel és V2X hardverrel is teszteltem.

Kapcsolódó publikációk:  $[A, B, J]$

Kifejlesztettem egy egyszerű logikán alapuló elosztott kereszteződésirányítási algoritmust, amelyet a nagy pontosságú szimulációs keretrendszerben implementáltam. Az algoritmus kizárólag a járművek által küldött periodikus státuszinformációs üzenetekre (CAM) támaszkodik és nincs szüksége más információra a járművektől. Az algoritmus a jobbkéz szabályt valósítja meg a szabványos üzeneteken keresztül, amely a jobbról érkező járműveknek biztosít elsőbbséget. Az algoritmus egyszerű, de hatékony megoldást nyújt az elosztott kereszteződés irányítás megvalósításához.

Az algoritmus rendkívül alacsony számítási igénnyel rendelkezik, mivel csak a járművek távolságát számítja ki a kereszteződés középpontjától a Haversine képlet segítségével:

$$A = \sin^2 \left( \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{2} \right) \quad (1)$$

$$B = \cos(\Phi_1) \cos(\Phi_2) \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right) \quad (2)$$

$$d = 2r \arcsin \left( \sqrt{A + B} \right) \quad (3)$$

ahol  $d$  a távolság km-ben,  $\Phi_1, \Phi_2$  az 1. és 2. pont szélességi fokai radiánban,  $\lambda_1, \lambda_2$  az 1. és 2. pont hosszúsági fokai radiánban, és  $r$  a Föld sugara kilométerben.

Az algoritmus a beérkező járművek irányát a relatív irányszög alapján számítja ki:

$$H_{\text{relative}} = H_s - H_r \quad (4)$$

Ha  $H_{\text{relative}} < 0$ , akkor  $H_{\text{relative}} = H_{\text{relative}} + 360$

$$\text{irány} = \begin{cases} \text{megegyező irány,} & 0 \leq H_{\text{relative}} < 45 \text{ vagy } 315 \leq H_{\text{relative}} < 360 \\ \text{balról,} & 45 \leq H_{\text{relative}} < 135 \\ \text{szemből,} & 135 \leq H_{\text{relative}} < 225 \\ \text{jobbról,} & 225 \leq H_{\text{relative}} < 315 \end{cases} \quad (5)$$

Az algoritmus kiszámítja a járművek becsült érkezési idejét felhasználva azok kereszteződéstől vett távolságát és aktuális sebességét, amelyet egy biztonsági idő ablakkal kibővítve vesz figyelembe és ezen információk alapján hoz döntést az elsőbbségek kiosztásáról.

Az algoritmus robusztus a különböző kommunikációs hibákra, mint például a csomagvesztés vagy a zaj, hiszen az algoritmusnak elegendő egy beérkező üzenet a döntéshez. Az algoritmust nagy pontosságú szimulációs környezetben teszteltem, ahol megvizsgáltam az algoritmus teljesítményét és annak forgalomra gyakorolt hatásait. Az eredmények azt mutatták, hogy az algoritmus képes a járművek egyéni utazási idejének szórását 99,43%-kal csökkenteni. Az irányítás eredményeként minden jármű átlagosan 6,8 másodperccel kevesebb időt tölt a kereszteződésben, ami 29,16%-os relatív csökkenést jelent alacsony forgalmi sűrűség mellett.

Az algoritmust kibertámadásokkal szemben is teszteltem, ahol hamis adatokat küldtem egy járműből. A támadás ellenére az algoritmus sikeresen megakadályozta a baleseteket. Az algoritmus további rádiós zaj mellett is elemzésre került, és a csomagvesztéssel szemben ellenállóan bizonyult. Az *1. Tézisben*-ben (CAM alapú algoritmusként elnevezve) más szakirodalomban fellelhető algoritmusokkal összehasonlítva a legjobban teljesítőnek

---

bizonyult.

A kifejlesztett algoritmus valós járművekkel és Cohda Wireless MK5 OBU-kkal is megvalósításra került, és vezetés támogató megoldásként került bemutatásra, ember-gép interfész (HMI) támogatással. A demonstráció megmutatta, hogy az algoritmus könnyedén implementálható egy ADAS rendszer részeként.

### 3. Tézis

#### 3. Tézis

Kifejlesztettem egy új, mezoszkopikus V2X szimulációs módszert, amely a szimulációs lépésközök átlagos idejét 96%-kal csökkentette a klasszikus mikroszkopikus V2X szimulációhoz képest. Az új megoldással elérhető a valós idejű V2X szimuláció, amely elengedhetetlen a kevert valóság-alapú szimulációkhoz. A megoldás lényege, hogy a szimulált járműforgalom által generált üzenetek gyakoriságát egy csomópontba aggregáltam egy neurális függvény approximátor segítségével. A megoldás legfeljebb 10%-os hibával reprodukálta az elvesztett- és a fogadott csomagok számát. Kimutattam a CAM üzenetek gyakorisága és a forgalom dinamikája közötti korrelációkat is, melyek alapján az átlagos járműszám közepes lineáris és erős pozitív monoton korrelációt mutatott, amely statisztikailag szignifikánsnak bizonyult. Az átlagsebesség, átlaggyorsulás, valamint az átlagos irányszög eltérés elhanyagolható korrelációt mutatott.

Kapcsolódó publikációk: [E, F, J]

Az 1. Tézis eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy egy új V2X szimulációs módszer kifejlesztésére van szükség, amely növelheti a szimuláció sebességét anélkül, hogy túlzottan csökkentené a pontosságot, valamint megnyitná az utat új tesztelési és validálási módszerek előtt. Az ágens alapú kommunikáció szimulációjának komplexitása  $\mathcal{O}(2^n)$  exponenciális, különösen összetett applikációk esetében. A mezoszkopikus V2X szimulációs módszert úgy fejlesztettem ki, hogy jelentősen felgyorsítsa a vezeték nélküli kommunikáció szimulációját a jelenlegi megoldásokhoz képest. A mezoszkopikus szimulációs módszer képes valós idejű futásra jelentős (akár városi méretű) forgalom szimulációja mellett is.

A módszer azon alapul, hogy a szimulált forgalom által generált szabványos V2X üzenetek küldését egy-egy ügynevezett mezoszkopikus csomópontban aggregálom, amely kiváltja a nagyszámú mikroszkopikus csomópontot, így felgyorsítva a szimulációt.

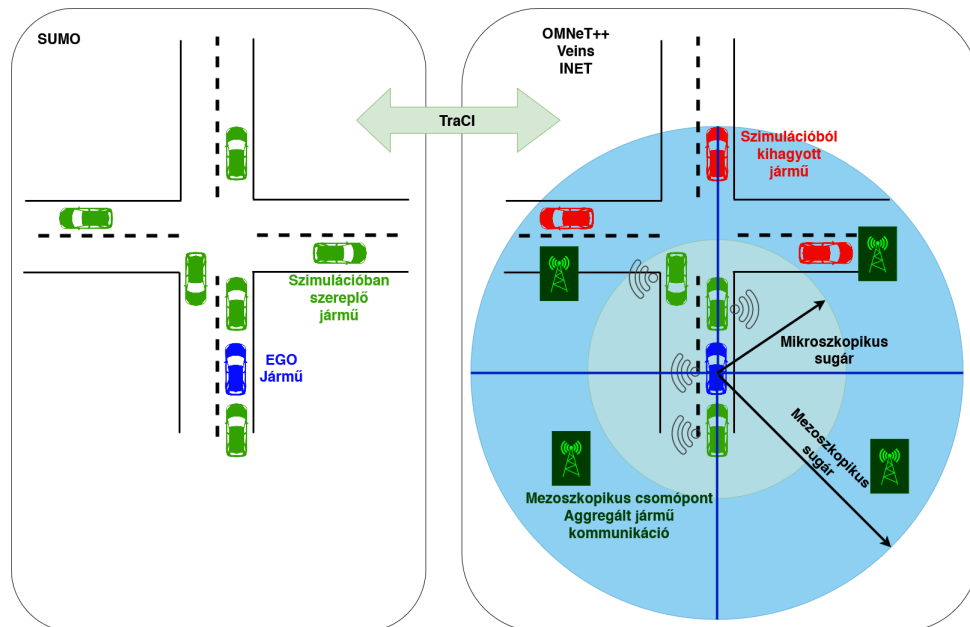
A tesztelt jármű (EGO) körüli terület három különálló zónára van diszkrétizálva az alábbiak szerint:

1. Mikroszkopikus terület: Ahol minden jármű részt vesz a szimulációban és a járművek

kommunikációja is mikroszkopikus szinten van szimulálva. Ez biztosítja az EGO jármű közvetlen környezetének magas szintű részletességét.

2. Mezoszkopikus terület: Ami tovább bővíti a mikroszkopikus területet, hogy lefedje az EGO jármű körüli teljes kommunikációs tartományt. Ebben a zónában az egész forgalom kommunikációját mezoszkopikus csomópontokba aggregáltam. A mezoszkopikus zóna szerepe, hogy pontosan reprezentálja a távoli forgalom kommunikációját, miközben biztosítja a magas szimulációs teljesítményt.
3. Makroszkopikus terület: Ahol a hálózati csomópontok kívül esnek a kommunikációs tartományon, és kizárásra kerülnek a szimulációból. E járművek kommunikációs hatása elhanyagolható, anélkül, hogy befolyásolná a tesztelt EGO jármű funkcionálisát.

A mezoszkopikus megközelítést a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. Mezoszkopikus V2X szimulációs módszer.

A mezoszkopikus szimuláció elsődleges célja, hogy az egész forgalom kommunikációját egy kiválasztott területen belül (körcikk) egyetlen csomópontba aggregálja, jelentősen csökkentve a szimulált kommunikáló csomópontok számát. A mezoszkopikus csomópont egy neurális hálózat alapú függvény approximátor segítségével előre jelzi azokat az üzeneteket, amelyeket az adott területen lévő ágensek küldeni fognak, és ezeket a szükséges frekvenciával kiküldi egy 5 másodperces időablakban.

A függvény approximátor véletlenszerűen mintavételezett szimulációs adatokkal lett feltanítva különböző városi úthálózatokon, különböző forgalmi körülményekkel. A járművek csak a betanított mezoszkopikus csomóponthoz tartozó körcikk területéhez voltak kötve (azaz, kizárólag az adott területen voltak járművek) az alábbi szabályok szerint:

$$d = \sqrt{(d_x)^2 + (d_y)^2} \quad (6)$$

$$\Theta = \arctan(dy, dx) \cdot (180/\pi) \quad (7)$$

A (6) egyenlet kiszámítja a jármű és a körcikk középpontja közötti távolságot. Itt  $d_x = x - x_{center}$  és  $d_y = y - y_{center}$  a járművek  $x$  és  $y$  koordinátái, valamint a körcikk középpontja közötti távolságokat mérik. A (7) egyenlet segítségével a poláris szög kerül kiszámításra. A jármű szimulációba illesztésének eredménye a (8) egyenlettel határozható meg.

$$\text{eredmény} = \begin{cases} \text{Igaz, ha} & [(\Theta > \alpha_{start}) \wedge (\Theta < \alpha_{end})] \wedge [(d < r_{sector}) \wedge (d > r_{micro})] \\ \text{Hamis} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (8)$$

ahol  $\alpha_{start}$  a körcikk kezdő szöge,  $\alpha_{end}$  a körcikk végszöge,  $r_{sector}$  a mezoszkopikus kör sugara, és  $r_{micro}$  a mikroszkopikus kör sugara.

A körcikk forgalmának aggregálásához a mezoszkopikus csomópont a saját körcikkére vonatkozóan az elmúlt 5 másodperc adatai alapján a következő mozgóátlagokat számítja ki:

1. Járművek átlag sebessége
2. Járművek átlag irányszöge
3. Járművek haladási irányszögének különbsége
4. Járművek átlag gyorsulása
5. Járművek átlag száma

Ezek a forgalmi adatok szorosan kapcsolódnak a CAM üzenetek generálásához [16], és a függvény approximátor bemeneti adataiként szolgálnak.

A hiányzó csomagütközések kompenzálása érdekében a mezoszkopikus csomópont adóteljesítménye az 5 másodperces periódus után módosításra kerül. A mezoszkopikus csomópont a következő egyenletet használja a szükséges adóteljesítmény kiszámításához:

$$P_T = N_v * \lambda \quad (9)$$

ahol  $P_T$  az adóteljesítmény [ $W$ ] egységben,  $N_v$  a mezoszkopikus csomópont körcikkében lévő járművek átlagos száma, és  $\lambda$  egy empirikusan meghatározott, forgatókönyv-specifikus állandó az adott szimulációs környezethez.

A szimuláció teljesítménye attól is függ, hogy a mikroszkopikus csomópontok milyen lépésközzel továbbítják az üzeneteket. Minél több üzenetet kell egy csomópontnak küldenie, annál kisebb időlépést kell alkalmaznia az időzítőnek. A kisebb időlépés azonban rontja a szimuláció teljesítményét. Ezért szükséges a szimuláció során az időlépés dinamikus módosítása, hogy az a lehető legnagyobb maradjon. Egy dinamikus időzítőt implementáltam a szimuláció teljesítményének és sebességének maximalizálása érdekében.

A CAM-generálási paraméterek és az üzenetküldések gyakorisága közötti korreláció bemutatásra került (lásd a 4. táblázatot).

4. táblázat. A paraméterek és a CAM küldési gyakoriság közötti korreláció.

Paraméter	Korreláció		
	Pearson	Spearman	p-érték
Járművek átlagos száma	0.46	0.83	0
Átlag sebesség	0.01	0.16	$4.76e^{-110}$
Átlag gyorsulás	-0.01	-0.03	0.0001
Átlag irányszög különbség	-0.02	-0.01	0.46

A Pearson-korreláció (0,46) azt jelezte, hogy mérsékelt pozitív lineáris kapcsolat van a változók között az átlagos járműszám esetén. A Spearman-korreláció azt mutatta, hogy erős monoton kapcsolat van az átlagos járműszám és a CAM küldési gyakorisága között. A 0-ás p-érték azt jelzi, hogy a korreláció statisztikailag szignifikáns. A többi paraméter nem mutatott szignifikáns korrelációt.

Az új mezoszkopikus V2X szimulációs megközelítést két különböző úthálózaton (Ingolstadt és Gyöngyös hálózatok SUMO modelljein) és valósághű forgalommal teszteltem. Az eredmények azt mutatták, hogy a bemutatott megoldás képes nagyszámú jármű szimulálására magas pontossággal, fenntartva a valós idejű szimulációs időt, és átlagosan 95,89%-al csökkentve az egyes szimulációs lépésközök hosszát. A pontosság megmaradt, a csomagvesztések és a helyesen fogadott csomagok közötti különbség 10% alatt maradt a tisztán mikroszkopikus V2X szimulációhoz képest (lásd a 5. táblázatot).

5. táblázat. A szimulációs eredmények összegzése a megfelelő  $\lambda$  értékekkel.

Forgatókönyv	Eredmények			
	Elvesztett csomagok (mikroszkopikus)	Elvesztett csomagok (mezoszkopikus)	Relatív változás	$\lambda$
Ingolstadt	5568	5012	-9.99%	3.1
Ingolstadt alternatív	310	309	-0.32%	0.0035
Gyöngyös	995	1018	2.31%	0.04
Gyöngyös alternatív	300	313	4.33%	1.35

---

## 4. Tézis

### 4. Tézis

Kifejlesztettem egy kevert valóság-alapú tesztrendszer, amely a mezoszkopikus V2X szimuláció segítségével realizálja a virtuális járművek kommunikációját a fizikai térben. A rendszerben digitális iker technológiát alkalmaztam, melynek segítségével a valós járművek mind a forgalom szimulációban mind a kommunikáció szimulációjában valós időben vesznek részt. Inverz terjedési modellek segítségével akár 58%-kal közelebb hoztam a valós és a virtuális járművek közötti kommunikáció átlagos jelerősségét, ezzel realizálva a valós és a virtuális jármű közötti távolság fizikai hatását. Szoftveresen definiált rádió segítségével, szimulációs adatok alapján hoztam létre valós rádiós zavarást, melynek segítségével akár 30%-os csomagvesztést generáltam a valós kommunikációban ezzel reprezentálva a valós környezetben előforduló interferenciát.

Kapcsolódó publikációk: [E, F, G, H, I, J]

A 3. Tézisben bemutatott szimulációs megoldás továbbfejlesztéseként egy új, V2X képes kevert valóság-alapú teszt keretrendszer került kialakításra. Ez a keretrendszer lehetővé teszi a V2X alapú irányítási algoritmusok tesztelését kevert valóság-alapú környezetben, ahol valós járművek képesek kölcsönhatásba lépni a virtuális forgalommal. A rendszer a mezoszkopikus V2X szimulációs módszert alkalmazza a virtuális járművek kommunikációjának fizikai térben való megjelenítésére. Ezzel nagyszámú jármű nagyponosságú szimulációja válik lehetségessé.

A szimuláció mezoszkopikus csomópontjának kommunikációjának továbbítása egy autóiipari V2X hardver segítségével történik, amelyhez saját interfészt fejlesztettem. Egy koncepciót igazoló mérés során létrehoztam egy statikus mezoszkopikus csomópontot (az RSU-t, amely fizikailag reprezentálja a mezoszkopikus csomópontot) amely képes volt a mezoszkopikus szimuláció által generált üzenetek továbbítására. Két EGO jármű Cohda Wireless MK5 OBU egységgel lett felszerelve, amelyek képesek voltak fogadni a mezoszkopikus csomópont által küldött üzeneteket. Ez a mérés demonstrálta a megvalósított rendszer kevert valóság-alapú képességeit, amely lehetővé teszi virtuális járművek kommunikációjának megvalósítását a fizikai térben.

A rendszert ezt követően továbbfejlesztettem egy V2X kommunikáción alapuló digitális iker rendszer integrálásával, amely lehetővé teszi, hogy valós járművek valós időben mozogjanak a forgalomszimulátorban és a kommunikációs szimulációs keretrendszerben egyaránt. A digitális ikreket ezután arra használtam, hogy modellezem a virtuális és valós járművek közötti távolság hatását, mégpedig úgy, hogy a küldési teljesítményt egy inverz terjedési modellel keresztül szabályoztam.

A kiküldési teljesítmény kiszámítási lépései, amely a valós és virtuális járművek közötti

jelterjedést hivatott reprezentálni V2X hardver segítségével, az inverz Rician terjedési modell [17] alkalmazása mellett a következőképpen történik:

A  $P_{rx}$  érték az OMNeT++ szimulációjában egy vizsgáló csomópont (amely a virtuális járművet reprezentálja egy mérés erejéig) és az EGO jármű digitális ikre közötti CAM üzenetküldés eredményeként kapott kimeneti értékből kerül átalakításra. Az  $R_r$  értéke a  $K_{rician}$  paramétertől, valamint a normál eloszlásból származó  $x$  és  $y$  valószínűségi változóktól függ:

$$R_r = \frac{1}{2(K_{rician} + 1)} \left[ (x_{rician} + \sqrt{2K_{rician}})^2 + y_{rician}^2 \right] \quad (10)$$

$$x_{rician}, y_{rician} \sim \mathcal{N}(0, 1) \quad (11)$$

$L_{fs}$ -t a következőképpen számoljuk:

$$L_{fs} = \frac{\lambda_{rician}^2}{16\pi^2 \cdot L_{sys} \cdot d_{rician}^\alpha} \quad (12)$$

$L_{total}$  számítása:

$$L_{total} = R_r \cdot L_{fs} \quad (13)$$

$P_t$ -t a következőképpen számítjuk:

$$P_t = \frac{P_{rx}}{L} \quad (14)$$

A küldési teljesítményt ezután beállítom az OBU-ban.

Az inverz terjedési modell lecserélhető lognormális árnyékolási modellre [18], amely a következőképpen számítható:

Az átlagos csillapítás az alábbi módon kerül kiszámításra:

$$L_{mean} = 10 \cdot \gamma \cdot \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (15)$$

az árnyékolási hatás:

$$S \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{dB}) \quad (16)$$

A teljes útvonal csillapítása ( $L_{total}$ ) az átlagos csillapítás és az árnyékolás hatásának összege:

$$L_{total} = L_{mean} + S \quad (17)$$

A fogadó oldali teljesítmény ( $P_{rx}$ ) ezután dBm-be kerül átalakításra. A szükséges adó teljesítmény ( $P_{tx}$ ) dBm-ben a fogadó teljesítmény dBm-ben mért értékének és a teljes útvonali csillapításnak az összegzésével kerül meghatározásra:

$$P_{tx\_dBm} = P_{rx\_dBm} + L_{total} \quad (18)$$

A rendszert egy SDR-rel is bővítettem, hogy rádióinterferenciát (Gauss-féle zajt) valósítson meg. Egy szimuláció alapú valószínűségi sűrűségfüggvényt (PDF) használtam, amely a csomagvesztési gyakorisági adatok alapján generálta a zavaró jel gyakoriságát. A sűrűségfüggvényt a Kolmogorov-Smirnov teszt segítségével választottam ki, így a lognormális eloszlás lett a legjobban illeszkedő eloszlás.

A rendszert egy 70 perces, mérési kampány során teszteltem, amelyben 3 valós jármű vett részt, mindegyik V2X eszközzel felszerelve. A járművek egy  $\sim 10km$  hosszú útvonalon haladtak valós forgalomban úgy, hogy 5 mérési esetet valósítottam meg különböző rádió beállítások mellett.

Az eredmények azt mutatták, hogy a rendszer valóságosabb eredményeket ér el a valós és virtuális járművek közötti kommunikáció megvalósításában, amikor inverz terjedési modelleket használtam (lásd a 6 és 7 táblázatokat). A mezoszkopikus jármű és annak digitális ikre képes volt együtt mozogni az EGO járművekkel, megvalósítva a virtuális forgalom kommunikációját körülöttük. Az SDR rádió képes volt zavarni a V2X hardvereket és valóságos csomagvesztéseket okozott, akár 29,69%-os üzenetvesztéssel.

6. táblázat. Az inverz Rician terjedési modell és a Rician terjedési modell relatív különbségeinek összegzése az RSSI átlagértékekben, állandó adó teljesítménnyel, összehasonlítva a szimulációban mért fogadási jelszinttel (a célzott fogadó teljesítmény szintjei a fizikai tartományban).

Eset	RSSI1 inverz modell (%)	RSSI2 inverz modell(%)	RSSI normál modell(%)
Eset 1	18.57	21.99	76.98
Eset 2	25.70	28.98	80.72
Eset 3	27.41	30.70	80.33

7. táblázat. A mérési szakaszok összegzése a relatív adóteljesítmény különbségekkel, összehasonlítva az első mérési szakasz eredményeivel.

Szakasz	RSSI1 átlag [dBm]	RSSI2 átlag [dBm]	Zaj1 átlag [dBm]	Zaj2 átlag [dBm]	Átlagos küldési teljesítmény [dBm]	Átlagos távolság [m]	Relatív teljesítmény különbség [%]
1	-72.23	-69.77	-101.56	-100.82	16.14	202.38	-
2	-47.00	-41.00	-101.00	-104.00	11.71	117.24	-27.45%
3	-63.59	-60.68	-101.72	-101.04	13.17	127.81	-18.38%
4	-59.05	-56.18	-101.65	-100.98	7.76	90.17	-51.93%
5	-58.76	-54.99	-101.92	-101.04	7.33	123.38	-54.58%

# Hivatkozások

- [1] YL IEEE 802.11 p Working Group és tsai. „ISO/IEC/IEEE 8802-11:2022 Telecommunications and information exchange between systems — Specific requirements for local and metropolitan area networks — Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications”. *IEEE Std* (2022).
- [2] Rafael Molina-Masegosa és Javier Gozalvez. „LTE-V for Sidelink 5G V2X Vehicular Communications: A New 5G Technology for Short-Range Vehicle-to-Everything Communications”. *IEEE Vehicular Technology Magazine* 12.4 (2017), 30–39. old. DOI: 10.1109/MVT.2017.2752798.
- [3] Othman S. Al-Heety és tsai. „Traffic Control Based on Integrated Kalman Filtering and Adaptive Quantized Q-Learning Framework for Internet of Vehicles”. *CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences* 138.3 (2023), 2103–2127. old. ISSN: 1526-1492. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.029509>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526149223001480>.
- [4] Ziyi Lu és tsai. „Toward edge-computing-enabled collision-free scheduling management for autonomous vehicles at unsignalized intersections”. *Digital Communications and Networks* (2024). ISSN: 2352-8648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.03.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864824000270>.
- [5] Dekai Zhu, Qadeer Khan és Daniel Cremers. „Multi-vehicle trajectory prediction and control at intersections using state and intention information”. *Neurocomputing* 574 (2024), 127220. old. ISSN: 0925-2312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127220>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231223013437>.
- [6] Snigdhaswin Kar, Prabodh Mishra és Kuang-Ching Wang. „Dynamic packet duplication for reliable low latency communication under mobility in 5G NR-DC networks”. *Computer Networks* 234 (2023), 109923. old. ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109923>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128623003687>.

- [7] Vittorio Todisco és tsai. „Full duplex based collision detection to enhance the V2X sidelink autonomous mode”. *Computer Networks* 254 (2024), 110763. old. ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110763>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128624005954>.
- [8] Hieu Nguyen és tsai. „Cellular V2X Communications in the Presence of Big Vehicle Shadowing: Performance Analysis and Mitigation”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2022), 1–13. old. DOI: 10.1109/TVT.2022.3212704.
- [9] Behrad Toghi és tsai. „Analysis of Distributed Congestion Control in Cellular Vehicle-to-Everything Networks”. *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*. 2019, 1–7. old. DOI: 10.1109/VTCFall.2019.8891335.
- [10] Weiming Zhao, Ronghui Liu és Dong Ngoduy. „A bilevel programming model for autonomous intersection control and trajectory planning”. *Transportmetrica A: transport science* 17.1 (2021), 34–58. old.
- [11] Yang Guan és tsai. „Centralized Cooperation for Connected and Automated Vehicles at Intersections by Proximal Policy Optimization”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.11 (2020), 12597–12608. old. DOI: 10.1109/TVT.2020.3026111.
- [12] Chairit Wuthishuwong és Ansgar Traechtler. „Coordination of multiple autonomous intersections by using local neighborhood information”. *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. 2013, 48–53. old. DOI: 10.1109/ICCVE.2013.6799768.
- [13] John Khoury, Joud Khoury és Germain Zouein. „A practical approach to decentralized intersection access control for autonomous vehicles”. *Proceedings of the 2017 International Conference on Automation, Control and Robots*. 2017, 32–35. old.
- [14] Alexander Katriniok, Peter Kleibaum és Martina Joševski. „Distributed Model Predictive Control for Intersection Automation Using a Parallelized Optimization Approach”. *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017). 20th IFAC World Congress, 5940–5946. old. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1492>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317320694>.
- [15] Laleh Makarem és Denis Gillet. „Fluent coordination of autonomous vehicles at intersections”. *2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2012, 2557–2562. old. DOI: 10.1109/ICSMC.2012.6378130.
- [16] ETSI Technical Committee Intelligent Transport Systems. *Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*. en. Standard ETSI EN 302 637-2. Sophia-Antipolis, France: European Telecommunications Standards Institute, 2019. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_EN/302600\\_302699/30263702/01.04.01\\_30/en\\_30263702v010401v.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_EN/302600_302699/30263702/01.04.01_30/en_30263702v010401v.pdf).

- [17] Chengshan Xiao, Yahong Rosa Zheng és Norman C Beaulieu. „Statistical simulation models for Rayleigh and Rician fading”. *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.* 5. köt. IEEE. 2003, 3524–3529. old.
- [18] Charalambos D Charalambous és Nickie Menemenlis. „Dynamical spatial log-normal shadowing models for mobile communications”. *Proceedings of the 27th General Assembly of the International Union of Radio Science* (2002).

# Saját publikációk

- [A] T. Ormándi and B. Varga, *The importance of V2X simulation: An in-depth comparison of intersection control algorithms using a high-fidelity communication simulation*, Vehicular Communications, vol. 44, p. 100676, 2023. Elsevier. Available: <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100676>.
- [B] T. Ormándi, B. Varga, and T. Tettamanti, *Distributed intersection control based on cooperative awareness messages*, 2021 5th International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), IEEE, 2021. Available: <https://doi.org/10.1109/SysTol52990.2021.9595376>.
- [C] T. Wágner, et al., *SPaT/MAP V2X communication between traffic light and vehicles and a realization with digital twin*, Computers and Electrical Engineering, vol. 106, p. 108560, 2023. Elsevier. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108560>.
- [D] M. Novák, B. Varga, T. Ormándi, *Analysis of Safety and Security in Autonomous Vehicle Intersections*, 2025 11th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), IEEE, 2025. (Beküldve)
- [E] T. Ormándi, B. Varga, *Mesoscopic V2X Simulation Framework to Enhance Simulation Performance*, Simulation Modelling Practice and Theory, 2024. Available: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.103003>.
- [F] B. Varga, T. Ormándi, T. Tettamanti, *EGO-centric, multi-scale co-simulation to tackle large urban traffic scenarios*, IEEE Access, 2023. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3284316>.
- [G] T. Ormándi, B. Varga, *Proof of concept testing of a mixed-reality VANET test system with SDR-based physical radio interference*, 23rd European Control Conference (ECC25), 2025. (Elfogadva)
- [H] T. Ormándi, B. Varga, *V2X link-based Digital Twins with inverse fading model for mixed-reality testing of CCAM functions*, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2025. (Beküldve)

- [I] T. Ormándi, Zs. Pethő, B. Varga, *Mixed-reality VANET testing supported by simulation of mesoscopic V2X communication*, 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), IEEE, 2024, pp. 1915–1920. Available: <https://doi.org/10.1109/CoDIT62066.2024.10708241>.
- [J] T. Ormándi, *Practical Manual of SUMO/MATLAB/VEINS/INET/OMNET++ PROGRAMMING AND INTERFACING for V2X Simulation with Standard Protocols (Technical Report)*. Available: [https://traffic.bme.hu/wp-content/uploads/2023/02/Veins\\_Documentation.pdf](https://traffic.bme.hu/wp-content/uploads/2023/02/Veins_Documentation.pdf).