

KÖZLEKEDÉS ÉS MOBILITÁS

KÖZLEKEDÉS- ÉS JÁRMŰTUDOMÁNYI FOLYÓIRAT



KTI
Alapítva - Since 1938

Magyar Közlekedéstudományi
és Logisztikai Intézet

Közlekedés és Mobilitás

ALAPÍTVÁ: 2022

A Közlekedéstudományi Intézet szakmai és tudományos folyóirata

Megjelenik negyedévente

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

dr. Balogh Edina
dr. Berényi János
dr. Boros Anita
dr. Gáspár László (a szerkesztőbizottság elnöke)
dr. Maros Dóra
dr. Munkácsy András
dr. Palik Mátyás
dr. Rohács Dániel
dr. Sipos Tibor
dr. Szalay Zsolt
dr. Török Ádám
dr. Turcsányi Károly
dr. Varga István
dr. Zöldy Máté

SZERKESZTŐSÉG ÉS KIADÓ:

KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.
1119 Budapest, Than Károly utca 3–5

TELEFON: +36 1 371 5912

ELEKTRONIKUS LEVÉLCÍM: folyoirat@kti.hu

HONLAP: folyoirat.kti.hu

KIADÁSÉRT FELELŐS SZEMÉLY:

Mayer András János (ügyvezető)

SZERKESZTÉSÉRT FELELŐS SZEMÉLY:

Dr. Munkácsy András

ISSN 2939-7057

A kéziratok beküldésével, a szerkesztési alapelvekkel,
a folyóirat megrendelésével kapcsolatos minden információ a honlapon érhető el.

Kedves Olvasók!

Különös öröm számomra a Közlekedés és Mobilitás szakmai-tudományos folyóirat harmadik számának a megjelenése, illetve az a lehetőség, hogy ahhoz Beköszöntőt írhatok.

Egyrészt a harmadik szám már annak a jele, hogy az új folyóiratnak sikerült átvészelnie az alapítás formai és tartalmi jellegű nehézségeit, azokat a „gyermekbetegségeket”, amikkel minden ilyen bátor vállalkozásnak szembe kell néznie. Másrészt pedig az a körülmény tölt el örömmel, hogy a 85 éves KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet azon törekvése, miszerint – az Intézet Tudományos Tanácsa által koordináltan – az intézmény tudományos jellegét több évtizednyi „szunnyadás” után visszahozza, a folyóirat révén újabb fontos pillérrel bővül. Terveink szerint ugyanis a Közlekedés és Mobilitás folyóirat elsősorban a KTI kutatóinak szolgáltató fórumot tudományos eredményeik bemutatására. Hangsúlyozva ugyanakkor, hogy az Intézetén kívüli szerzők előtt is nyitva áll a publikációs lehetőség. Műveik folyóiratban való megjelentetéséhez a szerzők mindkét csoportja számára a felkészült, szakmai lektorok támogató bírálatára van szükség.

A folyóirat jelenlegi száma is a közlekedés meg lehetőségen széles spektrumát öleli fel. Az egyik cikk a hidrogéngazdaságnak és a hidrogénmeghajtású gépjárműveknek a közlekedési ágazat zöld átállásában lehetséges szerepét választotta témájául.

Négy KTI-kutató cikkében az import használt könnyű gépjárművek összetételét vette vizsgálat alá, és az

eredmények alapján javaslatokat tett a környezetvédelmi szempontok fokozott érvényesítése érdekében.

Egy cikk a töltési infrastruktúra tervezésére, az elektromos autóbustípus kiválasztására és az elektrifikáció költségbecslésére vonatkozó módszertan kidolgozásával a városi autóbushálózat elektrifikációjára összpontosít.

Oktató és egyetemi hallgatók közös cikke, objektum-detektálás és adaptív járműtrajektória-klaszterezés alapján, automata forgalmi statisztikával foglalkozik.

A nagyrészt KTI-kutatók által készített tanulmány azt fejtegeti, hogy a COVID-pandémia lecsengése után a közlekedésben, illetve a turizmusban számíthatunk-e korszakváltásra.

Az összekapcsolt autonóm járművekkel foglalkozó cikk olyan korszerű technológiákról tájékoztat, amelyek az ilyen járműveknek a többi közlekedővel és az infrastruktúrával való adatkapcsolat létesítését teszik lehetővé.

Izraeli esettanulmányt mutat be az a cikk, amely drónoknak ellenőrzött légtérben való mozgását választotta témájául.

Két KTI-s kutató cikke a közlekedés és a mobilkommunikáció kapcsolatát feszegeti, kitérve a közlekedésbiztonsági előnyökre, illetve az információhiányban rejlő veszélyekre is.

Bízva a folyóirat jövőbeni, további színvonal-emelkedésében, ajánljuk a harmadik számot az érdeklődő olvasóknak.

GÁSPÁR LÁSZLÓ DSc

kutatóprofesszor

a Szerkesztőbizottság elnöke

a KTI Tudományos Tanácsának elnöke

Budapest, 2023. december 18.

Tartalomjegyzék

A hidrogéngazdaság szerepe a közlekedési ágazat zöld átállásában – a hidrogén meghajtású járművekkel kapcsolatos kutatások

PROF. DR. BOROS ANITA

5. oldal

Import használt könnyű gépjárművek összetételének vizsgálata és javaslatok a környezetvédelmi szempontok érvényesítésére

DEÁK JÁNOS, GÁSPÁR-ZSOVÁN NOÉMI, TELEKESI TIBOR, DR. FÖGLEIN KATALIN

15. oldal

Városi autóbusz-hálózat elektrifikációja

SZILASSY PÉTER ÁKOS, DR. FÖLDES DÁVID, DR. CSONKA BÁLINT

32. oldal

Automata forgalmi statisztika objektumdetektálás és adaptív járműtrajektória klaszterezés alapján

AGG ÁRON DÁVID, PÉTER BENCE GÁBOR, DR. HORVÁTH ANDRÁS

51. oldal

Korszakváltás a közlekedésben?

A pandémiás helyzet hatásai

DR. BAUER BÉLA, DÉRI ANDRÁS, DR. MISKOLCZI MÁRK, KOVÁCS TAMÁS

70. oldal

Az összekapcsolt autonóm járművek mibenlétéről

DR. LUKOVICS MIKLÓS

79. oldal

Esettanulmány Izraelből: drónok ellenőrzött légtérben

HORVÁTH GÁBOR

89. oldal

Közlekedés és a mobilkommunikáció kapcsolata

KÚN GERGELY OTTÓ, DR. WÜHRL TIBOR

98. oldal

Tudományos cikk

A hidrogéngazdaság szerepe a közlekedési ágazat zöld átállásában – a hidrogén meghajtású járművekkel kapcsolatos kutatások

Beküldve: 2023.01.04.
Elfogadva: 2023.03.27.
Online közzétéve: 2023.12.18.

id **PROF. DR. BOROS ANITA** egyetemi tanár, központvezető, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Körforgásos Gazdaság Elemző Központ, boros.anita@uni-mate.hu

Kivonat: A közlekedési ágazat környezetterhelése és energiaigénye az elmúlt időszakban paradigmaváltásra készítette az ágazat meghatározó gyártóit és fejlesztőit. A kutatások olyan új megoldások kidolgozására irányulnak, amelyek az ágazat negatív környezeti mutatóit, fokozott energia szükségletét hivatottak mérsékelni. A kutatási fókuszterületek egyik kiemelkedő szegmense a hidrogéngazdaság, és a hidrogén meghajtású gépjárművek fejlesztése. A tanulmány az ezzel kapcsolatos legújabb kutatási eredményeket foglalja össze, rávilágítva a technológia piaci térnyerését befolyásoló legfontosabb tényezőkre.

Kulcsszavak: hidrogéngazdaság, hidrogén meghajtású jármű, elektromos jármű, hidrogén üzemanyag cella, hidrogéntermelés

The role of the hydrogen economy in the green transition of the transport sector - research on hydrogen-powered vehicles

Abstract: The environmental burden and energy demand of the transport sector have recently prompted the leading manufacturers and developers of the sector to make a paradigm shift. The research is aimed at developing new solutions that are intended to mitigate the negative environmental indicators of the sector and the increased need for energy. One prominent segment of the research focus areas is the hydrogen economy and the development of hydrogen-powered vehicles. The study summarizes the latest research results in this regard, highlighting the most important factors influencing the market growth of the technology.

Keywords: hydrogen economy, hydrogen powered vehicle, electric vehicle, hydrogen fuel cell, hydrogen production

Bevezetés

Napjainkban a világ energiaigénye rohamosan növekszik, így várhatóan a közeljövőben az energiaforrások nem tudják ezt az igényt kielégíteni. Ennek köszönhetően a megújuló energiaforrások kutatása jelentősen felértékelődött. Az elmúlt időszak különböző válsághelyzetei még inkább ráirányították a figyelmet új megoldások sürgető szükségességére.

Emellett jelentősen változtak az utazási szokások is, elsősorban a pandémia következtében (Anwar et al., 2023). A fejlődő országok közül például Kínában 50,9%-kal (Cui et al., 2021), Indiában 35%-kal (Singh et al., 2020), Finnországban 40-60%-kal (Tiikkaja és Viri, 2021) csökkent a tömegközlekedési eszközök utasainak száma.

A Nemzetközi Energia Ügynökség (a továbbiakban: IEA) szerint 2020-ban a közlekedésből származó szén-dioxid-kibocsátás a globális kibocsátás 24%-át tette ki. Jelenleg a közlekedési ágazat szén-dioxid-kibocsátásának csökkentését különböző szakpolitikai intézkedésekkel igyekeznek elérni az országok (IEA, 2021).

Az autóiipar lényeges energiaigényének kompenzálására az elmúlt időszakban jelentős fejlesztési folyamatok kezdődtek az alternatív energiarendszerek bevezetése érdekében. A kutatások igen szerteágazók, azonban egy meghatározó vonulatként értékelhető a nagy energiahatékonyságú, és alacsony károsanyag-kibocsátású hidrogén üzemanyagcellák közlekedési, illetve autóiipari alkalmazása.

Jelen tanulmányunk röviden összefoglalja a hidrogén meghajtású gépjárművekkel kapcsolatos legfontosabb kutatási eredményeket, hogy betekintést nyújtson a technológia kapcsán felmerülő kihívások rendszerébe.

A hidrogéngazdálkodás zöldgazdasági szerepe

A hidrogéngazdaság kifejezést először John Bockris használta, aki 1972-ben a hidrogént tiszta energiahordozóként nevesítette (Moliner, 2016). A hidrogéngazdaság e kezdeti felfogása során a hidrogént olyan univerzális energiahordozóként képelték el, amelyen keresztül atomenergia és napenergia termelhető gazdaságosan. (Bockris, J. O. M., 1972). Az 1980-as években a hidrogénkutatás több új területre ágazott el, többek között a hidrogén tárolására, valamint napenergiából és más alternatív energiából történő hidrogén előállítására (Bockris, J. N., - Veziroğlu, T. N., 1983).

A Ballard Power Systems 1983-ban fektetett be először üzemanyagcellák fejlesztésébe, később a Daimler Benz és a Chrysler is üzemanyagcellás járművek új generációjának előállításába kezdett (Hystory-Fuell cells Work).

Az elmúlt több mint húsz éves időszakban robbanásszerű növekedés tapasztalható a hidrogéngazdasággal kapcsolatos kutatások területén is. Ezt mutatja, hogy a kétezres évek eleje óta nyolcszorosára emelkedett a témakörben megjelent publikációk száma, mint előtte (Hilbert-Lopez, 2011, Yap - McLellan, 2023).

A modern gazdaságpolitikai szerzők közül a hidrogéngazdaság fogalmát Jeremy Rifkin amerikai futurista vezette be 2002-ben (Rifkin, J., 2002). Az ő értelmezésében a hidrogéngazdálkodás egy új gazdasági rendszerre utal, amely során olaj helyett hidrogént használnak. Mivel a hidrogén korlátlan energiaforrás, ebben a modellben bárki lehet fogyasztó és szállító is (Stephens-Romero, Set al., 2010). A hidrogéntársadalom a termelés, a szállítás, az ellátás és a hasznosítás szakaszaiból áll. A sikeres hidrogéngazdálkodás feltétele, hogy a fejlődés minden szakaszában megvalósuljon a gazdasági egyensúly. A hidrogén-gazdaságban az áru a hidrogén, amelyet az általános gazdasági folyamatoknak megfelelően elő kell állítani, csomagolni, szállítani, tárolni és a végfelhasználóhoz el kell juttatni, ahol tüzelőanyagcellák vagy más átalakító eszközök segítségével villamos energiává alakítható (Khrouz et al., 2019). A hidrogéngazdaság tehát lényegében egy szélesebb körű átmenetnek tekinthető az alacsony szén-dioxid-kibocsátású társadalom felé. A kétezres évek utáni kutatások főként arról szólnak, hogy a hidrogén, mint energiahordozó rugalmas alkalmazkodási készsége révén, hogyan illeszthető be valamely jövőbeli forgatókönyvbe (Murdock et al, 2022.)

A hidrogéngazdasággal kapcsolatos legújabb szakirodalmi források elsődlegesen a hidrogén előállítása (Marusek, 2022, Hwngbo et al 2018, Ardo et al., 2022), tárolása (Miocic et al., 2023, Lesmana, 2023) és felhasználása (Fang, 2023, Gholamian et al. 2023) kapcsán mutatnak jelentős előrelépést (Griffiths et al., 2021). A különböző technológiai feltételek elemzése elsősorban a műszaki gyakorlatokra és a hidrogéntermelés, -tárolás és -elosztás specifikus módszereinek továbbfejlesztésére irányul (Lahnaoui et al., 2021).

Az utóbbi időszakban előtérbe kerültek a hidrogénellátási láncok elemzésével foglalkozó kutatási irányzatok is: ezek egy része a hidrogénellátási láncok teljes egészének vagy egyes szakaszainak optimális konfigurációjának elérésére szolgáló megközelítésekre és modellekre koncentrálnak (Agnolucci és Mcdowall 2013, Li et al. 2019, Dagdougui 2012), míg egy másik irányzat a környezeti hatásvizsgálatokra, ökológiai teljesítmény és CO₂-kibocsátási tényezőkre helyezi a hangsúlyt (Bhandari et al., 2014, Maryam 2017, Balcombe et al., 2018, Griffiths et al., 2021). Bolat és Thiel a hidrogénellátási lánc elemzése kapcsán leírja, hogy a hidrogén hogyan juthat el a gyártás helyéről a végfelhasználóhoz, a hidrogén üzemanyagcellás járművekhez (Bolat, P., - Thiel, C., 2014).

A hidrogén ugyanakkor a jelenlegi energiaipari (Wikramanayake et al., 2021), ipari (Li S. et al., 2021), közlekedési (Chen, Y., et al., 2022), élelmiszeripari és környezettudományi (Jovan -Dolanc, G. 2020) kutatásainak homlokterében álló legattraktívabb energiaforrás (Yue et. al., 2021).

Az energiaipari kutatások igen széles spektrumon mozognak. Wikramanayake és szerzőtársai Texasban vizsgálták a felesleges szél- és napenergia tárolását az elektrolízis által vezérelt hidrogénné való átalakítás révén. Kutatásaik során arra jutottak, hogy ezt a tárolt hidrogént vissza lehetne alakítani elektromos árammá, és energiahiány esetén a hálózatba be lehetne táplálni. A tanulmányukban egy hosszú távú tárolási rendszert jellemeznek egy 2025-ig becsült kapacitásnövekedés alapján, a névleges teljesítmény és a hidrogén elektrolízissel történő előállításának költségeivel számolva. Az előzetes műszaki-gazdasági elemzésük szerint körülbelül 40 GW teljes elektrolizáló kapacitás esetén 16%-kal növelhető a megújuló energiaforrások hozzájárulása a texasi hálózatba.

Az ipar területén is jónéhány előremutató kutatással találkozhatunk: így például az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogén a földgáz helyettesítőjeként használható a vasérc kémiai redukálására az acéliparban. A vas hidrogénnel történő közvetlen redukciója egyes szerzők szerint csökkentené a teljes hőenergia-igényt (Li S. et al, 2021). Különböző forgatókönyveket dolgozott ki Hobohom a finomítók, a Német Cementipari Szövetség a cement, illetve (Ireson et al., 2019) az üvegipar számára.

Érdemes megemlíteni, hogy a repülőgépiparban a hidrogén a kerozin helyettesítő üzemanyagként, kis propeller

típusú repülőgépek üzemanyagcelláiban is használható (Petrescu et al. 2020, Yusaf et al, 2021).

Mindemellett olyan átfogó tanulmányok is születtek már, amelyek a hidrogéngazdaság fejlesztését szolgálják a különböző egyéb iparágak vertikális összekapcsolása révén. Így például Trapp és szerzőtársai tanulmánya tizenkét üzleti modell archetípust azonosít a német hidrogén-járműiparban az ágazatok összekapcsolásával összefüggésben (Trapp et al, 2022).

Napjainkban a hidrogéntermelés 75-100 millió tonna (Mt) és azt főként fosszilis tüzelőanyagokból nyerik, különösen földgázból (48%), nehézelajokból és benzinből (30%), valamint szénből (18%), míg a fennmaradó 4%-ot vízelektrolízissel állítják elő (IEA, 2021).

A hidrogéntermelési technológiákban használt különböző típusú energiaforrások megkülönböztetésére Dawood, Anda és Shafiullah (2020), Newborough és Cooley (2020), valamint Noussan et al. (2020) különböző színű címkék használatát javasolta.

A szénelgázosítással előállított hidrogént barna vagy fekete hidrogénnek nevezik, amely a felhasznált szén típusától függ. Ha a hidrogént a földgáz gőz-metános reformációjával állítják elő, akkor azt szürke hidrogénnek nevezik (Wappler, 2022).

1.táblázat A hidrogén előállításának egyes módszerei

Forrás	Módszer	Szín	Osztályozás	2020 termelési % (IEA, 2021)
Fekete szén	Elgázosítás	Fekete H2	Magas szénlábnyom	19%
Lignit (barnaszén)		Barna H2		
Földgáz	Földgáz reformálás	Szürke H2		59%
Olaj	Részleges oxidáció	Szürke H2		0,6%
Melléktermék	Nafta reformálás	Szürke H2		21%
	Klór-alkáli elektrolízis	Fehér H2	Tiszta	
Földgáz + CCS	Földgáz reformálás	Kék H2		0,7%
Metán	Pirólízis	Türkiz H2		Nincs kereskedelmi léptékű gyártás
Nukleáris energia	Víz elektrolízis	Rózsaszín H2		
Vegyes hálózati villany	Víz elektrolízis	Sárga H2		
Megújuló energia	Víz elektrolízis	Zöld H2	Zöld	0,03%

Forrás: Wappler, 2022.

A hidrogén ipari melléktermékként is előállítható, például marónátron előállítása során vagy klór-alkáli elektrolízissel. Ez a termelési út a fehér színhez kapcsolódik, és alacsony szén-dioxid-kibocsátásúnak tekinthető. A benzin előállítása során melléktermékként szintén hidrogén képződhet a reformálási folyamat eredményeként.

A hidrogént vízelektrolízissel is elő lehet állítani különféle energiaforrások felhasználásával. A megtermelt hidrogént zöldnek nevezzük, ha az elektrolízis során megújuló energiát használnak.

A vízelektrolízis egy jól ismert tiszta és zöld módszer a hidrogén előállítására, amelynek során elektromos áramot vezetnek át a vízben lévő vezető elektroliton, illetve a vízmolekulákat hidrogénre és oxigénre bontják (Martins, 2022). Ennek az eljárásnak a fő hátránya a nagy energiafogyasztás, amely a hidrogénköltség körülbelül 80%-át teszi ki (Puig-Arnau et al., 2010). A zöld hidrogén vízből történő előállításának másik lehetséges módja a termolízis, amely a víz egy lépéses disszociációjából áll (Dincer, 2012). Emellett ismeretes a biomassza elgázosítása is, amely a zöld hidrogén előállításának tisztább, költséghatékony és fenntartható folyamatoként jelenik meg (Moneti et al., 2016).

Szintén egy érdekes eredményt produkál, ha a víz elektrolízisére megújuló energia helyett atomenergiát, vagy vegyes hálózatból származó villamos energiát használunk. Ebben az esetben a hidrogén ugyanis rózsaszín vagy sárga lesz. Emellett metánpirólízissel is előállítható hidrogén, ebben az esetben azt türkizkék hidrogénnek nevezzük. A szürke és a fekete vagy barna hidrogén kivételével az összes többi hidrogénszínt gyakran alacsony

széntartalmú hidrogénnek vagy tiszta hidrogénnek tekintik.

A zöld hidrogéntermelés egyik fő hátránya manapság az előállítási költség, amely jelenleg 3-6-szor drágább, mint a szürke és barna hidrogén előállítása (Panchenko, 2022).

A zöld hidrogén mellett a legutóbbi kutatások eredménye a kék hidrogén, amely a szürke hidrogén kiterjesztésének is tekinthető, mivel előállítása szintén földgázon alapul.

Az Európai Bizottság (Európai Bizottság, 2011) megkülönbözteti a fosszilis alapú - amelyet szénből vagy földgázból nyernek -, a tiszta, vagy megújuló - amelyet víz elektrolízisével, megújuló forrásokból származó villamos energiával, biogáz reformálásával vagy biokémiai átalakításával állítanak elő biomasszából- és az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hidrogént - ha elektrolitikus, alacsonyabb kibocsátású vagy fosszilis forrásokból állítják elő utilisation-storage systems (CCUS) rendszerekkel.

Ugyanakkor az egyes hidrogéntípológiákra vonatkozó jól meghatározott szabványok hiánya nagymértékben korlátozza a nemzetközi hidrogénkereskedelmet.

A hidrogénmeghajtású járművekre vonatkozó kutatási irányzatok

A szennyezőanyag-kibocsátás csökkentésének egyik módja az elektromos és hibrid autók közlekedési célú használatának ösztönzése a hagyományos, fosszilis tüzelőanyagot égető belső égésű motorral szerelt gépjárművek helyett (Rezvani et al., 2015, Li et al., 2017 és Lin és Wu et al., 2017).

Rezvani a fogyasztók elektromos gépjárművekhez kapcsolódó elfogadási magatartásával kapcsolatban kiemelte, hogy a fogyasztói érzelmek fontosnak bizonyultak az autóvásárlások során. Li kutatásai alapján megállapítható, hogy a fiatal, középkorú, jól képzett férfi fogyasztók rendelkeznek erősebb elfogadási hajlandósággal, ha ilyen járművekről van szó. A vásárlás során fontos szempontként jelentek meg a hatótávolság, a töltéssel kapcsolatos problémák és a beszerzési költségek. Liao emellett kiemelte azt is, hogy a pénzügyi, műszaki és infrastrukturális jellemzők is jelentős hatást gyakorolnak az elektromos járművek választására. E szerzők az adócsökkentési politikákat hatékonyak találták, míg más szakpolitikai intézkedések (pl. árképzés) hatását továbbra is ellentmondásosnak tekintik.

Az elektromos energiaforrások, amelyeket az elektromos járművek üzemanyagként használnak, megváltoztathatja az elektromos járművek szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére gyakorolt hatását (Lin - Wu 2021). Lin és Wu kiemeli, hogy mivel a villamosenergia-termelésben felhasznált energiaforrások eltérőek, a hálózati rendszer szénlábnyoma az energiapolitikától, a földrajzi helytől és a napszaktól függően különböző lehet. Ennek köszönhetően, figyelembe véve a jövőbeli elektromos járművek előrejelzéseit is, létfontosságú, hogy a töltési igényeket alacsony szén-dioxid-kibocsátású energiaforrásokkal elégítsük ki.

A globális elektromos járművek piacának mérete gyorsan nőtt az elmúlt évtizedben, a könnyű és nagy teherbírású elektromos járművek összlétszáma 2020 végére elérte a 10 milliót, illetve az 1 milliót (McKerracher et al., 2021). A BloombergNEF szerint a piaci kilátások szerint 2040-re az elektromos járművek adják majd az újautó-eladások 58%-át. Az elektromos járművek világpiacát Kína, az Egyesült Államok (USA) és Európa uralja (Bigra et al., 2021).

A szakirodalom az elektromos járművek alábbi típusainak elemzésére helyezi a hangsúlyt: a hibrid elektromos járművek (HEV) (Ehsani et al., 2018), a plug-in hibrid elektromos járművek (PHEV) (Mui, 2007), az akkumulátoros elektromos járművek (BEV) (Ehsani et al., 2018; Standage, T. 2021, NationalGrid, 2021), és az üzemanyagcellás elektromos járművek (FCEV) (Dik et al., 2022).

Európában a német elektromos járművek piaci részesedése a legnagyobb, 395 000 új regisztrációval, ezt követi Franciaország (185 000 EV) és az Egyesült Királyság (176 000 EV).

Az Európai Unió (EU) országaiban erőteljesen növekszik az elektromos autók eladásának aránya olyan országokban, mint Norvégia és Hollandia, ahol az újonnan regisztrált autók aránya 75, illetve 25 százalék. Ez valószínűleg tovább fog gyorsulni, mivel ezek közül az országok közül sok fokozatosan megszünteti a benzines és dízelmotoros autók értékesítését, és az elektromos járművek akkumulátortöltő infrastruktúrájának fejlesztését tervezik a következő évtizedben (Pickett et al., (2021).

Egyes országok elektromos járművek piaci helyzete

	Kanada	Kína	Franciaország	Németország	Japán	Egyesült Államok
EV flották [egység]	Összesen: 209 171 BEV: 127 487 PHEV: 81,588 FCEV: 96	Összesen: 4 514 114 BEV: 3 512 477 PHEV: 996 191 FCEV: 5446	Összesen: 416 585 BEV: 281,603 PHEV-k: 134 607 FCEV: 375	Összesen: 634 236 BEV: 330 780 PHEV-k: 302 644 FCEV: 812	Összesen: 297 181 BEV: 136 700 PHEV: 156 381 FCEV: 4100	Összesen: 1 787 221 BEV: 1 138 654 PHEV: 639 432 FCEV: 9135
EV értékesítés Részvény [%]	az új autók 4,2%-a	az új autók 5,7%-a	11,3%-a az újnak autók	13,5%-a az újnak autók	az új autók 0,6%-a	az új autók 2,0%-a

Forrás: Abergel, 2021.

Az FCEV-k egy fedélzeti üzemanyagcellát használnak, amely a hidrogén üzemanyagot közvetlenül elektromos energiává alakítja, és akkumulátorban tárolja az elektromos motor meghajtására, valamint az autó egyéb kiegészítőinek meghajtására. 1966-ban a General Motors elkészítette az első FCEV-t, a GMC Electrovant, 112 km/h maximális sebességgel és 193 km hatótávval. Ezt a járművet azonban nem lehetett tömeggyártásba helyezni a hidrogéntermelés és az üzemanyagcella-köteggel kapcsolatos követelménye miatt (Qin, 2014).

A négy típusú elektromos jármű fő előnyeit és hátrányait a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat Elektromos járművek előnyei és hátrányai

EV típus	HEV-k	PHEV-k	BEV-k	FCEV-k
Strength	Alacsonyabb károsanyag-kibocsátás az ICE járműveknél	Alacsonyabb emisszió, mint a HEV-eknél	Nincs emisszió vagy nagyon alacsony	Nincs emisszió vagy nagyon alacsony
	Magas üzemanyag-hatékonyság	Magas üzemanyag-hatékonyság	Magas energiahatékonyság	Magas hatásfok
	Nincs sok probléma a töltőállomással	Sokféle üzemanyag/Nincs távolsági szorongás	Olajtól független/alacsony motorzaj	Független tőle az elektromosság
Weakness	Összetett technológia/magasabb költség	Komplex technológia	Magas beszerzési és akkumulátorköltség	Magas üzemanyagcella költség
	Az energiaforrások kezelése	Az energiaforrások kezelése	Töltőállomás problémák	Technikai kihívás és költség probléma
	Fosszilis tüzelőanyag/nehezebb kipufogócső-kibocsátás	Nehezebb kipufogócső-kibocsátás	Elemcsere követelmény	H 2 generálás problémái

Forrás: Kebriaei 2015 és Agarwa 2019

Lipman (2018) tanulmánya szerint a hidrogén üzemanyagcellás járműveket a General Motors „Electrovan” 1966-os bemutatása óta fejlesztik. A hivatkozott tanulmány azt is kiemeli, hogy a legújabb hidrogén meghajtású járművek már 4-5 perc alatt képesek tankolni, hatótávolságuk pedig körülbelül 450-580 kilométer, amely azonos a fogyasztók korábbi, a benzin- és dízelmotoros járművekkel szemben támasztott elvárásaival.

A fenti rövidítést használva a FCEV-k kapcsán kiemelendő, hogy azok számos olyan alkatrészt tartalmaznak, mint a BEV-k, például elektromos motorokat és teljesítményvezérlőket vagy invertereket, azonban a legfontosabb különbség a fő energiaforrásban rejlik: amíg ugyanis a BEV-ek az akkumulátorban tárolt energiát használják fel, az FCEV-k üzemanyagcellákat használnak. Az üzemanyagcellák könnyebbek és kisebbek, ráadásul mindaddig képesek áramot termelni, amíg az üzemanyagot szállítják (Pollet et al., 2014). Az üzemanyagcella egy olyan elektrokémiai eszköz, amely a hidrogén kémiai energiáját elektromos energiává és hővé alakítja (Hayes - Goodarzi, 2018). Az üzemanyagcella által termelt energia közvetlenül táplálhatja a jármű vontatómotorját, vagy tárolható akkumulátorban vagy ultrakondenzátorban. Egyes szerzők ugyanakkor kiemelik, hogy az üzemanyagcellák összetett szerkezete és anyagtulajdonságai miatt teljesítményromlásukat könnyen befolyásolják a vezetési körülmények, amelyek magas üzemeltetési költséget eredményeznek (Quan et al., 2021).

A hidrogén meghajtású járművek életciklus-értékelésével (LCA) kapcsolatban Ahmadi és Kjeang (2020) arra a következtetésre jutott, hogy valós vezetési körülmények között az elektrolízisből származó hidrogén akár 72%-kal is csökkentheti az ÜHG-kibocsátást.

Ahmadi és Khoshnevisan (2022) egy nemrégiben közzétett tanulmányában egy hidrogén üzemanyagcellás jármű dinamikus modelljét használta a teljesítmény szimulálására az üzemanyagcella-romlás hatását is vizsgálva. A kutatás arra világított rá, hogy hatezer óra működés után az üzemanyagcella 11,1%-os feszültségesést produkál, ami 14,3%-os üzemanyagfogyasztás-növekedést eredményezett. Az átfogó - mind az üzemanyag-, mind a járműciklusokat figyelembe vevő - életciklus-értékelés rámutatott arra is, hogy a nukleáris energiára épülő termokémiai vízbontás és a napenergiával végzett elektrolízis jelentős CO₂-kibocsátás csökkenést okozott a benzines járművekhez képest. Hasonlóan kedvező eredményeket mutatott a VOC-kibocsátás elemzése is.

A hidrogén meghajtású járművek elterjedésének nehézségei

A hidrogén meghajtású járművek piaci elterjedését még számos tényező hátráltatja: az üzemanyagcellás járművek egyik legnagyobb akadály a közös hálózaton való elosztás hiánya, valamint a gáz- és a cseppfolyósított hidrogén fázis relatíve magas költsége (Grüger et al., 2018). Emellett a piacra jutás feltételeit jelentősen befolyásolja az ilyen gépjárművek működtetéséhez, karbantartásához kapcsolódó infrastrukturális elemek hézagossága is.

A hidrogénellátás a teljes folyamatot jelenti a hidrogéngáz előállításától a végső vásárló fogyasztásáig. A hidrogén ellátás infrastrukturális elemei pedig a teljes folyamathoz szükséges különféle eszközöket és infrastruktúraelemeket foglalják magukban.

A hidrogén előállítására már utaltunk, ezért itt az ellátási lánc további elemeit említjük röviden. A hidrogén az állapottól függően gáz, folyékony vagy szilárd halmazállapotban tárolható, azonban a sűrített gázként történő tárolása a legelterjedtebb (Cho, Set al., 2021). Ebben a formában azonban nem alkalmas tömeges hidrogéntárolásra a szivárgási problémák révén, ezért nagy mennyiségű hidrogén tárolásának szükségessége esetén általában a folyékony állapotot részesítik előnyben. A cseppfolyósított hidrogén tárolási sűrűsége négyszer nagyobb, mint a 200 bar nyomásra sűrített hidrogéngázé és biztonságosabb is, azonban ennek kialakításához jelentős infrastrukturális beruházások szükségesek (Yanxing et al., 2019) mint például a tároló, szállító, az igénybevételt támogató rendszerek. A szilárd hidrogént fém-hidridekben tárolják alacsony nyomáson, az ilyen tárolási kapacitás azonban viszonylag alacsony, 0,06 kg/l, és meglehetősen költséges (Tarasov et al., 2021).

A hidrogén tárolása mellett jelentős kihívást jelent annak szállítása is. A hidrogén szállítása többnyire a hidrogéntárolás típusától függ. A hidrogéngáz csővezetéken vagy csőszállító utánfutón szállítható. Mivel a csővezeték-hálózat meglehetősen drága, az ilyen megoldás általában csak akkor gazdaságos, ha nagy mennyiségű hidrogént szállítanak (Dyatkin, B., 2018).

A cseppfolyósított hidrogén folyékony hidrogén tartálykocsival is szállítható, azonban ennél a technológiánál maga a cseppfolyósítás költséges folyamat, és a szállítás során csak kis mennyiség szállítható egyszerre (Staffell et al., 2017).

A megfelelő helyre szállított és tárolt hidrogén töltésére sajátos infrastrukturális elemek szükségesek. A hidrogéntöltő-állomásokat vagy helyileg vagy telephelyen kívülről látják el hidrogénnel. Az előbbi esetében a hidrogéntermelő létesítmény, az utóbbi esetében pedig a hidrogén költséges szállítása jelent gazdasági akadályt

(Kumar et al., 2022). Engel azt is kiemelte, hogy a töltési infrastruktúrákhoz való elégtelen hozzáférés akadályozza a fogyasztók döntését a környezetbarát járművek vásárlásával kapcsolatban (Engel et al., 2018).

Az infrastrukturális fejlesztési szükségletek mellett számos olyan tényező is a jelenleg folyó nemzetközi kutatások központi kérdését képezi, amelyek a hidrogén igénybevételével működő közlekedési eszközök megfelelőségének egyes aspektusait vizsgálják. Ilyen például a Tanc (2020) által kiemelt tartósság és megbízhatóság. A hidrogén alapú gépjármű működtetése kapcsán ugyanis a kimunkált új járművek megbízhatóságának és tartósságának javítása, a hidrogén üzemanyagcellás járművekkel kapcsolatos autóiipari kutatások egyik fontos kérdésköre.

Az ilyen gépjárművek kapcsán számos biztonsági kérdéssel összefüggő kutatás van folyamatban: az egyik jelentős kihívás a hidrogén megfelelő tárolása és szállítása. A gáz halmazállapotú hidrogén kezelésére és szállítására használt anyagok különböző tulajdonságai (hajlékonyság, törés és kifáradás) a hidrogénnek való kitettség következtében lényegesen leromlanak (Marchi et al., 2017).

Mivel a hidrogén gyorsabban szivárog, mint más gázok (Foorginezhad, 2021), és más tüzelőanyagokhoz képest jelentősen széles gyúlékonysági tartománynak köszönhetően sokkal könnyebben meggyullad (Sánchez, 2014), a megfelelő biztonsági előírások elengedhetetlenek a hidrogén távozásának elkerülése érdekében.

A biztonsági faktorok kapcsán számos szerző foglalkozik a hidrogénkibocsátás érzékelésére és felügyeletére szolgáló érzékelők (hidrogéndetektorok) használatával, amelyek a rendszerek automatikus érzékelésére, illetve leállítására, riasztások és szellőzőrendszerek aktiválására, valamint a vészhelyzeti reagálók figyelmeztetésére alkalmazhatók (Rivkin, 2016).

Érdemes utalnunk arra is, hogy a hidrogéntechnológia a közlekedési ágazatban alternatív üzemanyagként való alkalmazását és elterjedését jelentős mértékben meghatározza a hidrogén jelenlegi és jövőbeni költsége, a hidrogén üzemanyagként való felhasználásának technológiai előnyei az üzemanyagcellák használatakor, az üvegházhatású gázok kibocsátásának hosszú távú korlátozásai és a versenyképes technológiák költségei (Khrouz et al., 2020).

Összegzés

Az elmúlt időszakban jelentős előrelépés történt a hidrogén üzemanyagcellás gépjárművek technológiai, infrastrukturális és gazdaságossági feltételeinek hatékonyabbá tétele érdekében. A szakirodalmi kutatások egy meghatározó fókuszterülete a hidrogén közlekedési ágazatba történő integrálása. A hidrogén a legnagyobb mennyiségben előforduló elem. Az energiahozama magas, 120 MJ/kg, ami körülbelül 2,75-ször nagyobb, mint a szénhidrogén üzemanyagoké és körülbelül 2,6-szor több energiát tárol tömegegységként, mint a benzin (Balat, 2005). A hidrogénüzemű járművek hozzájárulhatnak a közúti járművek CO₂ és egyéb üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez vagy megszüntetéséhez (Ball, 2009). A hidrogén attraktivitása azzal is indokolható, hogy a hidrogén felhasználható üzemanyagként a már kifejlesztett belső égésű motorokban, hiszen működése nem különbözik nagyban a belső égésű motoroknál használt egyéb gáz halmazállapotú üzemanyagoktól.

A kapcsolódó fejlesztések drasztikusan megnövekedtek az elmúlt néhány évben és a fogyasztói érdeklődés is pozitív tendenciákat mutat.

Lipmann (2018) tanulmányában többek között arról is beszámol, hogy az önkéntes vezetőknek milyen tapasztalatai vannak a hidrogén meghajtású járművekkel összefüggésben. A tanulmány szerint a vizsgálatban részt vevő járművezetők 80%-a úgy találta, hogy az üzemanyagcellás jármű teljesítménye „meghaladta” vagy „nagy mértékben meghaladta” az elvárásait, 98%-uk szerint a hidrogén a járművek üzemanyagaként „olyan biztonságos” vagy „biztonságosabb”, mint a benzin. A résztvevők 94%-a „olyan biztonságosnak” vagy „biztonságosabbnak” tartotta a járművek hidrogénnel való feltöltésének folyamatát, mint a benzines üzemanyag esetében. A résztvevők 62%-ának legalább egy utazást le kellett mondania hidrogénüzemanyag hiánya miatt, és bár a résztvevők 75%-a teljesen vagy többnyire megfelelőnek ítélte a jármű hatótávolságát, ha az üzemanyag-infrastruktúra rendelkezésre állása nem jelentene problémát, és az üzemanyag kilométerenkénti költsége egyenlő lenne a benzinnel, a résztvevők 75%-a hajlandó lenne áttérni erre a technológiára.

A technológia ugyanakkor még számos kihívás előtt áll, amelyek megfelelő szabályozással, ösztönző- és támogatáspolitikai eszközökkel, a kapcsolódó kutatás-fejlesztési tevékenység fokozásával hamarosan felszámolhatóvá válhatnak.

Felhasznált irodalom

- Abergel, T.- Bunsen, T.- Gorner, M.- Leduc, P.- Pal, S.; Paoli, L.- Raghavan, S.- Tattini, J.- Teter, J.- Wachche, S.- et al. Global EV Outlook 2020|Entering the Decade of Electric Drive? IEA: Paris, France, 2020.
- Agarwal, O.P.- Jhunjhunwala, A.- Kaur, P.-Yadav, N.-Chakrabarty, S.- Kumar, P.- Pai, M.-Bhatt, A. A Guidance Document on Accelerating Electric Mobility in India; WRI India: Mumbai, India, 2019.
- Agnolucci, P. - McDowall, W. (2013). Designing future hydrogen infrastructure: Insights from analysis at different spatial scales. *International journal of hydrogen energy*, 38(13), 5181-5191.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.042>
- Ahmadi, P. - Khoshnevisan, A. (2022). Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26758-26769.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.215>
- Ahmadi, P.-Torabi, S. H.- Afsaneh, H.-Sadegheih, Y.- Ganjehsarabi, H. - Ashjaee, M. (2020). The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(5), 3595-3608.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.165>
- Anwar, Muhammad Azfar - Dhir, Amandeep - Jabeen, Fauzia - Zhang, Qingyu
- Arbis, D.- Rashidi, T.H.- Dixit, V.V.-Vandebona, U. (2016). Analysis and planning of bicycle parking for public transport stations. *Int. J. Sustain. Transport*. 10 (6), 495-504. <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1010668>
- <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1010668>
- Ardo, F. M.- Lim, J. W.- Ramlı, A.- Lam, M. K.- Kiatkittipong, W.- Abdelfattah, E. A.- Sahrin, N. T. (2022). A review in redressing challenges to produce sustainable hydrogen from microalgae for aviation industry. *Fuel*, 330, 125646.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125646>
- Bachand-Marleau, J.- Larsen, J.- El-Geneidy, A.M. (2011). Much-Anticipated Marriage of Cycling and Transit: How Will It Work? *Transp. Res. Rec.* 2247 (1), 109-117.
<https://doi.org/10.3141/2247-13>.
- Balat, M. (2005). Current alternative engine fuels. *Energy sources*, 27(6), 569-577.
<https://doi.org/10.1080/00908310490450458>
- Balcombe, P.- Speirs, J.- Johnson, E.- Martin, J.- Brandon, N. - Hawkes, A. (2018). The carbon credentials of hydrogen gas networks and supply chains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1077-1088.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.089>
- Ball, M. - Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen—opportunities and challenges. *International journal of hydrogen energy*, 34(2), 615-627.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014>
- Barbieri, D.M.- B. Lou, M. - Passavanti, C. - Hui I. - Hoff, D. Antunes Lessa- G. Sikka, et al. (2021). "Impact of COVID-19 Pandemic on Mobility in Ten Countries and Associated Perceived Risk for All Transport Modes." *PLOS ONE* 16 (2): e0245886. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245886>.
- Barrios, J. M. - Hochberg, Y. V. (2020). Risk perception through the lens of politics in the time of the COVID-19 pandemic (No. w27008). National Bureau of Economic Research.
<https://doi.org/10.3386/w27008>.
- Bhandari, R.- Trudewind, C. A. - Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis—a review. *Journal of cleaner production*, 85, 151-163.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>
- Bhaskar, A.- Assadi, M. - Nikpey Somehsaraei, H. (2020). Decarbonization of the iron and steel industry with direct reduction of iron ore with green hydrogen. *Energies*, 13(3), 758.
<https://doi.org/10.3390/en13030758>
- Bigra, E.M.- Connelly, E.- Gorner, M.- Lowans, C.; Paoli, L.- Tattini, J.- Teter, J.- LeCroy, C.-nMacDonnell, O.- Welch, D. et al. Global EV Outlook 2021|Accelerating Ambitions Despite the Pandemic; IEA: Paris, France, 2021.
- Bockris, J. N.- Vezirođlu, T. N. (1983). A solar-hydrogen economy for USA. *International Journal of hydrogen energy*, 8(5), 323-340.
[https://doi.org/10.1016/0360-3199\(83\)90048-4](https://doi.org/10.1016/0360-3199(83)90048-4)
- Boukhanouf, R. Electric Vehicles: V2G for Rapid, Safe, and Green EV Penetration. *Energies* 2022, 15, 803. <https://doi.org/10.3390/en15030803>
- Buehler, R.- Pucher, J. (2021). COVID-19 Impacts on Cycling, 2019–2020. *Transport Reviews* 41 (4), 393–400. <https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1914900>.
- Chen, Y.- Lan, L.- Hao, Z. - Fu, P. (2022). Cradle-grave energy consumption, greenhouse gas and acidification emissions in current and future fuel cell vehicles: study based on five hydrogen production methods in China. *Energy Reports*, 8, 7931-7944.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.021>
- Cho, S. M.- Kim, C.- Kim, K. S. - Kim, D. K. (2021). Lightweight hydrogen storage cylinder for fuel cell propulsion systems to be applied in drones. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 194, 104428.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104428>
- Cui, Q.- He, L., Liu, Y.- Zheng, Y.- Wei, W.- Yang, B. - Zhou, M. (2021). The impacts of COVID-19 pandemic on China's transport sectors based on the CGE model coupled with a decomposition analysis approach. *Transport Policy*, 103, 103-115.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.01.017>
- Dagdougui, H. (2012). Models, methods and approaches for the planning and design of the future hydrogen supply chain. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6), 5318-5327.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.08.041>
- Dawood, F.- Anda, M. - Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847-3869.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 37(2), 1954-1971.
- Dyatkin, B. (2018). Energy focus: structural water plays key role in hybrid energy-storage device. *MRS Bulletin*, 43(8), 567-568.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- Ehsani, M.- Gao, Y.- Longo, S.- Ebrahimi, K. M. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
https://www.researchgate.net/publication/266672706_Modern_Electric_Hybrid_Electric_and_Fuel_Cell_Vehicles
- Engel, H.- Hensley, R.- Knupfer, S. - Sahdev, S. (2018). Charging ahead: Electric-vehicle infrastructure demand. McKinsey Center for Future Mobility, 8.
- Fang, X.- Wang, Y.- Dong, W.- Yang, Q.- Sun, S. (2023). Optimal energy management of multiple electricity-hydrogen integrated charging stations. *Energy*, 262, 125624.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125624>
- Fiorello, D.- Zani, L. (2015). EU Survey on Issues Related to Transport and Mobility; JRC Science and Policy Report: Seville, Spain.
- Foorginezhad, S.- Mohseni-Dargah, M.- Falahati, Z.- Abbassi, R.- Razmjou, A. - Asadnia, M. (2021). Sensing advancement towards safety assessment of hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 489, 229450.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229450>
- Gholamian, E.- Mehr, A. S.- Yari, M. - Carton, J. G. (2023). Dynamic simulation and techno-economic assessment of hydrogen utilization in dual fuel (Hydrogen/biogas) micro gas turbine systems for a wastewater treatment plant. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 220-237.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.045>
- Griffiths, S.- Sovacool, B. K.- Kim, J.- Bazilian, M. - Uratani, J. M. (2021). Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options. *Energy Research & Social Science*, 80, 102208.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102208>
- Grüger, F.- Dylewski, L.- Robinus, M. - Stolten, D. (2018). Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. *Applied energy*, 228, 1540-1549.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.014>
- Hayes, J. G. - Goodarzi, G. A. (2018). Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles.
 DOI:10.1002/9781119063681
- Hilbert, M.- López, P. (2011). The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. *science*, 332(6025), 60-65.

DOI: 10.1126/science.1200970

Hobohm, J.- der Maur, A. A.- Dambeck, H.- Kemmler, A.- Koziel, S.- Kreidelmeyer, S.- Apfelbacher, A. (2018). „Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende “. Prognos AG.

Hwangbo, S.- Heo, S.- Yoo, C. (2018). Network modeling of future hydrogen production by combining conventional steam methane reforming and a cascade of waste biogas treatment processes under uncertain demand conditions. *Energy Conversion and Management*, 165, 316-333.

DOI:10.1016/j.enconman.2018.03.069

History-Fuel Cells Work History—FuelCellsWorks. <https://fuelcellworks.com/knowledge/history/> (A letöltés dátuma: 2023. 01.19.).

IEA. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. Paris, France: IEA.

Inci et al (2022). A choice experiment on preferences for electric and hybrid cars. *Transportation Research Part D*.

Ireson, R.- Fuller, A.- Woods, J.- Simon, R.- Andrews, G.- Bingham, P. (2019). *Alternative Fuel Switching Technologies for the glass sector: Final Report*. Glass. Futures.

Jovan, D. J. - Dolanc, G. (2020). Can green hydrogen production be economically viable under current market conditions. *Energies*, 13(24), 6599.

<https://doi.org/10.3390/en13246599>

Kebriaei, M. - Niasar, A.H.- Asaei, B. (2015). Hybrid electric vehicles: An overview. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Shenzhen, China, 19–23 October 2015.

Khzouz, M.- Gkanas, E. I.- Shao, J.- Sher, F. - Beherskyi, D.- El-Kharouf, A. - Qubeissi, M. A. (2020). Life cycle costing analysis: Tools and applications for determining hydrogen production cost for fuel cell vehicle technology. *Energies*, 13(15), 3783.

<https://doi.org/10.3390/en13153783>

Kurzweil, P.- Garche, J. (2017). Overview of Batteries for Future Automobiles. In *Lead-Acid Batteries for Future Automobiles*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 27–96.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63700-0.00002-7>

Lahnaoui, A.- Wulf, C. - Dalmazzone, D. (2021). Optimization of hydrogen cost and transport technology in France and Germany for various production and demand scenarios. *Energies*, 14(3), 744.

<https://doi.org/10.3390/en14030744>

Lesmana, L. A.- Aziz, M. (2023). Adoption of triply periodic minimal surface structure for effective metal hydride-based hydrogen storage. *Energy*, 262, 125399.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125399>

Li, L. - Manier, H. - Manier, M. A. (2019). Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 342-360.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.060>

Lin, B.- Wu, W. (2021). The impact of electric vehicle penetration: A recursive dynamic CGE analysis of China. *Energy Econ*. 94, 105086.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105086>

Li, S.- Zhang, H.- Nie, J.- Dewil, R.- Baeyens, J.- Deng, Y. (2021). The direct reduction of iron ore with hydrogen. *Sustainability*, 13(16), 8866.

DOI:10.3390/su13168866

Lipman, TE- Elke, M. - Lidicker, J. (2018). Hidrogén-üzemanyagcellás elektromos járművek teljesítménye és a felhasználói válasz értékelése: Egy kiterjesztett járművezetői vizsgálat eredményei. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (27), 12442-12454.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.172>

Li, W.- Long, R.- Chen, H.- Geng, J. (2017). A review of factors influencing consumer intentions to adopt battery electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 318-328.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.076>

Maroušek, J. (2022). Nanoparticles can change (bio) hydrogen competitiveness. *Fuel*, 328, 125318.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125318>

Martins, A. H.- Rouboa, A. - Monteiro, E. (2022). On the green hydrogen production through gasification processes: A techno-economic approach. *Journal of Cleaner Production*, 135476.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135476>

Maryam, S. (2017). Review of modelling approaches used in the HSC context for the UK. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(39), 24927-24938.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.303>

McKerracher, C.- Izadi-Najafabadi, A.- O'Donovan, A.- Albanese, N.- Soulopoulos, N.- Doherty, D.- Boers, M.- Fisher, R.- Cantor, C.- Frith, J. et al. (2020). *Electric Vehicle Outlook (EVO)*, BloombergNEF (BNEF): London, UK, 2020.

McKerracher, C.- O'Donovan, A.- Albanese, N.- Soulopoulos, N.- Doherty, D.- Boers, M.- Fisher, R.- Cantor, C.- Frith, J.- Mi, S. (2021). *Electric Vehicle Outlook (EVO)*; BloombergNEF (BNEF): London, UK, 2021.

Miocic, J.- Heinemann, N.- Edlmann, K.- Scafidi, J.- Molaei, F.- Alcalde, J. (2023). Underground hydrogen storage: A review. *Geological Society, London, Special Publications*, 528(1), SP528-2022.

<https://doi.org/10.1144/SP528-2022-88>

Mirzaei, M.- Abbas, Q.- Hunt, M.R.C.- Galejeva, A.- Raza, R. Na-Ion Batteries. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 23, 947–958.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00052-8>

Moliner, R.- Lázaro, MJ- Suelves, I. (2016). A hidrogéngazdaság felé való szakadék áthidalására szolgáló stratégiák elemzése. *Int. J. Hydrogen Energy*, 41, 19500–19508.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.006>

Moneti, M.- Di Carlo, A.- Bocci, E.- Foscolo, P. U.- Villarini, M. - Carlini, M. (2016). Influence of the main gasifier parameters on a real system for hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(28), 11965-11973.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.171>

Mui, S.- Shelby, M.- Chartier, D.- Ganss, D. (2007). *Plug-In Hybrids: A Scenario Analysis*; US Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.

Murdoch, HE - Gibb, D. - Andre, T.- Sawin, JL - Brown, A.- Randalder, L.- Andre, T.- Brown, A.- Collier, U.- Dent, C. et al. (2021). *Renewable energy 2021 – Global Status Report 2021*; In. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf (A letöltés dátuma: 2023. január 21.).

Newborough, M., - Cooley, G. (2020). Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. *Fuel Cells Bulletin*, 2020(11), 16-22.

[https://doi.org/10.1016/S1464-2859\(20\)30546-0](https://doi.org/10.1016/S1464-2859(20)30546-0)

Noussan, M. - Raimondi, P. P.- Scita, R., - Hafner, M. (2020). The role of green and blue hydrogen in the energy transition—A technological and geopolitical perspective. *Sustainability*, 13(1), 298.

<https://doi.org/10.3390/su13010298>

Panchenko, V. A. - Daus, Y. V.- Kovalev, A. A.- Yudaev, I. V. - Litt, Y. V. (2022). Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.084>

Petrescu, R. V. V.- Machin, A.- Fontanez, K.- Arango, J. C.- Marquez, F. M.- Petrescu, F. I. T. (2020). Hydrogen for aircraft power and propulsion. *International journal of hydrogen energy*, 45(41), 20740-20764.

Pickett, L.- Winnet, J.- Carver, D.- Bolton, P. (2021). *Electric Vehicles and Infrastructure*; House of Commons Library: London, UK.

Pollet, B. G.- Staffell, I.- Shang, J. L. - Molkov, V. (2014). Fuel-cell (hydrogen) electric hybrid vehicles. In *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance* (pp. 685-735). Woodhead Publishing.

<https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.685>

Puig-Arnavat, M.- Bruno, J. C. - Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2841-2851.

Rezvani, Z.- Jansson, J.- Bodin, J. (2015). Előrelépések a fogyasztói elektromos járművek bevezetésével kapcsolatos kutatásban: Áttekintés és kutatási menetrend. *Közlekedéskutatás D rész: közlekedés és környezet*, 34, 122-136.

Qin, N.- Raissi, A.- Brooker, P. (2014). *Analysis of Fuel Cell Vehicle Developments*; The Florida Solar Energy Center (FSEC): Cocoa, FL, USA.

<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-CR-1987-14.pdf>

Quan, S.- Wang, Y. X.- Xiao, X.- He, H. - Sun, F. (2021). Real-time energy management for fuel cell electric vehicle using speed prediction-based model predictive control considering performance degradation. *Applied Energy*, 304, 117845.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117845>

Rifkin, J. (2002). *The hydrogen economy: The creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth*. Penguin.

Rivkin, C. H. (2016). Hydrogen Fuel Cell Vehicle Regulations, Codes, and Standards. *Hydrogen Energy and Vehicle Systems*, 2010(2020), 311.

Sato, F.E.K.- Nakata, T. (2020). Energy consumption analysis for vehicle production through a material flow approach. *Energies*, 13, 2396.

<https://doi.org/10.3390/en13092396>

Siddiquei, Ahmad Nabeel (2023): Unconventional green transport innovations in the post-COVID-19 era. A trade-off between green actions and personal health protection, *Journal of Business Research*, 155,

DOI - <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113442>

Singh, V.- Gupta, K.- Agarwal, A. - Chakrabarty, N. (2022). Psychological impacts on the travel behaviour post Covid-19. *Asian Transport Studies*, 8, 100087.

<https://doi.org/10.1016/j.eastsj.2022.100087>

Standage, T. (2021). The Lost History of the Electric Car—And What It Tells Us about the Future of Transport. 2021. In. <https://www.theguardian.com/technology/2021/aug/03/lost-history-electric-car-future-transport> (A letöltés dátuma: 2023. december 21.).

Stephens-Romero, S. D.- Brown, T. M.- Kang, J. E.- Recker, W. W. - Samuelsen, G. S. (2010). Systematic planning to optimize investments in hydrogen infrastructure deployment. *International journal of hydrogen energy*, 35(10), 4652-4667.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.024>

Tanç, B.- Arat, H. T.- Conker, Ç.- Baltacıoğlu, E. - Aydin, K. (2020). Energy distribution analyses of an additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26344-26356.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.241>

Tiikkaja, H. - Viri, R. (2021). The effects of COVID-19 epidemic on public transport ridership and frequencies. A case study from Tampere, Finland. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100348. DOI100348. 10.1016/j.trip.2021.100348.

<https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100348>

Trapp, C. T. - Kanbach, D. K. - Kraus, S. (2022). Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 1(2), 100014.

Wappler, M.- Unguder, D. - Lu, X.- Ohlmeyer, H. - Teschke, H. - Lueke, W. (2022). Building the green hydrogen market—Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.253>

Wikramanayake, E.- Acharya, P. V. - Kapner, M. - Bahadur, V. (2021). Green hydrogen-based energy storage in Texas for decarbonization of the electric grid. In 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) (pp. 409-415). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00070>

Yap, J. - McLellan, B. (2023). A hidrogéngazdaság kutatásának, fejlesztésének és elvárásainak történeti elemzése, 1972–2020. *Környezet*. 10 (1), 11.

Yue, M.- Lambert, H. - Pahon, E.- Roche, R.- Jemei, S. - Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>

Yusaf, T.- Fernandes, L.- Abu Talib, A. R.- Altarazi, Y. S.- Alrefae, W.- Kadirgama, K. - Laimon, M. (2022). Sustainable aviation—hydrogen is the future. *Sustainability*, 14(1), 548.

DOI:10.3390/su14010548

Zementwerke, V. D. (2020). Dekarbonisierung von Zement und Beton—Minderungspfade und Handlungsstrategien.

Zhang, C.- Wei, Y.L.- Cao, P.F.- Lin, M.C. (2018). Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3091-3106.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.030>

Tudományos cikk

Import használt könnyű gépjárművek összetételének vizsgálata és javaslatok a környezetvédelmi szempontok érvényesítésére

Beküldve: 2021.11.26.
Elfogadva: 2023.08.14.
Online közzététel: 2023.12.18.

- ID DEÁK JÁNOS** vezető kutató tudományos munkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Fenntartható Közlekedés Kutatóközpont, Levegőtisztasági és Járműtechnikai Osztály deak.janos@kti.hu;
- ID GÁSPÁR-ZSOVÁN NOÉMI** osztályvezető, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Fenntartható Közlekedés Kutatóközpont, Levegőtisztasági és Járműtechnikai Osztály, gaspar.noemi@kti.hu;
- ID TELEKESI TIBOR** kutatóközpont-vezető, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Fenntartható Közlekedés Kutatóközpont, Levegőtisztasági és Járműtechnikai Osztály, telekesi@kti.hu;
- ID DR. FÖGLEIN KATALIN** A szenior kutató, tudományos munkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Fenntartható Közlekedés Kutatóközpont, Levegőtisztasági és Járműtechnikai Osztály, foglein.katalin@kti.hu,

Kivonat: A járműállomány környezetvédelmi tulajdonságok és életkor alapján történő értékelését követően javaslatokat mutatunk be arra, hogyan lehetne elősegíteni az elavult járművek importja helyett a minél kedvezőbb jellemzőkkel rendelkező használt és új járművek térnyerését a magyarországi gépjárműpiacon. Elsősorban az adószabályok átalakítására vonatkozó javaslatok várható hatását vizsgáljuk.

Kulcsszavak: járműpiaç; környezetvédelmi osztályba sorolás; gépjárműadó; regisztrációs adó

Examination of the composition of imported used vehicles and proposal for the enforcement of environmental protection aspects

Abstract: After evaluating the Hungarian vehicle fleet on the basis of the environmental characteristics and age, there are suggestions presented on how to promote the growth of used and new vehicles with the best possible characteristics in the Hungarian automotive market instead of importing technically outdated vehicles. First of all, the examination is concentrating on the expected impact of the proposals to reform the tax rules.

Keywords: vehicle market; environmental classification; vehicle tax; registration tax

Bevezetés

A KTI Közlekedéstudományi Intézet munkatársai az Innovációs és Technológiai Minisztérium megbízásából 2019-ben készítették „A hazai gépjárműállomány alakulásának elemzése a külföldről érkező használt járművek (M1, N1 kategória) tükrében és az ehhez kapcsolódó intézkedések feltárása” című tanulmányukat, a cikkben ennek megállapításai olvashatók.

Hazánkban az évente piacra kerülő személygépkocsik jelentős része használt, ráadásul döntő részben magánimport keretében kerül be az országba.

Egyértelműen kijelenthető, hogy a használtjármű-behozatalnak elsődleges oka gazdasági, vagyis olcsóbban lehet hozzájutni a járművekhez, vagy ugyanakkora összegből fiatalabb, felszereltebb járműhöz. Bár jelentős bizalmatlanság van a külföldi járművek valós állapotával kapcsolatban az előélet ismeretének hiánya és a futásteljesítmény valódisága miatt, a beszerzési ár még mindig sokat nyom a latba. Önmagában a külföldről történő járműbehozatal nem tiltandó, azonban nem mindegy a beáramló járművek életkora, műszaki színvonala és környezetvédelmi szintje. A regisztrációs díj mértéke függ a környezetvédelmi állapottól, de az avultatás miatt gyakorlatilag sosem kell a teljes összeget fizetni az idősebb járművekre, tehát az avultatás az idősebb járművek behozatalát ösztönzi. Az idős járművek behozatala esetében további ösztönző, hogy a gépjárműadó, mint folyamatosan fizetendő díj, a kor előrehaladtával csökken. A környező tagállamok intézkedéseinek megismerésére tett felmérés eredménye változó

képet fest, de jól látszik, hogy a válaszadóknál nincs kifejezett intézkedés a külföldről érkező környezetszennyező járművek importjának visszaszorítására, azonban több szabályozási és finansziális tényező együttesen ezt a célt szolgálja.

A hatást még fokozzák az európai országokban egyre nagyobb számban megjelenő alacsony emissziós zónák és fokozódó környezetvédelmi, műszaki intézkedések, szemléletformálás, amelyek miatt a használt járműkínálat nő. Az Európai Unió ambiciózus CO₂ kibocsátási céljai a következő években vélhetően felerősítik a keresletet a hagyományos meghajtású járművek iránt.

A cél nem a használt jármű behozatal ellehetetlenítése, hanem az, hogy az elhasználódott, rosszul karbantartott, környezetszennyező, idős járművek importja ne legyen előnyös lehetőség, továbbá a hibás, nem biztonságos külföldi járművek ne kerülhessenek forgalomba. Környezetvédelmi szempontból a legalább Euro 5 /Euro V szint megfelelő lenne az ösztönzendő járművekre. A cél elérése közvetlen tiltással nem kivitelezhető, a megoldás a gazdasági, műszaki környezet módosításával érhető el.

Ezt a jelenséget eddig többnyire az autózással, autóvásárlással foglalkozó sajtótermékek, internetes portálok mutatták be időről időre, egy-egy statisztikai adatot kiragadva, ám nyilvánvalóan nem tudományos igénygel.

Egy ilyen írásban állapította meg például az Alapjárat Autós Közösség portál 2021-ben, hogy: „Míg a tavalyi év folyamán új személyautókból 128 031 darabot helyeztek forgalomba, addig 130 431 külföldről behozott, használt gépkocsi kapott rendszámot hazánkban.” A publikációban megtalálható továbbá: „Összességében is jól megfigyelhető a tendencia, hogy a magyarországi járműállomány folyamatosan, egyre inkább öregszik: jelenleg az ország útjain futó autók átlagéletkora 14,4 év. Ez nagyrészt annak is köszönhető, hogy az elmúlt 5 év folyamán csaknem 110 ezerrel több import használt autót helyeztek forgalomba idehaza, mint újat”.¹

Hasonlóképpen vélekedett a Magyar Gépjárműimportőrök Egyesülete (MGE) 2019. novemberében²:

„Továbbra is kiemelten kell foglalkozni a Magyarországra beáramló használt autók korösszetételével és azzal, hogy a Nyugat-Európában levetett és szubvencióval cserélt korszerűtlen dízel és benzines autók ne árásszák el hazánkat. Az MGE sajtóközleményben és minden lehetséges fórumon sürgette és sürgeti a használt autók importjának mederbe terelését annak érdekében, hogy a fejlettebb országokban „levetett” régebbi, nagyobb károsanyag-kibocsátású autók ne, vagy ne ilyen mértékben nálunk kerüljenek forgalomba.”

2021 májusában a „vezess.hu” portál Magazin rovatában ez volt olvasható: „A legalább 10 éves autók aránya az importon belül 2020. első negyedévében 60,5%-ról 64,6%-ra nőtt”.³

A használt autók magas életkora, műszaki elavultsága többnyire gyenge karbantartottsága és műszaki állapota nem szolgálja az állomány biztonságának és környezetterhelésének, valamint üzembiztonsági színvonalának javulását, sőt egyértelműen ez ellen hat.

A szakirodalom ismeretében azt tűztük ki célul, hogy

- kvantitatív módon megvizsgáljuk, hogy a használt személygépkocsik és kishaszonjárművek milyen arányban jelennek meg a hazai állományban,
- ennek eredményei alapján milyen intézkedések javasolhatók annak érdekében, hogy javuljon a behozott személygépkocsik műszaki és környezetvédelmi színvonala. Ezt követően elemeztük a szóba jöhető intézkedések lehetséges hatásait.

Az elemzéseket és a javaslatokat azok várható hatásaival együtt részletes és terjedelmes témajelentésben ismertettük. (Gáspár-Zsován, 2020) Jelen munkában sűrített módon tesszük közzé ezek összefoglalását.

A hazai piaci viszonyok ismertetése

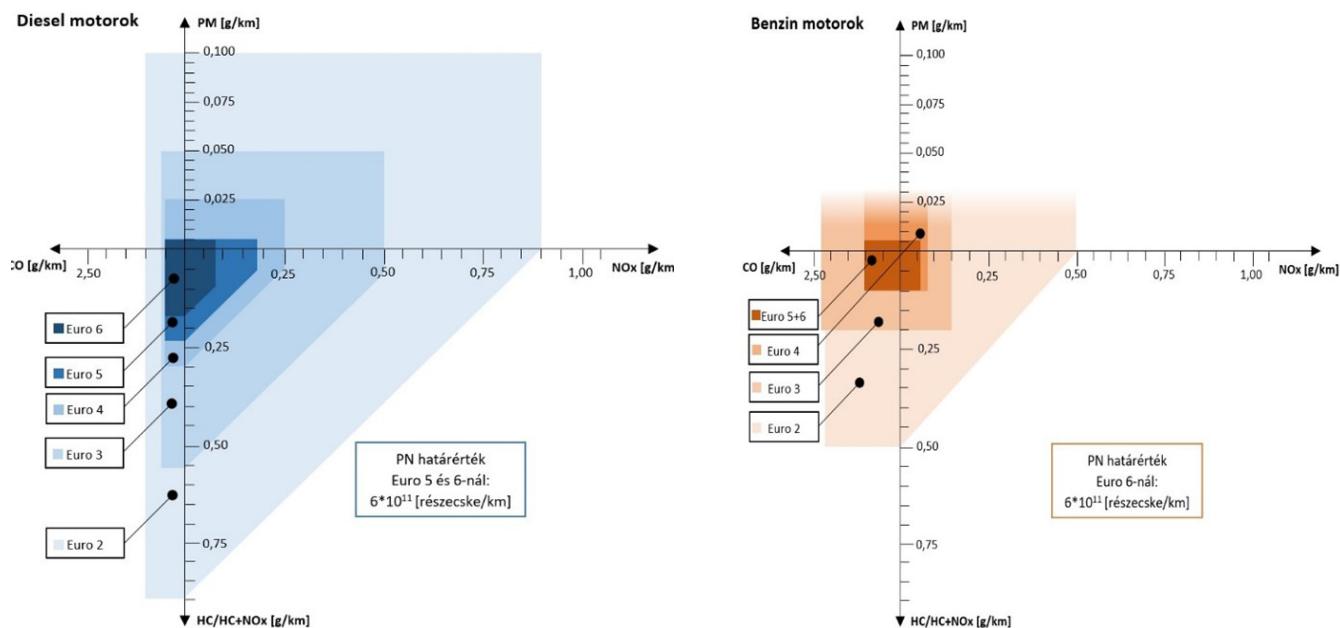
Személygépjárművek megengedett károsanyag-kibocsátása (új állapotban) az egyes Eurobesorolások követelményeinek megfelelően

További vizsgálódásaink lényegét és célját jól megvilágítja a következő két diagram (1. ábra), amelyeken látható, hogy a ma megengedett kibocsátási szintek az egyre szigorodó előírások eredményeképpen a 25 évvel ezelőttinek (Euro 2) csupán a töredékei.

¹ <https://alapjarat.hu/aktualis/nemet-modellek-uraltak-az-import-hasznalt-autok-piacat-2020-ban> (utolsó hozzáférés: 2023.01.03.)

² <https://www.vezess.hu/magazin/2019/11/14/akkor-most-megmutatjuk-mi-jon-nyugatrol-az-oroszagba/> (utolsó hozzáférés: 2023.01.03.)

³ <https://www.vezess.hu/hirek/2021/05/01/a-szigor-ellenere-oregebb-autokat-hoznak-be-kulfoldrol-a-magyarok/> (utolsó hozzáférés: 2023.01.03.)



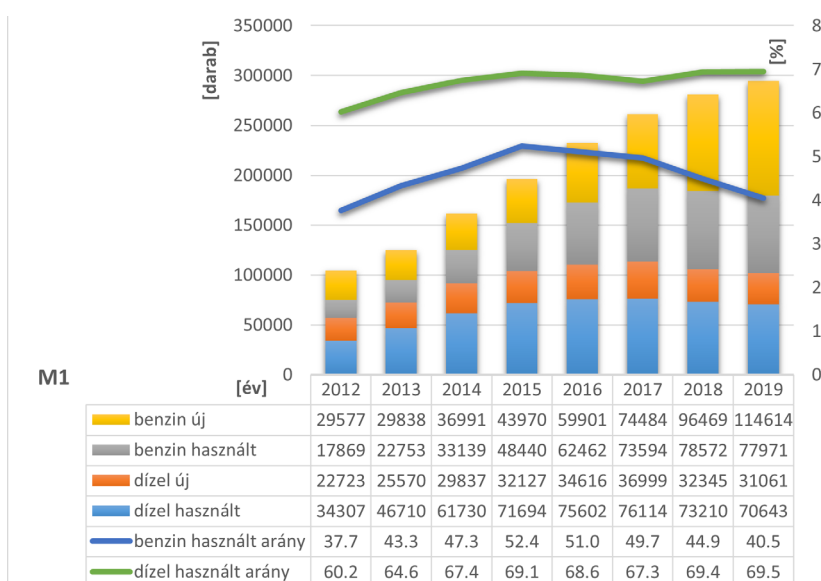
1.ábra Benzin- és dízelmotorok károsanyag-kibocsátási követelményei a különböző Euro- környezetvédelmi besorolások esetén

Forrás: <https://www.delphi.com/innovations>; <https://www.borgwarner.com/technologies/emissions-standards>

Ez egyben jelzi azt, hogy a mai behozatalban még igen komoly arányt képviselő Euro 4-es, 10 évesnél idősebb autók (beleszámítva állapotuk romlását is) milyen negatív hatással lehetnek a közlekedési eredetű légszennyezés mértékére.

A járműállományi adatok elemzése

Az alábbi, 2. ábrán látható a használtan és újonnan forgalomba helyezett M1 kategóriájú személygépkocsik darabszáma a gépjármű hajtását szolgáló tüzelőanyag szerinti bontásban. Az ábrán látható, hogy mind a használt, mind az újonnan forgalomba helyezett személygépkocsik darabszáma benzinüzem esetében növekvő tendenciát, míg dízelüzem esetében a 2017-es csúcspont után csökkenő számot mutat. Ennek a csökkenésnek az oka valószínűleg a közvélemény általi megítélés folyamatos romlása a dízelüzemű személygépkocsikkal szemben, továbbá a Nyugat-Európában már megkezdődött, főleg dízel járműveket érintő, alacsony emissziós zónák (LEZ - Low Emission Zone) létrehozásának a félelme.



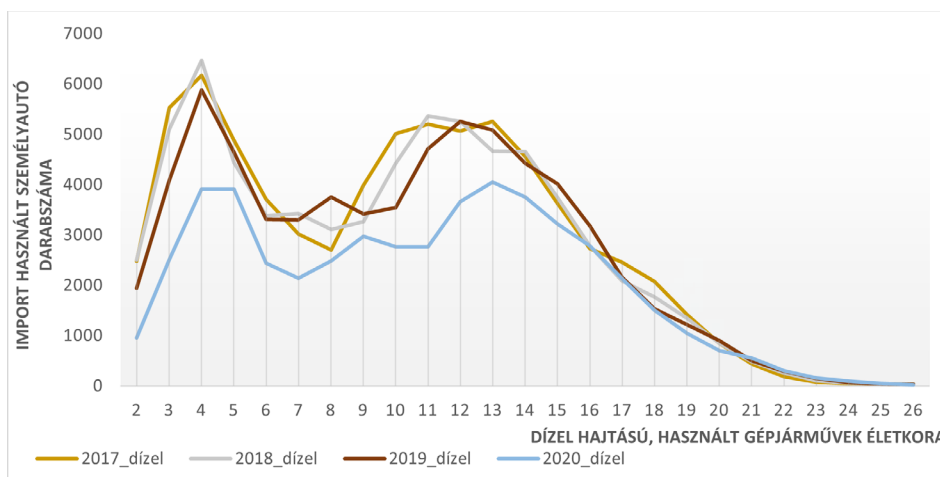
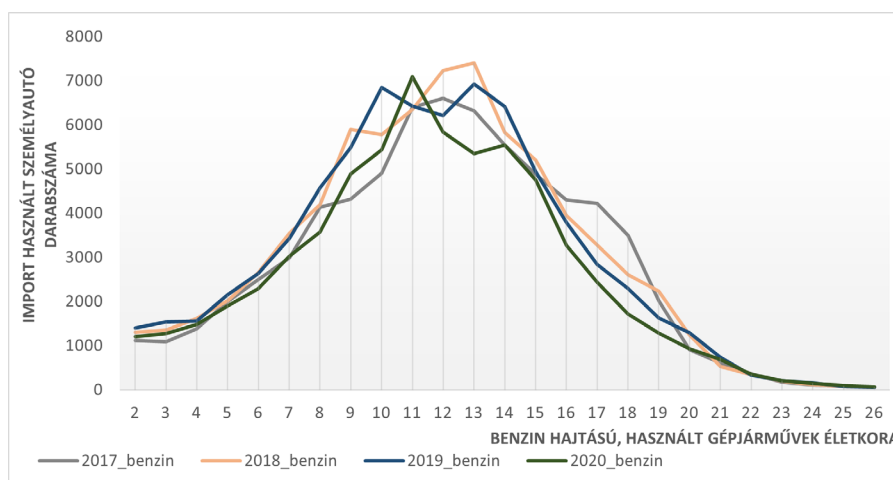
2. ábra Importált, új és használt M1 kategóriájú benzin és dízel járművek magyarországi forgalomba helyezésének éves eloszlása a darabszám függvényében

Forrás: DataHouse adatszolgáltatása a KTI részére

Mindezek mellett a 2. ábrán megfigyelhető még a használt járművek arányának alakulása a forgalomba helyezett személygépkocsik között. Jól látható, hogy a forgalomba helyezett járműveknél a dízel esetében nagyobb a használt gépkocsik aránya az új autókhoz képest, mint a benzines járművek esetében. Az ezen arányok alakulását jelző két görbe alakra hasonló, viszont ~20%-os eltérés figyelhető meg közöttük a dízel járművek javára. Ez az érték 2019-re elérte a 30%-ot, mivel a dízel járművek esetében nagyon kis mértékben nőtt 2017-től kezdődően a használt járművek aránya, míg a benzines autóknál csökkent ez az érték.

Más megvilágításban érzékelteti a fenti összefüggéseket a 3-4. ábra, amelyen követhető, hogy milyen volt az egy-egy évben behozott dízel- és benzinhajtású személygépkocsik életkorának megoszlása. Itt is látható, hogy a legtöbb használt személygépkocsi életkora a 10-15 éves sávban (az Euro 4 és Euro 5 kategória határán) mozog, és a dízelek darabszáma csökken.

Jól megfigyelhető különbség mutatkozik a benzin- és dízelüzemű személygépjárművek behozatala között. Az előbbieket eloszlását egy Gauss görbe írja le, a csúcspont 12 évnél található. A behozatal mértéke a 2017-2020. közötti időszakban, valószínűsíthetően a járvány miatt, nem mutat egységes képet. A 2017-2018. között emelkedő mennyiség a 2019-2020. közötti időszakban csökkenésbe váltott.



3-4 ábra Importált benzin- és dízelhajtású használt személygépkocsik évenkénti kor-megoszlása

Forrás: Belügyminisztérium adatszolgáltatása a KTI részére

A dízelüzeműek görbéje két csúcsponttal rendelkezik a 4. év és a 11-14. évek vonatkozásában. Az ábrán jól ki-vehető, hogy az 2017-2019. években a 4 éves életkornál látható első (6000 db/év körüli) behozatalhoz tartozó éles csúcspont, a 2020. évi görbén a 4-5 éves életkorban behozott azonos számú értékre (4000 db/év körüli) csökkent vissza, és az importált személygépjárművek összdarabszáma is csökkent.

A második csúcspont a 2017. év, a 10-13 éves életkorú (5000 db/év körüli) járművek behozataláról 2020-ra fokozatosan a 12-14 éves életkorúak behozatalára változott, és a 2017-2018-as növekvő mennyiség 2019-2020. évekre itt is csökkenésbe váltott (4000db/év körüli). A dízel üzemű, importált gépjárművek életkorfája ellaposodott, és a két csúcs elkezdett összemosódni. A tendencia mindkét hajtóanyag esetében az idősebb életkorú, és kevesebb darabszámú gépjármű behozatala felé tolódott 2017-ről 2020-ra. A 2020. évben bekövetkezett pandémia hatása a

behozatali tendenciákban a 2021. évi adatok ismeretében kerülhet meghatározásra.

Megjegyezzük, hogy a 3-4. és a 8. ábra esetében – ahol arányokat jelentetünk meg, a 2020-as évre rendelkezésre álló BM adatokat használtuk. Technikai okokból a Datahouse adatai 2020-ra nem voltak elérhetőek, viszont az abszolút darabszámok a két forrás esetében nem hasonlíthatók össze egymással, mert

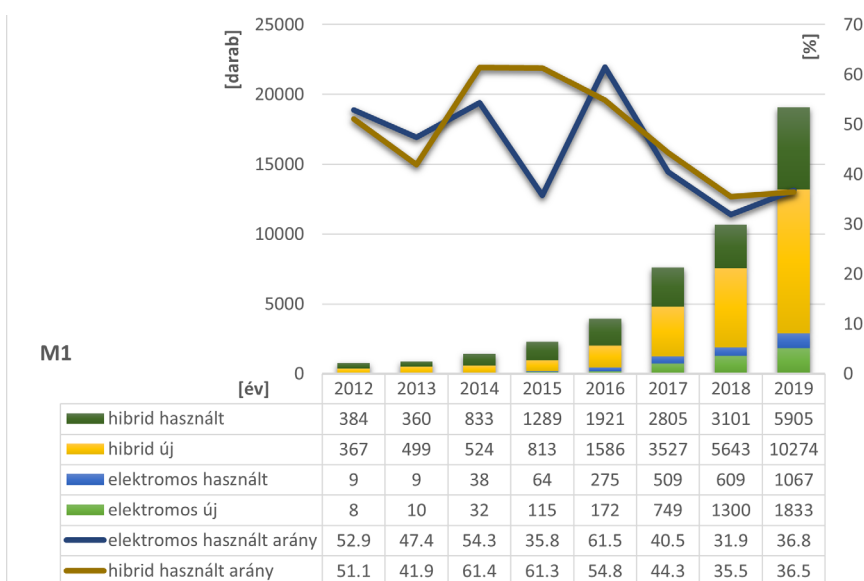
- a Datahouse éves újautó-forgalmazási adataiból nem vonják ki a viszonylag jelentős (egyes márkák és modellek esetében akár a 30%-ot is elérő) reexportot,
- az új gépjármű esetében különbség adódik az eladás évében gyártott és forgalmazott, illetve az eladást megelőző években gyártott, de a vizsgált évben, Magyarországon forgalomba először helyezettek között (amely között lehet új, vagy már használtan importált),
- illetve a használt gépkocsi definíciója is eltérő lehet a fenti okokból.

Az arányokat illetően azonban ezek a különbségek nem jelentenek torzító eltérést. Ezt csupán érdekességként említjük meg, mert a médiában általában a reexport figyelmen kívül hagyásával teszik közé az új autók forgalomba helyezési adatait.

Érdeemes vetni egy pillantást arra is, hogy miként alakul az alternatív hajtású használt személygépkocsik megjelenése a magyar autópiacon, hiszen a várakozás szerint a használt példányok a nyugat-európai új forgalomba helyezést követően az újabb modellek, megoldások (nagyobb hatótávolságot biztosító akkumulátorok) bevezetések hamarosan felbukkannak a kelet-európai használtautó-piacon. Ez az egyik oldalon kedvező a környezet-terhelés szempontjából, másrészt figyelemmel kell lenni erre a tényre a műszaki vizsgáztatás és az elhasznált akkumulátorok újrahasznosítása szempontjából is. Az 5. ábrán láthatók ezek forgalomba helyezési darabszámai, használtakra és újakra bontva, továbbá ezek arányait is feltüntettük.

Az 5. ábra szerint minden alternatív hajtás darabszáma folyamatosan emelkedik. 2016-ig a forgalomba helyezett hibrid használt járművek darabszáma magasabb volt, mint az új hibridautók darabszáma, 2017-től viszont több új hibrid hajtású személygépkocsi kerül forgalomba, mint használt, sőt az új autók darabszáma kezdi lehagyni a használtakét, valószínűleg a kapcsolódó kedvezményrendszernek köszönhetően. Érdekes tény, hogy a forgalomba helyezett alternatív hajtású használtautók aránya hasonló a benzinüzemű gépkocsikéhoz, ami ~40% volt 2019-ben. Mindezek ellenére negatívumként megemlíthető, hogy a forgalomba helyezett alternatív hajtású személygépkocsi száma továbbra is erősen elmarad a belsőégésű motoros hajtásokétól, bár az eddigi trend szerint ez néhány éven belül változni fog, mivel egyre nagyobb darabszámban kerülnek forgalomba alternatív hajtású új járművek, ráadásul az igény is egyre nagyobb mértékben növekvő.

Megfigyelhető trend, hogy mind az elektromos-, mind a hibrid importált személygépjárművek aránya csökkenő tendenciát mutat a 2016. évtől. Ebben közrejátszhat a hazai elektromosítást támogató kormányzati törekvés is.

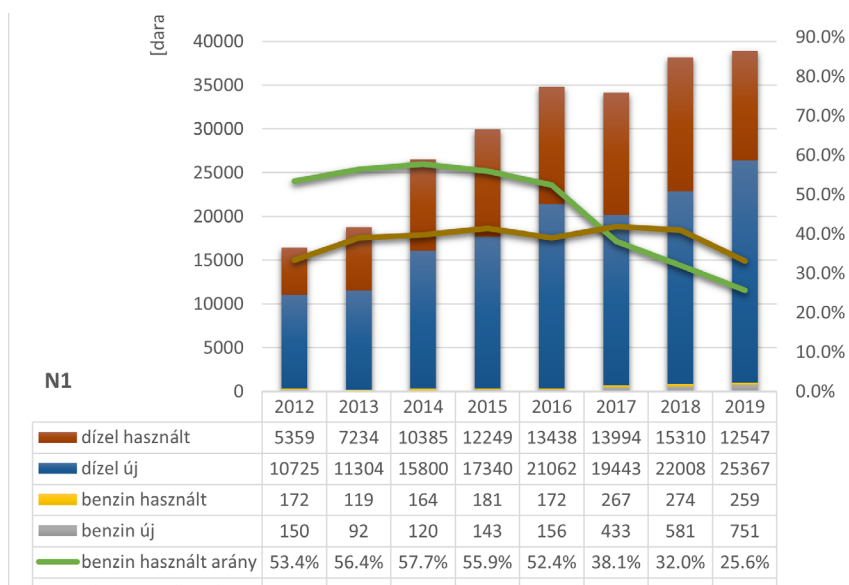


5. ábra Importált, új és használt M1 kategóriájú elektromos és hibrid járművek magyarországi forgalomba helyezésének évenkénti eloszlása a darabszám függvényében

Forrás: DataHouse adatszolgáltatása a KTI részére

A következő, 6. ábrán láthatjuk az N1 kategóriájú kishaszongépjárművek forgalomba helyezési darabszámait új és használt járművekre bontva, a benzin és dízel üzem függvényében.

Az N1 kategóriánál megfigyelhető, hogy az új kishaszongépjárművek forgalomba hozatali darabszáma töretlenül folyamatosan, évről-évre növekszik. Hasonló megállapítást tehetünk a használt járművek esetében is, viszont ezek száma 2019-ben nagymértékű csökkenést mutat. A benzinüzemű járművek darabszáma természetesen elhanyagolhatóan kevés a dízellel összevetve, mivel a kínálat is csekély ebben a szegmensben. Benzin üzem esetében megfigyelhető, hogy a használtak aránya 2014-től kezdődően folyamatosan csökkent, 2016-tól pedig nagymértékben esett, amely esés 2019-ben is kitartott. Dízel üzem esetében is a használt járművek aránya 2018-ról 2019-re nagymértékben esett. Nagyon jó hír, hogy 2019-ben az újak száma kb. kétszerese volt a használtaknak.



6. ábra Importált új és használt N1 kategóriájú járművek magyarországi forgalomba helyezésének éves eloszlása a darabszám függvényében

Forrás: DataHouse adatszolgáltatása a KTI részére

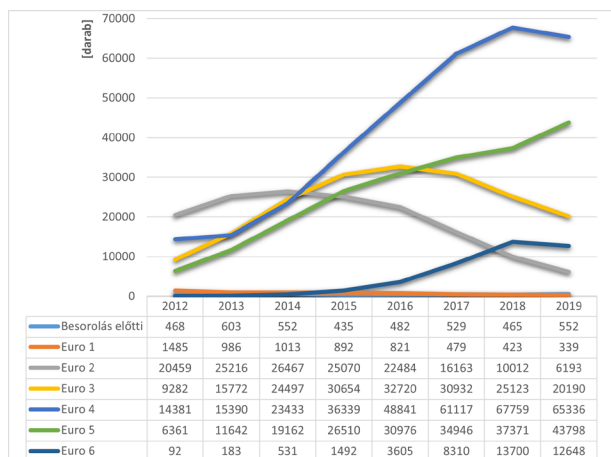
Behozott személygépjárművek összetétele környezetvédelmi besorolásuk szerint

A 7. ábrán a forgalomba helyezett használt személygépkocsik Euro besorolásra bontott darabszáma látható.

Jól láthatóan a forgalomba helyezett járművek között továbbra is az Euro 4-es besorolásúak vannak a legnagyobb számban, viszont 2019-re először csökkent a regisztrált számuk, és nagyobb mértékben ugrott az Euro 5-ös forgalomba hozatali darabszám. Ez valószínűleg a használtautó piac Euro 5-re való átállását jelzi előre, azaz az eddigi Euro 4-es személygépkocsikra irányult igény kezd áttevődni az Euro 5-ös gépkocsikra. Károsanyag-kibocsátás szempontjából ez kedvező folyamatnak tekinthető. Az Euro 5-ön kívül minden más besorolás csökkenő darabszámot mutat, kivételt képez a nagyon idős, még a besorolás előtti időszakból származó személygépkocsik száma, de összességében ezek aránya nagyon alacsony. Sajnos az Euro 6-os használt személygépkocsik száma is csökkent 2019-re.

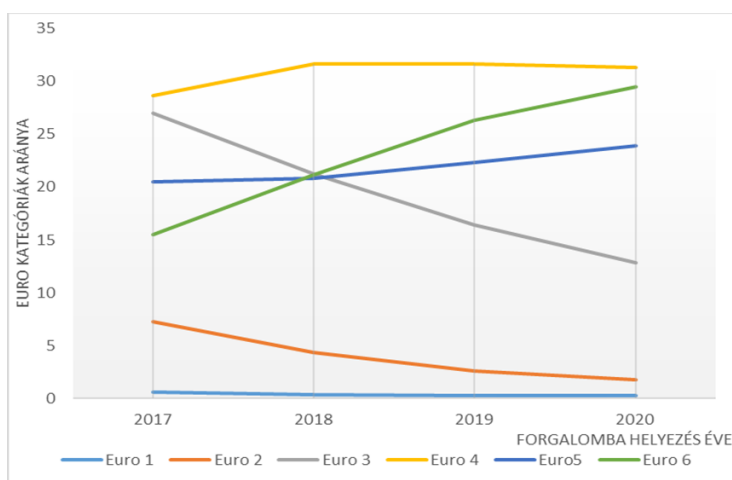
Ezeket a trendeket aláhúzza az egyes Euro-kategóriák teljes éves importált használt személyautó-darabszámon belüli arányának évenkénti alakulása (7.ábra).

A 7. és 8. ábrát szemlélve egyaránt szembeűnik, hogy a behozatal gerincét az Euro 4 és Euro 5 besorolású autók jelentik (ami az előbbieknél a legjobb esetben 15, az utóbbiak esetében 11 éves modelleket, és ennek megfelelő károsanyag-semlegesítési technológiát jelent, miközben a 15-20 éves technológia - Euro3 - is még jól észlelhető arányban jelent meg 2020-ban is). Ha ezeknek az adatoknak az ismeretében ismét vetünk egy pillantást az 1. ábrára, láthatjuk, hogy pl. mai Euro 6-os szintet az Euro 4-gyel összehasonlítva utóbbi NOx- és részecske-kibocsátása több mint ötszöröse az előbbinek. Ez a különbség az életkor során romló tulajdonságok miatt 10-15 éves korban sokkal nagyobb is lehet.



7. ábra Importált, használt M1 kategóriájú járművek magyarországi forgalomba helyezésének éves eloszlása az emissziós besorolásuk függvényében

Forrás: DataHouse adatszolgáltatása a KTI részére



8. ábra Különbé Euro-besorolású importált használt személygépkocsik aránya a teljes behozott darabszámon belül, évenkénti bontásban

Forrás: Belügyminisztérium adatszolgáltatása a KTI részére

A használt gépjárművek behozatalát visszaszorító adminisztratív és adómódosítási javaslatok

A javaslatok célja, hogy a rossz műszaki állapotú, klímavédelmi, légszennyezési és közlekedésbiztonsági szempontból elavult járművek importja helyett minél jobb műszaki és környezetvédelmi jellemzőkkel rendelkező használt és új járművek térnyerését segítse elő a magyarországi gépjárműpiacon. EU tagállamból hatósági engedéllyel behozott járművek forgalomba helyezésének direkt korlátozására nincs EU konform lehetőség. Közvetlen módon az adószabályok átalakításával, közvetett módon fokozott műszaki vizsgálatokkal és egyéb intézkedéssel együtt lehet ösztönözni a fiatalabb, alacsonyabb károsanyag-kibocsátású járművek behozatalát. A mérlegelt intézkedések között helyet kapott a közvetlen tiltás lehetősége is, azonban ennek megvalósíthatósága európai szinten aggályos.

Közvetlen hatású javaslat

KÖZVETLEN TILTÁS

A lehetőségek vizsgálatokor először a szennyező, idős járművek behozatalának közvetlen tiltása merül fel. Elvben és technikailag ez lenne az az intézkedés, amely egyértelműen és célravezetően tudná biztosítani azt a hatást, hogy ne jöjjenek be Magyarországra ilyen járművek.

E kézenfekvő lehetőségnek uniós aggályai vannak, ugyanis a nemzeti szinten történő tiltás az uniós szabad piaci elvekkel ellentétes. Ezen opció megemlítésének azonban van létjogosultsága, mivel ha az uniós közlekedési-környezetvédelmi szabályozásokat nézzük, akkor látható, hogy minden tekintetben a kibocsátások csökkentésére, az energiaforrások hatékony és fenntartható felhasználására irányulnak a célkitűzések. Bizottsági ülésekből és megbeszélésekből tudható, hogy az előregedett járművek importja jellemzően Közép és Kelet-Európa tagállamait

érinti, amelynek többször hangot is adtak, azonban a Bizottság jellemzően azt reagálja, hogy megvizsgálja, felméri a témakört. Az esetleges tagállami összefogásokkal és alapos indokolással azonban a Bizottság elé lehetne vinni a közvetlen tiltás lehetőségét.

Ha a közvetlen tiltásra lehetőség lenne, akkor azt a közúti közlekedésről szóló 1988. évi I. törvényben kellene megtenni. A törvényben a közlekedés alapvető rendelkezései szerepelnek, köztük a közúti járművek üzemeltetésének műszaki feltételei. Ebben a részben található a járművek belföldi üzemen tartásának, forgalomba helyezésének lényeges szabályozása, ahol helyet kaphatna a tiltás is. Mivel részletszabályozásra nincs szükség, elegendő csak itt szerepeltetni, hogy mely járműkategóriára és mely Euro szintre vagy környezetvédelmi osztályra terjedne ki a korlátozás.

Javaslatunk szerint műszaki szempontokból nézve az M1 és N1 kategóriájú járművek Euro 4 szintig történő behozatalát lenne helyénvaló megtiltani. Egy szerényebb esetben az Euro 3 szintig is megfelelő lehet a teljes tiltás, ha mellette egyéb, horizontális intézkedés is megvalósul, pl. az Euro 4 szint regisztrációs adótételei növekednek, így a behozatali számok itt is jelentősen csökkennének.

A regisztrációs adó tételeinek, avultatásának módosítása

JELENLEGI HELYZET

Jelenleg a regisztrációs adó és az avultatás (ami a régebbi járművekre kedvezőbb adótétel alkalmazását teszi lehetővé) nem korlátozza az idősebb, elavult károsanyag-csökkentő technikával rendelkező gépjárművek behozatalát, ezért hasznos lenne az avultatási tényezőt vagy szigorúbb feltételekhez kötni, vagy helyette egy másik tényezőt alkalmazni, amely segíti az újabb autók behozatalát és gátolja, fékezi az elavultakét.

2003. évi CX. törvény rendelkezik a regisztrációs adóról. A törvény hatálya a személygépkocsikra, lakóautókra, továbbá a motorkerékpárokra terjed ki, ezeket összefoglalóan gépjárműnek említi az előírás.

A gépjármű kategóriába, műszaki és környezetvédelmi osztályba sorolását a közlekedési hatóság a forgalomba helyezés engedélyezésének eljárásában állapítja meg, és a műszaki adatlapon rögzíti. Ezek alapján a vámhatóság az adót a törvény mellékletei alapján állapítja meg, a melléklet I. része vonatkozik az adótételekre, a II. része az avultatás mértékére. A regisztrációs adó a következő tényezők segítségével kerül meghatározásra: környezetvédelmi besorolás (ami az Euro besoroláson alapul), a jármű kora, dátum szerinti első forgalomba helyezése, hengerűrtartalma, általános műszaki jellemzők.

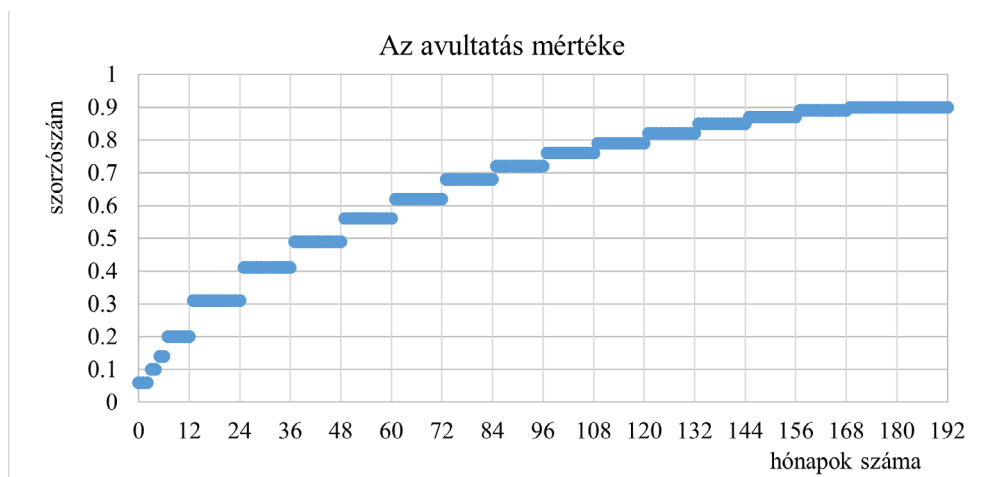
Látszik, hogy érvényesül a „szennyező fizet” elv, vagyis a nagyobb hengerűrtartalmú, és rosszabb Euro besorolású járműre magasabb az adó, azonban a személygépkocsinál a legjobb kategória esetében az Euro 5 és Euro 6 még együtt szerepel, pedig műszakilag jelentős különbséget képviselnek.

A regisztrációs adó értékét csökkenti az avultatás tényezője. A csökkentés mértéke a jármű korától függ, mégpedig úgy, hogy az autó életkorának növekedésével nő az avultatás mértéke. Példaként egy 3 éves jármű esetében a regisztrációs adó 51%-át kell kifizetni.

1. táblázat Regisztrációs adó tételek személygépkocsik esetében (a törvényben szereplő táblázat részlete)

Adó-kategória	A személygépkocsi műszaki tulajdonságai	Adótétel				
		[A személygépkocsi környezetvédelmi osztályba sorolása a közúti járművek forgalomba helyezésének és forgalomban tartásának műszaki feltételeiről szóló 6/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet 5. számú mellékletének II. pontja szerint]				
		11-nél jobb	9-11	5-8	4	4-nél rosszabb
		Euro 5 és 6 Ft/db	Euro 4 Ft/db	Euro 3 Ft/db	Euro 2 Ft/db	Euro 2-nél rosszabb Ft/db
1.	Otto-motoros személygépkocsi 1100 cm ³ -ig és dízelmotoros személygépkocsi 1300 cm ³ -ig	45 000	180 000	270 000	360 000	540 000
2.	Otto-motoros személygépkocsi 1101-1400 cm ³ -ig és dízelmotoros személygépkocsi 1301-1500 cm ³ -ig	65 000	260 000	390 000	520 000	780 000

Forrás: 2003. évi CX. törvény a regisztrációs adóról



9. ábra Az adó összegének meghatározása a gépjármű forgalomba helyezésétől számított időtartam figyelembevételével

Forrás:KTI számítás

Az elv, hogy az idősebb járműre kevesebbet kell fizetni, egyrésztől érthető, hiszen a jármű valós értékével arányos, ugyanakkor nem veszi figyelembe azt a tény, hogy az idősebb autó jobban szennyezi a környezetet, ugyanúgy rongálja az általa igénybe vett úthálózatot és többnyire kevésbé biztonságos, emiatt a mértéke komoly befolyásoló tényező a használtjármű-behozatal esetében, mivel a jelentős avultatás miatt erősen ösztönző erejű. Ez a fajta meghatározás egyértelműen és közvetlenül ösztönzi az idősebb járművek behozatalát, így ütközik az állományfrissítési törekvésekkel.

JAVASLAT

A regisztrációs adó módosítása két fronton javasolt, a személygépkocsik adótételeinek környezetvédelmi szempontból részletesebb szétválasztása, és az avultatás arányainak optimalizálása.

1. A javaslat első részébe (2. Táblázat) egy új oszlop került be a 14-es környezetvédelmi osztály feletti járműveknek, különválasztva ezzel az legújabb, Euro 6-os besorolású személygépjárműveket, az Euro 5 kategóriától.

Az Euro 6-hoz kerültek az eddigi legalacsonyabb díjtételek, amelyek eddig az összes Euro 5 felettire vonatkozott. Ennek megfelelően minden oszlop eggyel továbbugrott a díjtételek tekintetében, pl. az Euro 6-hoz kerültek az eddigi Euro 5 felettiekre vonatkozó díjak, az Euro 5 díjtételei lennének Euro 4-re eddig vonatkozóak. Az Euro 4 kapná az eredetileg Euro 3 díjat, és az Euro 3 lekerülne az Euro 2 mellé.

A táblázat másik végén így, a legrégebbi, legszennyezőbb járművek oszlopa eddig az Euro 2-nél rosszabb szintűek voltak, most ez kiegészülne az Euro 3-as járművekkel is. Ennek a módosításnak az elve az, hogy a legkevesbé szennyező szint most már az Euro 6, így annak kell lennie az első oszlopban, a legalacsonyabb adótételeknél, többi szint ennek megfelelően tolódott. Az adótételek mértéke itt nem változott, csak már más szintet tekintünk környezetbarátnak.

2. táblázat Javaslat a regisztrációs adótételek módosítására személygépkocsik esetében (a táblázat sorainak részlete)

Adó-kategória	A személygépkocsi műszaki tulajdonságai	Adótétel				
		14-nél jobb	12-14	9-11	5-8	5-nél rosszabb
		Euro 6	Euro 5	Euro 4	Euro 3	Euro 3-nál rosszabb
(ez a sor nem része a jogszabálynak, csak a jobb érthetőség miatt szerepel)						
1.	1100 cm ³	45 000 Ft/db	180 000 Ft/db	270 000 Ft/db	360 000 Ft/db	540 000 Ft/db
2.	1101-1400 cm ³	65 000 Ft/db	260 000 Ft/db	390 000 Ft/db	520 000 Ft/db	780 000 Ft/db

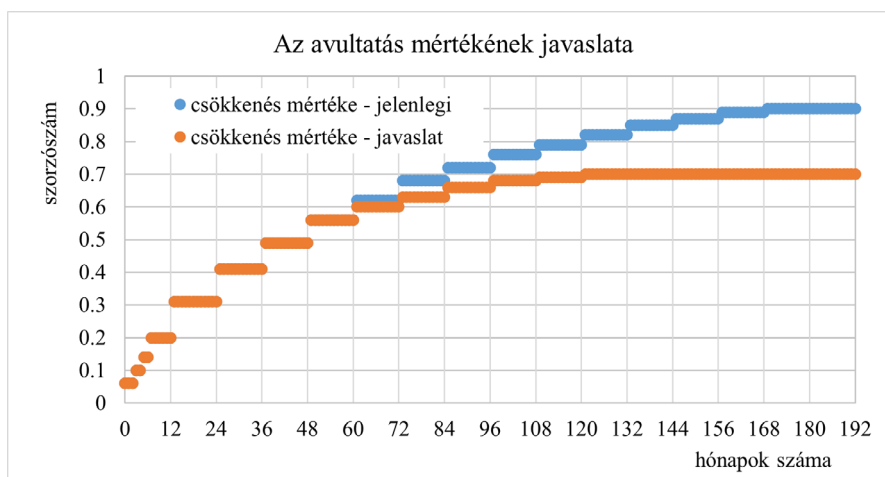
Forrás: KTI számítás

2. A második változtatás az 1-7. adókategóriákhoz kapcsolódó műszaki tulajdonságok meghatározása. Az eddigi megközelítés megkülönböztette az Otto és dízel motorokat, és figyelembe vette, hogy méretileg az egyes motoroknál mi tartozik egy csoportba.

Az 1. adókategória pl. Otto-motoros személygépkocsi 1100 cm³-ig és dízelmotoros személy-gépkocsi 1300 cm³-ig, a hengerűrtartalom eltérés abból adódhatott, hogy a dízel járművek esetében kb. 1100 cm³-nél kezdődnek a motorok, míg Otto-motornál már 800-900 cm³-esek is vannak. A javaslat megszüntetné ezt a típusú differenciálást, így átkerülnének a dízel járművek egy másik adó kategóriába, így összességében konstrukciós szempontok miatt a dízel járművekre növekedne az adó.

Az adótétel mellett az avultatás mértékének változtatása kulcsfontosságú. A jelenlegi görbe nagyon kedvez az idősebb járművek behozatalának, hiszen drasztikusan ugrik meg a csökkentés mértéke, tehát egy pár éves járműnél is már csak az összeg felét kell megfizetni. A szabályozás módosításánál cél a görbe ellaposítása.

A javaslat szerint (9. ábra) az avultatás mértéke 5 éves járműkorig az eddigiek szerint történne, hiszen az ilyen korú járművek behozatalának visszaszorítás nem cél. Ezen koron túli járművek esetében azonban a jelenlegihez képest kisebb lenne az avultatás mértéke 10 éves járműkorig, mivel ezek azok a járművek, amelyek behozatalát már nem akarjuk ösztönözni. A 10 év felett már nem változna az avultatás mértéke, az ilyen korú járművek behozatala már nem kívánt.



10. ábra Javaslatok az adó összegének meghatározására a gépjármű forgalomba helyezésétől számított időtartam figyelembevételével

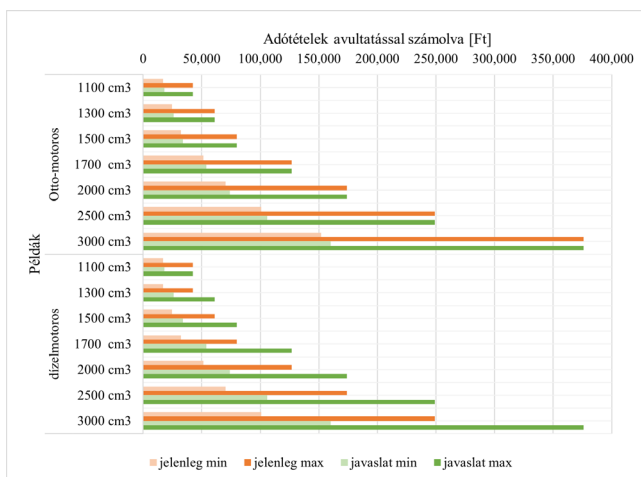
Forrás: KTI számítás

HATÁSOK

Mivel a jármű Euro besorolása dátumokhoz köthető, nagyságrendileg meghatározható, hogy az egyes javaslatokkal milyen mértékű változások következnenek be az egyes szintű és korú járművekre nézve. A következő 10., 11., 12., és 13. ábrán bemutatjuk a leginkább célba vett (Euro 5,4,3) kategóriák adótételeinek változását a javaslatok alapján az Euro 6-osok adójával összehasonlítva, amely utóbbiaknál csak a nagy hengerűrtartalmú dízel járművek adótétele változna. A többi Euro szintnél már jelentősebb a módosulás, annál nagyobb a változás, minél szennyezőbb, régebbi a jármű.

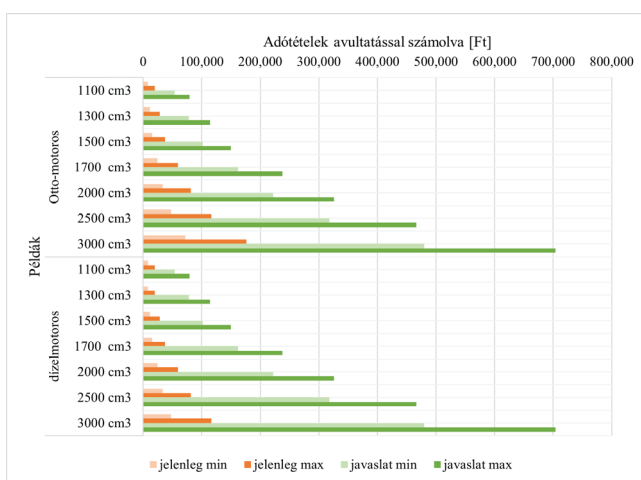
Ami az avultatást illeti, az a javaslat szerint 5 éves járműkorig az eddigiek szerint történne, hiszen az ilyen korú járművek behozatalának visszaszorítása nem cél. Ezen koron túli járművek esetében azonban a jelenlegihez képest kisebb lenne az avultatás mértéke 10 éves járműkorig, mivel ezek azok a járművek, amelyek behozatalát már nem akarjuk ösztönözni. A 10 év felett már nem változna az avultatás mértéke, az ilyen korú járművek behozatala már nem kívánt.

A regisztrációs adó mértékének, avultatásának megváltoztatásának forrásigénye nincs, de az állami bevételek esetében lehet változás. Ennek mértékét nehéz megbecsülni, mert ha az idősebb járművek alacsonyabb avultatása miatt többet kellene fizetnie a vásárlónak, az bevétel növekedés lenne, de ha ösztönzőleg emiatt inkább a fiatalabb járművekre nő meg a kereslet, akkor bár magasabb az avultatás, de ott eleve kevesebb az alapidj, összességében pedig jelentős költségvetési hatás nem várható.



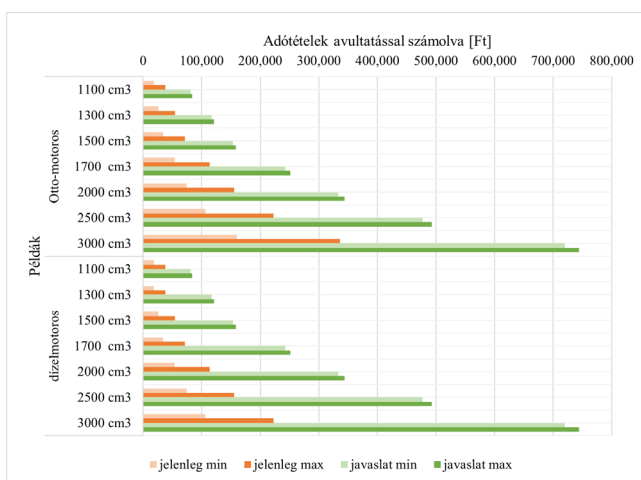
11. ábra A javaslat hatásai az Euro 6-os járművek esetében

Forrás: KTI számítás



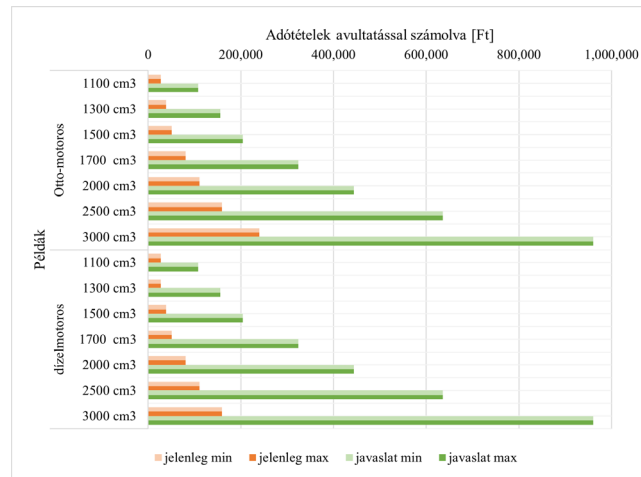
12. ábra A javaslat hatásai az Euro 5-ös járművek esetében

Forrás: KTI számítás



13. ábra A javaslat hatásai az Euro 4-es járművek esetében

Forrás: KTI számítás



14. ábra A javaslat hatásai az Euro 3-as járművek esetében

Forrás: KTI számítás

KÖZVETETT HATÁSÚ JAVASLAT

A gépjárműadó ösztönző jellegének vizsgálata, módosítása

JELENLEGI HELYZET

A gépjárműadó, mint folyamatosan fizetendő díj, az adózott jármű életkorának növekedésével folyamatosan csökken. Ebből adódóan a fiatalabb jármű után fizetendő gépjárműadó magasabb, amely negatív hatással van a fiatalabb autót vásárolni akarók motivációjára, de talán ez nem is akkora probléma, mint a másik oldal, vagyis az idős járműre keveset kell fizetni, forgalmi értéke nincs igazán ezeknek a járműveknek, így amíg működik, addig ezeket forgalomban tartják, mivel használati értéke továbbra is van. Levegőszennyezés, zajszennyezés és biztonságtechnikai kérdések miatt is kedvező lenne, ha az állomány átlagéletkora csökkenne. Viszont nincs eleendő gazdasági ok, ami miatt a tulajdonosok lecserélnék, bontóba vinnék az elavult járművet, inkább a végletekig és sajnos azon túl is használják azokat, a „tűzoltó módszerrel” jól jellemezhető karbantartási mód mellett. Összességében ez az adótétel nem közvetlenül befolyásolja a külföldről történő behozatalt, sokkal inkább az idős járművek üzemeltetését ösztönzi, ennek a megváltoztatása lenne hatással az idősebb járművek keresletére, akár hazai szinten, akár importból behozott járműre.

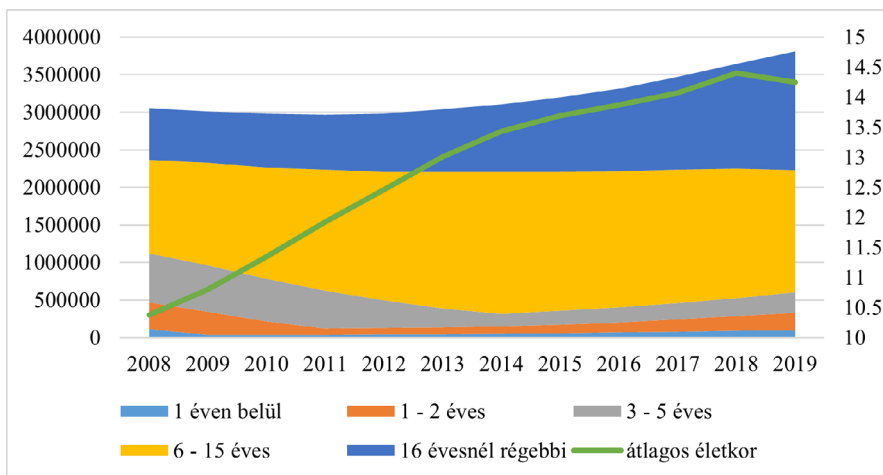
A gépjárműadó mértékét a gépjárműadóról szóló 1991. évi LXXXII. törvény határozza meg. A nyilvántartásban szereplő üzemben tartó vagy tulajdonos az adó alanya, és a jármű életútja alatt, amikor a jármű forgalomban van, évente kell fizetni. Az adó alapja személygépjármű esetében a motor teljesítményének kW-ban kifejezett értéke, amely a forgalmi engedélyben is adat. Az adó alapja tehergépjármű esetében a saját tömege, növelve a terhelhetősége (raksúlya) 50%-ával. A terhelhetőség a jármű megengedett legnagyobb össztömegének és saját tömegének különbsége.

Az adó mértéke személygépjármű esetében:

- gyártás évében és az azt követő 3 naptári évben: 345 Ft/kW (most Euro 6)
- gyártási évet követő 4-7. naptári évben: 300 Ft/kW (most Euro 6 és 5)
- gyártási évet követő 8-11. naptári évben: 230 Ft/kW (most Euro 5 és 4)
- gyártási évet követő 12-15. naptári évben: 185 Ft/kW (most Euro 4 és 3)
- gyártási évet követő 16. naptári évben és utána: 140 Ft/kW (most Euro 3 és régebbi)

A jelent nézve személygépjármű esetében a fenti megoszláshoz a jármű életkora szerint kapcsolható Euro besorolás. Ez azt mutatja, hogy most azok a bizonyos besorolású járművek fizetik azokat a tételeket, de az idő múlásával és új Euro szintek megjelenésével ezek módosulnak. Azonban amíg egy végig hazai üzemeltetésű jármű az életútja során fizeti a díjakat a gyártási évtől kezdve, addig a használaton behozott jármű már csak az alacsonyabb díjat fizeti ki az életkora miatt. A törvény jelenleg adómentességet ad a környezetkímélő gépkocsiknak.

A 2019-es adatok szerint hazánkban a személygépjárművek 41,5%-a több mint 16 éves, míg 2018-ban ez 38,3% volt, így ezt a szegmenst tovább kell osztani. A járműdarabszámokból kiderül, hogy az amúgy is magas meglévő darabszámokhoz évről évre hozzáadódnak a külföldről behozott járművek, így ez a szegmens nem hogy csökkenne, még növekszik is.



15. ábra Személygépjárművek kor és darabszám adatai

Forrás: Magyar Gépjárműimportőrök Egyesülete

JAVASLAT

Az intézkedés ebben az esetben a gépjárműadó differenciálásának felülvizsgálata, még úgy is, hogy ha szociális okokból az adó nem „megfordítására” (fiatalabb olcsóbb, idősebb drágább) nincs lehetőség. A külön pontban említett járműcsere-program megoldás lehet a szociális problémára, továbbá az életútjuk végére ért járművek forgalomból történő kivonásának könnyítése, ösztönzése együtt lehet megoldás. A gépjárműadó környezetvédelmi szempontú módosítására két lehetőséget mutatunk be, egyik javaslatunk csak arra van figyelemmel, hogy a jelenlegi célunk a használt, idős járművek behozatalának visszaszorítása, a másik javaslat azonban egy komplex, teljes reformot jelentő változtatás.

A gépjárművek CO₂ kibocsátással összefüggő adóztatása nem ismeretlen az EU-ban, az elv is teljesen elfogadható, azonban a megvalósítása felvet néhány technikai problémát. A CO₂ adatnak része kell lennie a forgalmi engedélynek, hogy olyan paraméter legyen, amely mindenki számára ismert. Az új járműveknél ez könnyen megtudható a COC dokumentumból, de a használtan bejövőknél már nem tudni, és utólag mérni sem lehet, csak adatbázisból tudható meg. Az elkövetkező EU-s szabályozásokat látva praktikus lenne mielőbb hazánkban is bevezetni, felmenő rendszerben, tehát csak az új járművekre először, így az NEDC és WLTP értékek közötti eltérések problémája sem lenne kérdéses. Javasolt lenne kezdeményezni EU-s szinten az adat szükségességének harmonizációját az import járművek adataink megismerésére.

AZ IDŐS JÁRMŰVEK ÜZEMELTETÉSÉRE HATÓ, EGYSZERŰ MÓDOSÍTÁS

A gépjárműadó környezetvédelmi osztályok szerinti további megoszlása adná magát, mint lehetséges javaslat, de a jármű életkora tükrözi a környezetvédelmi szintet is. A környezetvédelmi plusz költség pedig csak úgy lenne indokolható, ha a szennyezőbb járművek esetében van alapdíjemelést, így a mostani kor szerinti csökkenéssel együtt kiegyenlítődne az egyes kor és környezetvédelmi szintnek megfelelő adók. Továbbá az új Euro szintek és környezetvédelmi osztályok bevezetésével ezt a pótlékot is módosítani kell. Ezek miatt ezt a fajta további differenciálást nem javasoljuk.

3. táblázat Javaslat a gépjárműadó adótételeinek módosítására személygépjárművek esetében

Jelenlegi helyzet			Javaslat		
Időszak	Euro szint most	Adótétel	Időszak	Euro szint most	Adótétel
gyártás évében és az azt követő 3 naptári évben	Euro 6	345 Ft/kW	gyártás évében és az azt követő 3 naptári évben	Euro 6	345 Ft/kW
gyártási évet követő 4-7. naptári évben	Euro 6 és 5	300 Ft/kW	gyártási évet követő 4-7. naptári évben	Euro 6 és 5	300 Ft/kW
gyártási évet követő 8-11. naptári évben	Euro 5 és 4	230 Ft/kW	gyártási évet követő 8-11. naptári évben	Euro 5 és 4	230 Ft/kW
gyártási évet követő 12-15. naptári évben	Euro 4 és 3	185 Ft/kW	gyártási évet követő 12-15. naptári évben	Euro 4 és 3	185 Ft/kW
gyártási évet követő 16. naptári évben és utána	Euro 3 és régebbi	140 Ft/kW	gyártási évet követő 16-18. naptári évben	Euro 3	180 Ft/kW
			gyártási évet követő 19-21. naptári évben	Euro 3 és 2	175 Ft/kW
			gyártási évet követő 22-24. naptári évben	Euro 2	170 Ft/kW
			gyártási évet követő 25. naptári évben és utána	Euro 1 és régebbi	140 Ft/kW

Forrás: KTI számítás

A javaslat a meglévő tételek emelése, de csak az idősebb járművek esetében. Ezt meg lehet úgy tenni, hogy új életkorsávok kerülnek bevezetésre, mivel tudjuk, hogy nagyon sok jármű van 16 év felett, és az eddigi rendszer 16 év felett már nem differenciálta az értékeket. Ebben a javaslatban a tehergépjárműveknél alkalmazott gépjárműadót alapvetően nem javasoljuk módosítani.

A javaslat szerinti új sávok év szerinti kialakításánál a mostani időhöz viszonyított Euro besorolások bevezetésének és kifutásának időpontjai adták, továbbá az a tény, hogy 2019-ben a 16 év feletti személygépjárművek átlagéletkora 20,98 év volt, arányaiban így ezek a járművek 16-25 évesek lehetnek.

TELJES REFORM

A személygépjárművek üzemeltetéséhez kapcsolódó adót olyan paraméterhez érdemes kapcsolni, amely egyrészt jól reprezentálja a szerényebb és a luxus járművek közötti különbségeket, de a környezetre gyakorolt hatásokat is, másrészt olyan adat, amely minden tulajdonos számára elérhető, tehát a forgalmi engedély adata.

A környezetre gyakorolt hatást a károsanyag-kibocsátás és az üvegházhatású gázok kibocsátása határozza meg. A károsanyag-kibocsátást a környezetvédelmi osztály tükrözi legjobban, ez utal az Euro szintre. A CO₂ kibocsátás közvetlen kapcsolatban van az üzemanyagfogyasztással, de ezek nem adatai a forgalmi engedélynek. Közvetett módon a hengerűrtartalom vagy a teljesítmény adat lehet alkalmas ennek megmutatására. Ez a két adat arra is jó, hogy különbséget lehessen tenni a normál igényű és a kedvtelési vagy luxus járművek között. Az idő, vagyis a jármű életkora még egy befolyásoló tényező.

4. táblázat Javaslat a személygépjárművek gépjármű adójára

Euro szint	Környezetvédelmi osztály	Az adó mértéke [Ft/kW]		
		110 kW alatt	110-150 kW	150 kW felett
Euro 6	15	200	250	350
Euro 5	14	225	275	375
Euro 5 alatti	14-nél kisebb	250*	300	400
kivéve:	5E, 5Z	0		
	5N	100	150	250
	5P	150	200	300

*** 2022-ig 10% kedvezmény a 12-15 éves, illetve 20% kedvezmény a 16 év feletti járművekre, utána a kedvezmény megszűnik**

Forrás: KTI számítás

A javaslat a személygépjárműveknél egy teljesen új megközelítést mutat be, amelynél „a szennyező és az extra igényű fizet” elv érvényesül. A teljesítmény további differenciálásának elve az, hogy a nagyobb teljesítményű járművek jobban szennyeznek, többet fogyasztanak, de ezt az egy sávos Ft/kW nem tükrözi arányaiban. Egy családi vagy egy normál üzemeltetésű jármű esetében nincs szükség extra nagy teljesítményekre, még ha valaki a hegytetőn lakik is. Akinek van igénye a nagy teljesítményre, az a magasabb adótételt is ki tudja fizetni. A 110 kW alatti oszlop, Euro 5 alatti adótétele az eddigi rendszer 8-11 éves sávjával egyezik. A *-gal jelölt kedvezmény átmeneti időt szolgáltatna a járműtulajdonosoknak, hogy a megadott ideig még a mostani adót fizessék, és addig eldönthessék, hogy tovább használják a mostani feltételekkel, kivonják a forgalomból vagy újra cserélik a járműveiket. A javaslat egyik fontos része, hogy az adótétel már nem függ az életkortól, tehát az életút alatt konstans, a környezetvédelmi besorolás nem változik ez idő alatt. A jelenlegi csökkenő adótételeket így nem fordítjuk meg, ami drasztikus lépés lenne, de az állandó értéken tartásnak is jelentős ösztönzési hatása van.

HATÁSOK

Az intézkedés generális hatása, hogy csökken az idős járművek iránt a kereslet, amely energetikai, környezetvédelmi és sok esetben közlekedésbiztonsági szempontból is előnyös. Mivel jelentős darabszámban vannak azok az idős járművek, amelyekre hatással lennének a javaslatok, ezért várható azon tulajdonosok nem tetszése, akik használják is ezeket a járműveket.

AZ IDŐS JÁRMŰVEK ÜZEMELTETÉSÉRE HATÓ, EGYSZERŰ MÓDOSÍTÁS

A javaslat hatása rövidtávon mindenképpen a bevétel emelkedését jelentené, de kérdéses, hogy ha eléri a kívánt hatást, miszerint csökken az idős járművek üzemeltetési igénye és az ezek iránti kereslet, és ezek egy részét újabb járművekre cserélik, akkor az milyen mértékű, mivel ettől függ a bevételek változása. Hogy mennyien cserélnék le emiatt járművet vagy mennyien döntenének inkább fiatalabb jármű vásárlása mellett, azt reprezentatív kikérdezéses felméréssel meg lehetne állapítani, de ez nem része ezen jelentésnek.

A jelenlegihez képesti változást a 2018-as járműállományi adatokhoz tudjuk hasonlítani. A javaslat szerinti korcsoportos bontás mutatja meg, hogy a változással érintett járműdarabszámok mekkora növekedést jelentenek. 2020-ban természetesen ezek a járművek már 2 évvel idősebbek, de összehasonlításként megfelelő alap.

5. táblázat A gépjárműadó adótételeinek módosításának bevételi hatásai a személygépjárművek esetében

Jelenlegi helyzet			Javaslat		
Időszak	Adótétel	Jármű darabszám 2018.	Időszak	Adótétel	Jármű darabszám 2018.
3 év alatt	345 Ft/kW	370.473	3 év alatt	345 Ft/kW	370.473
4-7 éves	300 Ft/kW	324.678	4-7 éves	300 Ft/kW	324.678
8-11 éves	230 Ft/kW	544.763	8-11 éves	230 Ft/kW	544.763
12-15 éves	185 Ft/kW	1.008.665	12-15 éves	185 Ft/kW	1.008.665
16 év kor felett	140 Ft/kW	1.396.955	16-18 éves	180 Ft/kW	595.172
			19-21 éves	175 Ft/kW	384.526
			22-24 éves	170 Ft/kW	200.768
			25 év felett	140 Ft/kW	216.489

Forrás: KTI számítás

A módosítás hatására nagyságrendileg 1.200.000 db jármű fizetne fajlagosan több adót, a többi jármű változatlanul, ugyanannyit fizetne, mint korábban. A módosítás jól indokolható, a személygépkocsi járműállomány 1/3-ra hatással lenne, de előfordulhat, hogy az idős, használt járművek behozatalára nem tenne jelentős hatást, mivel minimális a változás, ellenben azoknak az üzemeltetőknek, akik azért használnak ilyen korú járműveket üzemeltetnek, mert nincs lehetőségük újabbra cserélni, azok számára ez nehezítést jelentene. Egy 100 kW-os járműre, ha az 16-18 éves, akkor évente 4000 Ft-tal kellene többet fizetni, az idősebbeknél kevesebb lenne az emelkedés.

TELJES REFORM

A számszerű bevételi hatásokat további adatok hiányában nem tudjuk számolni. Az biztosan állítható, hogy rövidtávon csökkenni nem fognak a bevételek, mivel az adótételek jellemzően növekednek, csak más eloszlásban. Az új megközelítésű gépjárműadó elvszerűbben és igazságosabban osztja fel a terheket.

Egyéb jellegű javaslatok

Az eddig ismertetett javaslatok alapja, hogy az egyszer fizetendő regisztrációs adó, illetve a jármű életútja során fizetendő rendszeres járműadó ösztönző hatását feltételezve kívánják elérni a járműállomány fiatalítását, a behozott használt járművek környezetvédelmi és biztonsági szempontból kedvezőbb összetételét.

Ugyanezt a célt szolgálhatják egyéb, eszközüket és jelentőségüket tekintve eltérő megoldások is, például

- a környezetvédelmi vizsgálatok szigorítása az importált használt gépjárművek hazai forgalomba helyezését megelőzően, különös tekintettel a kiszertelt vagy megrongált, nem működő kibocsátáscsökkentő berendezéseket illetően
- egy bizonyos kor feletti és környezetvédelmi osztály alatti járművek lecserélésének és egyben meghatározott szintű használt vagy új jármű vásárlásának ösztönzése (fix összegű támogatás, mint a Jedlik Ányos Tervnél vagy kedvezményes hitel), amelynek révén nem csak a tulajdonosok jutnának előnyökhöz, mivel jelentős közlekedésbiztonsági és környezetvédelmi célokat is szolgálna.

Ezek feltételeinek kidolgozása eltérő irányú vizsgálódásokat igényel, ezért nem tárgya a jelenlegi munkának, így csak utalunk arra, hogy ilyen irányú lehetőségek kihasználása is támogathatja a kedvezőbb összetételű járműállomány elérését.

A KTI 2019. évben kiadott, használt gépjármű importtal kapcsolatos tanulmányának hatásai

A 2019-ben készített tanulmány hatására több jogszabályváltozás is életbe lépett az elmúlt években. 2021. január 1-jétől szigorodott Magyarországon a külföldről behozott használt autók műszaki vizsgáztatása (5/1990. (IV. 12) KöHÉM rendelet). Korábban a járműveknek csak honosítási eljárást kellett indítaniuk, ha rendelkeztek érvényes műszaki vizsgával az Európai Unió bármely tagállamában. Ez könnyű forgalmi cserét jelentett, és a jármű magyar rendszámot kapott, amely érvényes volt a külföldi műszaki vizsga érvényességéig. Azok a járműveknek viszont, amelyek nem rendelkeztek érvényes műszaki vizsgával, nehezített eljárással kellett számolniuk, hiszen nemcsak az eredetiség-vizsgálatot, hanem a magyar állam által üzemeltetett műszaki vizsgálóállomáson történő műszaki vizsgát is el kellett végezniük.

Az új szabályok szerint azonban további feltételek is vannak. Annak érdekében, hogy a külföldről behozott használt autók a forgalomba kerülhessenek, kötelező környezetvédelmi vizsgálaton kell részt venniük, a közúti járművek környezetvédelmi felülvizsgálatának szabályairól szóló rendeletben meghatározott emissziómérés alapján ellenőrizni kell, hogy a jármű megfelel-e a gyári előírásoknak.

- ha a jármű „láthatóan” nem felel meg a környezetvédelmi vizsgának (például látható füstöt bocsát ki),
- ha az autó 6 évesnél régebbi, vagy
- ha 160 ezer kilométernél többet futott.

Amennyiben az alábbiak közül egy, vagy több kitétel fennáll⁴

- a jármű környezetvédelmi vizsgája sikertelen,
- megállapításra kerül, hogy a jármű nem üzemképes,
- az ER. 5. számú mellékletében⁵ meghatározott veszélyes hiba található rajta,
- az emissziómérés során a járműgyártó által meghatározott határértékeket túllépi,
- az Euro VI és Euro 6 (15-ös, 16-os környezetvédelmi osztályú, vagy magasabb benzin vagy dízel üzemű),
- jobb besorolású motorral felszerelt gépkocsi esetén az OBD kiolvasás eredménye a jármű környezetterhelésére nézve a gyártó ajánlása alapján nem megfelelő, vagy a környezetet szennyezi,

⁴ 511/2017. (XII. 29.) Korm. rendelet a közúti közlekedésre vonatkozó közigazgatási hatósági ügyekben alkalmazandó kiegészítő eljárási szabályokról <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1700511.kor>

⁵ 5/1990 KöÉM rendelet a közúti járművek műszaki megvizsgálásáról <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=99000005.koh>

akkor a közlekedési hatóság a „Műszaki adatlap” időbeli hatályaként a „Műszaki adatlap” kiadásának napját tünteti fel (1 napig érvényes műszaki vizsga). A járművet nem engedik forgalomba, és nem kap rendszámot, amíg a hibákat meg nem javítják. Az adott járműegyed honosítása nem kerül megtagadásra, azonban gyakorlatilag műszaki érvényesség nélkül kerül Magyarországon regisztrálásra, és forgalomban való részvételéhez a műszak érvényesség megújítása szükséges.

Az egynapos műszaki vizsga kiadására szűkebb keretek között volt csak korábban lehetőség, a honosítás során kiderülő, nem megfelelő műszaki állapot esetén, a műszaki adatlapot lehetett kiállítani aznap érvényességgel.

A külföldről történő autóvásárlás kockázatokkal járhatott. A magánemberektől történő vásárlás további kockázatokkal jelenthetett, hiszen a cégek hiányában nehéz lehet megtalálni az eredeti tulajdonost, különösen, ha az távolabbi országban él. Az eladók néha alacsony árú járművet adtak ajándékba a vásárláskor, amivel megkerülték a hasznosítási kötelezettséget, és így a járműveket nem kellett újrahasznosításra vagy lebontásra vinniük.

A díjak növelésére, és a plusz adók bevezetésére a jelenlegi gazdasági környezetben kevés mozgástér adódik, ezért a széles társadalmi rétegeket érintő, direkt adminisztratív szigorítás, mint a regisztrációs adó, vagy a súlyadó (esetlegesen differenciált) emelése nem történhetett meg. Az egyéb intézkedések között szereplő környezetvédelmi vizsgálat szigorítása viszont belekerült a honosítási, vagy egyedi forgalomba helyezési szabályok közé.

Az új szabályok, és az eladás kockázataira arra ösztönzik a külföldről autót vásárlókat, hogy körültekintőek legyenek, és gondosan ellenőrizzék a járművek állapotát és a vásárlás feltételeit, hogy elkerüljék a problémákat a későbbiekben.

Felhasznált irodalom

Alapjárat Autós Közösség Portál <https://alapjarat.hu/> (utolsó hozzáférés: 2023.01.03.)

Gáspár-Zsován Noémi: A használt gépjármű importot szigorúbb környezetvédelmi követelményekhez kötő, ill. az elavult import járművek behozatalát, hazai forgalomba helyezését, korlátozó kérdések vizsgálata, ezek alapján a döntéshozók részére részletes szakértői javaslatok kidolgozása (KTI Tanulmány, 2020)

Magyar Gépjárműimportőrök Egyesülete 2019. novemberi sajtótájékoztató anyaga

vezess.hu portál Magazin rovat <https://vezess.hu> (utolsó hozzáférés: 2023.01.03.)

<https://infostart.hu/belfold/2021/01/23/be-sem-latjuk-mennyire-kockazatos-kulfoldon-autot-venni>

Adatforrások

Belügyminisztérium adatszolgáltatása a KTI részére

DataHouse adatszolgáltatása a KTI részére

DOI - <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.113442>

Singh, V. Gupta, K.- Agarwal, A. - Chakrabarty, N. (2022). Psychological impacts on the travel behaviour post Covid-19. *Asian Transport Studies*, 8, 100087.

<https://doi.org/10.1016/j.eastjs.2022.100087>

Standage, T. (2021). The Lost History of the Electric Car—And What It Tells Us about the Future of Transport. 2021. In. <https://www.theguardian.com/technology/2021/aug/03/lost-history-electric-car-future-transport> (A letöltés dátuma: 2023. december 21.).

Stephens-Romero, S. D.- Brown, T. M.- Kang, J. E.- Recker, W. W. - Samuelsen, G. S. (2010). Systematic planning to optimize investments in hydrogen infrastructure deployment. *International journal of hydrogen energy*, 35(10), 4652-4667.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.024>

Tang, B.- Arat, H. T.- Conker, Ç. - Baltacıoğlu, E. - Aydin, K. (2020). Energy distribution analyses of an additional traction battery on hydrogen fuel cell hybrid electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49), 26344-26356.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.241>

Tiikkaja, H. - Viri, R. (2021). The effects of COVID-19 epidemic on public transport ridership and frequencies. A case study from Tampere, Finland. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100348. DOI:10.1016/j.trip.2021.100348.

<https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100348>

Trapp, C. T. - Kanbach, D. K. - Kraus, S. (2022). Sector coupling and business models towards sustainability: The case of the hydrogen vehicle industry. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 1(2), 100014.

Wappler, M.- Unguder, D. - Lu, X.- Ohlmeyer, H. - Teschke, H. - Lueke, W. (2022). Building the green hydrogen market—Current state and outlook on green hydrogen demand and electrolyzer manufacturing. *International Journal of Hydrogen Energy*.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.253>

Wikramanayake, E.- Acharya, P. V. - Kapner, M. - Bahadur, V. (2021). Green hydrogen-based energy storage in Texas for decarbonization of the electric grid. In 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech) (pp. 409-415). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/GreenTech48523.2021.00070>

Yap, J. - McLellan, B. (2023). A hidrogéngazdaság kutatásának, fejlesztésének és elvárásainak történeti elemzése, 1972–2020. *Környezet*. 10 (1), 11.

Yue, M.- Lambert, H. - Pahon, E.- Roche, R.- Jemei, S. - Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111180.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>

Yusaf, T.- Fernandes, L.- Abu Talib, A. R.- Altarazi, Y. S.- Alrefae, W.- Kadirgama, K. - Laimon, M. (2022). Sustainable aviation—hydrogen is the future. *Sustainability*, 14(1), 548.

DOI:10.3390/su14010548

Zementwerke, V. D. (2020). Dekarbonisierung von Zement und Beton—Minderungsprofile und Handlungsstrategien.

Zhang, C.- Wei, Y.L.- Cao, P.F.- Lin, M.C. (2018). Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 3091-3106.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.030>

Tudományos cikk

Városi autóbusz-hálózat elektrifikációja

Beküldve: 2023.03.29.
Elfogadva: 2023.09.24.
Online közzététel: 2023.12.18.

- id SZILASSY PÉTER ÁKOS** szakmai tanácsadó, tudományos segédmunkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Közlekedési Adatipari Iroda, szilassy.peter@kti.hu, doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, szilassy.peter.akos@kjk.bme.hu
- id DR. FÖLDES DÁVID** tudományos munkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, foldes.david@kjk.bme.hu
- id DR. CSONKA BÁLINT** tudományos munkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék, csonka.balint@kjk.bme.hu

Kivonat: Számos városban cél az elektromos autóbuszok részarányának növelése. Jelenleg azonban ezen autóbuszok drágábbak, mint a dízelüzemű járművek, valamint használatuk újszerű tervezési és üzemeltetési eljárások használatát követeli meg (pl. töltésütemezés, önjáró kapacitás). Ezek ellenére az elektrifikációt nem előzi meg hálózat-szintű tervezés. Kutatásunk célja a töltési infrastruktúra tervezésére, az elektromos autóbusz-típus kiválasztására és az elektrifikáció költségbecslésére vonatkozó módszertan kidolgozása volt. A kidolgozott módszer újszerűsége a töltési infrastruktúra viszonylatcsoport-szerinti optimalizálása a hálózat (viszonylatok, menetrend stb.), a jármű és a töltési infrastruktúra jellemzőinek figyelembevételével. A módszert Budapestre alkalmaztuk közös végállomással rendelkező vagy közös szakaszon közlekedő viszonylatok esetében statikus végállomási és dinamikus felsővezetékes töltést figyelembe véve. A jelentős közös szakasszal rendelkező viszonylatcsoportok esetében a fonódó szakaszon felsővezeték telepítése a kedvezőbb költségű, szemben a végállomási töltők alkalmazásával. A közös végállomással, de minimális fonódó szakasszal rendelkező 47 vizsgált viszonylat esetében a végállomási töltés miatti csúcsidei többletjármű-igény csupán +4%. Az eredmények segíthetik a városi autóbusz-hálózat elektrifikációjának tervezését.

Kulcsszavak: autóbusz-hálózat; elektrifikáció; akkumulátoros elektromos autóbusz; trolibusz; statikus töltés; dinamikus töltés; felsővezeték-hálózat

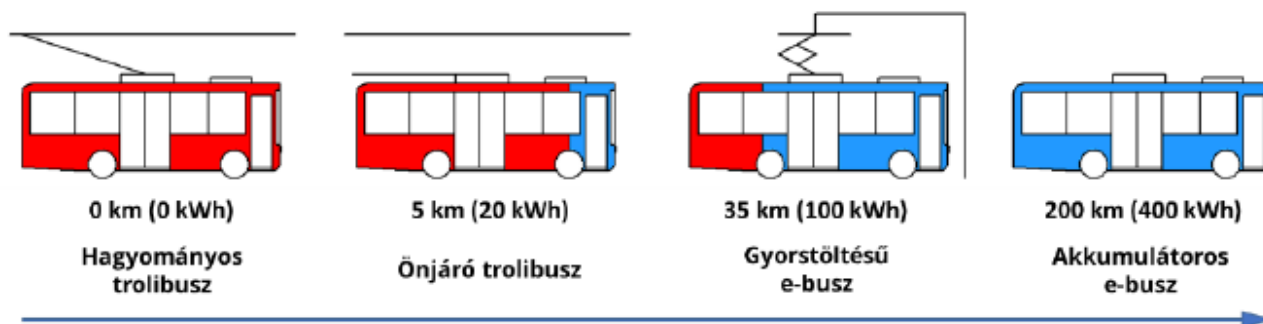
Urban bus network electrification

Abstract: In many cities, there is an important to increase the share of electric buses. Currently, these buses are more expensive than diesel vehicles, and their use requires the use of novel planning and operating procedures (e.g. charging scheduling, authority of bus). Despite these issues, electrification is not preceded by grid-level planning. The aim of our research was to develop a methodology for the design of the charging infrastructure, the selection of the electric bus type and the cost estimation of electrification. The novelty of the developed method is the optimization of charging infrastructure at the bus line group level, considering the characteristics of the network (bus lines, schedule, etc.), the vehicle and the charging infrastructure. The method was applied to Budapest in the case of connections with a common end station or running on a common section, considering terminal static and dynamic overhead line charging. In the case of bus line groups with a significant common section, the installation of an overhead line on the overlapping section is more cost-effective than the use of terminal chargers. In the case of the 47 investigated routes with a common terminus but a minimal overlapping section, the additional peak-time vehicle demand due to terminal charging is only +4%. The results can help the planning of the electrification of the urban bus network.

Keywords: bus network; electrification; battery electric bus; trolleybus; static charging; dynamic charging; catenary network

Bevezetés

Az elektromos autóbuszok hozzájárulnak a lokális lég- és zajszennyezés csökkentéséhez, különösen a városokban (Borén, 2019; Laib et al., 2019). Számos elektromos autóbustípus különböztethető meg a nagy akkumulátorkapacitású járműtől az önjárára képtelen trolibuszig. Minél nagyobb a használt akkumulátor kapacitása, annál nagyobb az önjáró üzemben megtehető távolság (1. ábra). A technológiai fejlődésnek köszönhetően, melyből az akkumulátoripari fejlődés a legjelentősebb, a nagy hatótávolságú akkumulátoros elektromos autóbuszok rendelkezésre állása és a hatótávja növekszik. Napjainkban több mint 100 000 akkumulátoros elektromos autóbusz közlekedik a világon, főleg Kínában. A piac mérete gyorsan növekszik, a várakozások szerint 2027 végére csaknem 700 000 akkumulátoros elektromos autóbusz fog az utakon közlekedni (Electric Bus Market, 2022).



1. ábra Elektromos autóbuszok önjáróképessége (és jellemző akkumulátorkapacitása)

Forrás: Saját ábra

Statikus töltést jellemzően a telephelyen, végállomáson és megállóban, míg a dinamikus, mozgás közbeni töltési megoldásokat a közös szakaszokon alkalmazzák. Jelenleg a legelterjedtebb dinamikus töltési megoldás a felsővezeték, azonban tesztjelleggel működnek vezeték nélküli megoldások is. A telephelyi töltés kizárólagos használata esetén a járműnek a napi energiaigényét szükséges eltárolnia, ami miatt nagy akkumulátorkapacitásra van szükség. A nagy akkumulátorkapacitás költséges, és jelentősen növeli a jármű tömegét. Továbbá minden autóbushoz külön töltőegység szükséges a telephelyen, ami egy nagy flotta esetén nem hatékony. Kiseb kapacitás esetén üzemidő alatt is szükséges tölteni a járművet a telephelyen, megnövelve a rezsimenetet, ami csökkenti a jármű rendelkezésre állását. Ezért az akkumulátorkapacitás csökkentése érdekében az autóbuszok töltése napközben statikus töltőkkel történhet közös végállomásokon (2/a. ábra), vagy dinamikus töltőkkel a közös szakaszok mentén. (2/b. ábra)



a

2. ábra Autóbusz-hálózat típusai: közös végállomás (a), közös szakasz (b)

b

Forrás: Saját ábra

A gyakorlatban ugyanakkor a városi hálózat összetettebb, a hálózatot számos közös végállomás és közös szakasz alkothatja. Továbbá, az elektrifikációt befolyásolja a járművek száma és akkumulátorkapacitásuk, valamint az üzemeltetésükhöz szükséges töltőberendezések száma és teljesítménye. Ezek alapján kutatási kérdéseink a következők: mekkora akkumulátorkapacitás, mekkora töltési teljesítmény, hány darab statikus töltőberendezés és milyen hosszú felsővezetékes szakasz szükséges?

Olyan módszertant dolgoztunk ki, ami a töltési infrastruktúra és az elektromos járműpark összetételét határozza meg a beruházás teljes költségének minimalizálása mellett. A módszer újdonsága, hogy az optimalizálás a viszonylatcsoportokra és nem csak egy viszonylatra történik. Így a tervezés az azonos végponton vagy a közös szakasszal, szakaszokkal rendelkező viszonylatokra végezhető el.

A cikk felépítése: a következő fejezetben a szakirodalmat tekintjük át, majd az elektrifikáció módszertanát ismertetjük. A módszer budapesti esettanulmányban való alkalmazását az ezt követő fejezetben foglaltuk össze. A cikk utolsó fejezetében a kutatás során levont főbb következtetéseket, valamint a további kutatási irányokat foglaljuk össze.

Irodalmi áttekintés

Számos kutató foglalkozik elektromos autóbuszokkal; infrastruktúra tervezési módszerek fejlesztésével vagy olyan üzemeltetési módszerek kidolgozásával, amelyek az elektromos autóbuszok hátrányainak (alacsony hatótáv, hosszú töltési idő stb.) kiküszöbölésére irányulnak. Az akkumulátoros elektromos autóbuszokat a korlátozott hatótávolság miatt leginkább városi környezetben érdemes üzemeltetni (Wu et al., 2021). Helyközi és távolsági közlekedésben 26-60 perces töltési szünet alkalmazása szükséges, ami jelentősen meghosszabbíthatja a teljes utazási időt (Uslu - Kaya, 2021).

A trolibuszok felsővezeték-rendszerének optimális kialakítása (minimális hosszúságú felsővezeték szakasz) a járművek energiaigényének és a futásteljesítmények figyelembevételével lehetséges (Baumeister et al., 2021). A felsővezeték-hálózat tápellátása adat alapú megközelítéssel is vizsgálható a vontatási állomások áram- és teljesítményadatainak felhasználásával; a módszerrel egy adott szakaszon az energiafogyasztás 7%-os hibával becsülhető (Paternost et al., 2019).

A statikus töltés esetében a két leginkább vizsgált terület a töltőberendezések helyszínének kijelölése, valamint a töltési kapacitások meghatározása. Ehhez a közlekedési és az energiahálózatok közötti kapcsolat értékelése és illesztése is szükséges. Az üzemeltetési költségek idő- és térbeli minimalizálása érdekében a töltőinfrastruktúra kiépítése az elektromos hálózat adottságai szerint optimalizálendő (Lin et al., 2019; Wu et al., 2021). A járművek szükséges akkumulátorkapacitását a statikus töltésen keresztül felvehető energiamennyiség is befolyásolja (Wang X. et al., 2017). Pantográfós villámtöltés mellett csökkenthető az akkumulátor kapacitása. Villámtöltéssel akár 13%-os költségcsökkentés érhető el a lassú töltéshez képest (Wang Y. et al., 2022).

Az akkumulátorok töltöttségi állapota és használati módja nagymértékben befolyásolja a járművek rendelkezésre állását. A töltésütemezés (Liu – Ceder, 2020) és a menetrendek újratervezése (Sebastiani et al., 2016; Tesar et al., 2020) széles körben elfogadott megközelítés. Jól ütemezett végállomási töltéssel az elektromos járművek elérhetősége a dízel autóbuszokéhoz hasonló (He et al., 2019). A kötött útvonalnak és a kiszámítható utasforgalomnak köszönhetően a tömegközlekedési járművek töltéstervezése egyszerűbb, a töltési igény könnyebben becsülhető, mint a személygépkocsik esetében. A töltési stratégiák készítésénél a költségek minimalizálása a cél, ehhez a jármű energiafogyasztását és az elektromos áram átváltozását szükséges figyelembe venni (Wang Y. et al., 2017). A töltési időszakok csúcsidőn kívüli időszakokra való áthelyezésével további költségcsökkentés érhető el, ez azonban a fordák újratervezésével járhat (Leou - Hung, 2017). A töltés okozta pontszerű nagy hálózati terhelés kezelésére helyhez kötött energiatároló rendszer telepíthető. Vezérlési stratégiával és beépített energiatárolóval felszerelt töltőberendezések esetében az elektromos hálózat pillanatnyi energiaigénye akár 70%-kal is csökkenthető (Ojer et al., 2020).

Az irodalomkutatás alapján akkumulátoros elektromos autóbuszok üzemeltetése során a menetrend-újratervezés egy gyakran alkalmazott megközelítés, amely azonban ronthatja a szolgáltatás minőségét. Továbbá a kutatások általában egy típusú töltési infrastruktúrát (statikus vagy dinamikus) vizsgálnak anélkül, hogy ezek vegyes használatát figyelembe vennék. Jelen cikkben korábbi kutatási eredményeinkre is építünk. A statikus és dinamikus töltők elemzésével megállapítottuk, hogy egy egyensúlyi pontot követően vagy statikus vagy a dinamikus töltőket érdemes alkalmazni (Csonka, 2021). Ugyanakkor egy menet megtételéhez szükséges energiafogyasztás és a jármű fordaterve csupán hozzávetőleges becsléssel került figyelembevételre. Jelen cikkben az energiafogyasztás számítását a (Szilassy és Földes, 2022) alapján javítottuk, hogy pontosabb és átfogóbb eredményeket kapjunk.

Módszertan

A járatokat és menetrendet kötöttségként vettük figyelembe. Statikus végállomási töltést és a dinamikus felsővezetékes töltést elemeztük. Célunk a minimális telepítési költség biztosítása, figyelembe véve a töltés teljesítményét, a kiépítendő statikus berendezések számát és a dinamikus felsővezetékes szakaszok hosszát, valamint a járművek akkumulátorkapacitását, önjáró képességét. A telephelyen történő statikus töltést csak kiegészítő töltésként tekintettük. A közbelső megállóknál lévő statikus töltés lehetőségét figyelmen kívül hagytuk, mivel használatuk az utazási idő jelentős növekedését jelentheti. A jármű tömegének minimalizálása érdekében kisebb akkumulátorkapacitással rendelkező járműveket vizsgáltunk, amelyeket naponta többször is szükséges tölteni.

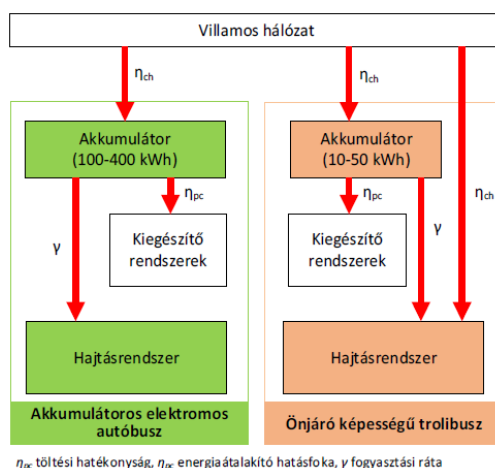
A számítási lépések statikus és dinamikus töltőinfrastruktúra esetében megegyezik, ugyanakkor a számítási mód eltérő lehet. A lépések a következők:

1. Modellelés (hálózati és energia modell)
2. Energiafogyasztás számítása
3. Potenciális töltési idő meghatározása
4. Tölthető energia becslése
5. Energiamérleg számítása
6. Szükséges járművek számának számítása
7. Egyidejűleg töltő járművek számának meghatározása
8. Töltőberendezések meghatározása
9. Beszerzési költség becslése

1. Modellelés (hálózati- és energiamodell)

Minden megálló ($i, j \in 1 \dots n$, ahol n a megállók száma) csúcs, a megállók között irányított szakaszok (élek) értelmezhetők. Egy szakaszt a kezdő és végponti csúcs jelöli (ij szakasz). A legkisebb szakasz két megálló között; a legnagyobb szakasz két végállomás között értelmezhető. Minél részletesebb a szakaszfelosztás, annál pontosabb a becslés.

Az energiahálózattól a hajtásláncig figyelembe vett energiaveszteségeket a 3. ábrán bemutatott energiamodell foglalja össze. Az energiaveszteségeket hatásfok arányokkal fejeztük ki, amelyek a töltés közbeni energiaveszteség és a segédüzemi rendszerek működtetéséhez szükséges energiaátalakítás során keletkeznek. Továbbá az akkumulátor és a hajtáslánc veszteségét az ún. fogyasztási ráta fejezi ki.



3. ábra Energiamodell

Forrás: Saját ábra

2. Energiafogyasztás számítása

Az $E_{\text{DEMAND},ij}$ energiafogyasztás az akkumulátoros elektromos autóbusszal alkalmazása esetén végállomások között, trolibuszok alkalmazása esetén két megálló között értelmezendő. Egy szakasz megtételéhez szükséges energiefelhasználás becsléséhez az útvonalon a gyorsulási erőt és a sebességet figyelembe véve a menetdinamikai,

valamint a segédüzemi rendszerek fogyasztásának számítása szükséges (Szilassy – Földes, 2022). A két energia-kategória - E_{DRIVE} menetdinamikai energiafogyasztás és E_{AUX} segédüzemi energiafogyasztás - alapján minden ij szakaszra meghatározható az E_{DEMAND} teljes energiaigény kWh-ban. (1)

$$E_{DEMAND,ij} = E_{DRIVE,ij} + E_{AUX,ij} \quad (1)$$

A korábbi eredményünkhöz (Szilassy – Földes, 2022) képest egyszerűsítésekkel éltünk, mivel részletes trajektória adatok nem álltak rendelkezésre. Általános fogyasztási rátát vezettünk be a különböző gyorsítási, sebeségtartási és lassítási fázisok kifejezésére. A fogyasztási rátát a megállóhelyek miatti fékezéseket és az emelkedők leküzdését leíró fékezési és emelkedési veszteséggel finomítottuk.

Az E_{DRIVE} menetdinamikai fogyasztás a (2) egyenlet alapján határozható meg.

$$E_{DRIVE,ij} = (\gamma + b_{ij} + e_{ij}) \cdot l_{ij} \quad (2)$$

ahol γ a fogyasztási ráta [kWh/km]; amely a hajtáslánc (η_{drive}), és az energia-visszanyerés hatékonyságától (η_{recup}) függ; b a fékezési veszteség [kWh/km]; e az emelkedési veszteség [kWh/km]; l az ij szakasz hossza [km].

A b_{ij} fékezési veszteség a kinetikus energiából számítható, figyelembe véve az ij szakasz megállóinak számát. (3)

$$b_{ij} = \frac{s_{ij} \cdot m_{ij} \cdot v_{max,ij}^2}{2 \cdot l_{ij}} \quad (3)$$

ahol s_{ij} a megállások száma a szakaszon, m_{ij} a jármű tömege egy szakaszon, amely az utasterhelés miatt ingadozhat, v_{max} a szakaszon elérhető legnagyobb sebesség.

Az e_{ij} emelkedési veszteség egy szakaszon a potenciális energiából számítható. (4)

$$e_{ij} = \frac{m_{ij} \cdot g \cdot \Delta h_{ij}}{l_{ij}} \quad (4)$$

ahol g a nehézségi gyorsulás m/s^2 , Δh_{ij} a szakasz magasságkülönbsége [m].

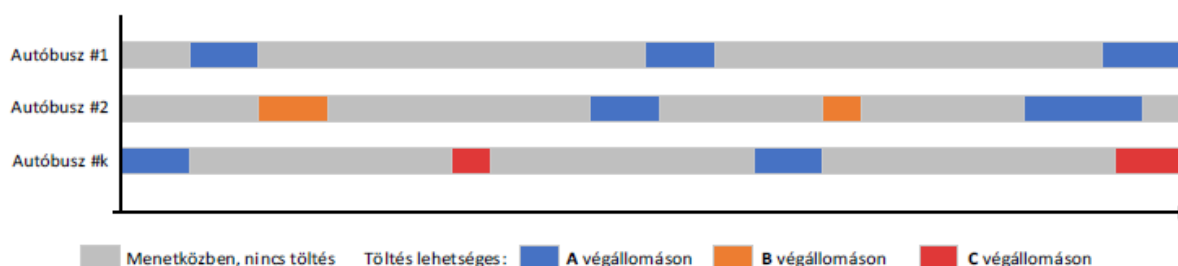
Az E_{AUX} segédüzemi energiafogyasztás a berendezések teljesítménye és használati idejük alapján az (5) egyenlet alapján számítható ((Szilassy és Földes, 2022). Az alábbi fogyasztókat vettük figyelembe: HVAC (fűtési-, szellőztetési és légkondicionáló rendszer), BTMS (akkumulátor hőmérséklet szabályozó rendszere), elektromos szervokormány, légkompresszor, ajtómozgató motorok, rögzítőfék, ablaktörlő rendszer. Az utastér hűtéséhez/fűtéséhez és a jármű akkumulátorának temperálásához szükséges teljesítményt a hőmérséklet nagyban befolyásolja.

$$E_{AUX} = P_{AUX} \cdot t_{ij} \cdot \eta_{pc} \quad (5)$$

ahol t_{ij} az utazási idő egy szakaszon; η_{pc} az energiaátalakító hatásfoka; P_{AUX} a segédüzemi rendszerek teljesítménye; amely a segédrendszerek teljesítményigényének összegzésével határozható meg.

3. Potenciális töltési idő meghatározása

Statikus töltés esetén: Azon időszakok meghatározása, amikor a jármű két menet között a végállomáson tartózkodik. Nem szükséges az egész napot elemezni; a csúcsforgalom jó becslést adhat, mivel a töltési igény várhatóan ebben az időszakban a legmagasabb. Minél hosszabb a figyelembe vett időszak, annál nagyobb a módszer megbízhatósága. A 4. ábra a különböző viszonylatokon közlekedő autóbuszok futási és potenciális töltési idejeit szemlélteti. Az "A" végállomás közös, ahol minden jármű tud tölteni. Autóbusz #1 csak az "A" végállomáson tud tölteni, míg autóbusz #2 a "B", autóbusz #k a "C" végállomáson is tölthet.



4. ábra Az akkumulátoros elektromos autóbuszok potenciális töltési időszakai

Forrás: Saját ábra

Dinamikus töltés esetén: A menetrend szerint egy adott szakaszon eltöltött időszakok meghatározása.

4. Tölthető energia becslése

Egy adott töltőberendezésből felvehető energia a (6) egyenlettel határozható meg figyelembe véve a töltési veszteséget.

$$E_{CHARGED} = t_{ch} \cdot P \cdot \eta_{ch} \quad (6)$$

ahol t_{ch} a jármű töltési ideje egy pontban (végállomáson) vagy szakaszon, P a névleges töltési teljesítmény, és η_{ch} a töltési hatékonyság, ami az akkumulátor töltéséből származó összes veszteséget fejezi ki. A töltési idő meghatározásánál figyelembe veendő a töltés technikai ideje (pl. töltőállomás megközelítése, csatlakozási idő), így a tényleges töltési idő rövidebb, mint a potenciális töltési idő. Az akkumulátorokat nem lehet túltölteni (7).

$$\frac{E_{CHARGED}}{B} \leq 1 - SoC \quad (7)$$

ahol SoC az akkumulátor aktuális töltési szintje; B az akkumulátor kapacitása kWh-ban.

5. Energiamérleg számítása

A jármű ϵ_{ij} energiamérlege egy szakaszon a szükséges és a töltött energia aránya (8).

$$\epsilon_{ij} = \frac{E_{DEMAND,ij}}{E_{CHARGED}} \quad (8)$$

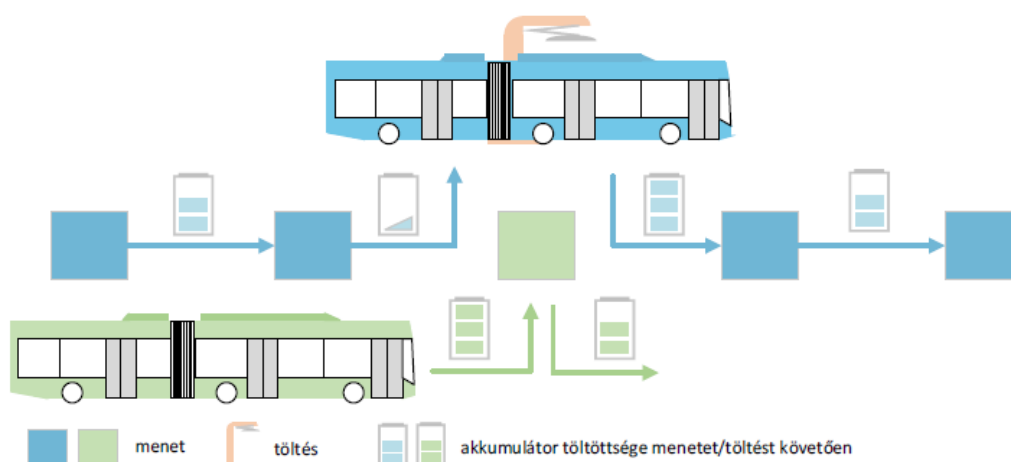
Statikus töltés esetén: ϵ_{ij} egyenlő vagy kisebb, mint 1, annak érdekében, hogy a töltendő energia elegendő legyen a töltőállomások közötti szakasz (menet) energiaigényének fedezésére. Amennyiben ez nem teljesül, további töltési időre van szükség; mivel a menetrend rögzített, az autóbuszra úgynevezett n_{ts} menetugrás alkalmazandó.

Ha az n_{ts} menetugrás 1, a k autóbusz egy indulást kihagy. Ha az így, a követési idővel megnövelt idő sem elegendő a $\epsilon_{ij} \leq 1$ teljesüléséhez, újabb menetugrás szükséges. Minden menetugrás egy újabb jármű beállítását jelenti. A t_{ch} módosított töltési idő a nominális töltési idő és a menetugrások miatti időnövekmény összegzésével adható meg, így a felvehető energia számítása (6) módosul (9).

$$E_{CHARGED} = (n_{ts} \cdot t_{hw} + t_{ch}) \cdot P_i \cdot \eta_{ch} \quad (9)$$

ahol t_{hw} a jellemző követési idő adott viszonylaton.

Az 5. ábra olyan esetet mutat be, amikor a menetugrás 1; a kék színrel jelzett járműnek tölteni szükséges két menet megtételét követően, ugyanakkor az akkumulátorát nem tudná feltölteni a következő menet kezdetéig, így új autóbusz beállítása szükséges a zöld menet teljesítéséhez.



5. ábra Menetugrás

Forrás: Saját ábra

Dinamikus töltés esetén: A teljes viszonylatra értelmezett energiamérleg (szakaszonkénti energiamérleg összesítése) szükséges, hogy kisebb, vagy egyenlő legyen, mint 1. Ameddig ez nem teljesül, újabb felsővezetékes szakasz kijelölése szükséges.

Mind statikus, mind dinamikus töltés esetén, ha a B akkumulátorkapacitás nagyobb, mint az E_{DEMAND} , akkor a jármű alkalmazható. Az autóbusz aktuális töltöttségi szintje nem lehet alacsonyabb egy minimális szintnél (pl. SoC=20%). Az akkumulátor töltöttségének alsó korlátjára vonatkozó feltételt a (10) egyenlet írja le.

$$B \cdot \eta_{batt} \geq E_{DEMAND,ij} \quad (10)$$

ahol η_{batt} az akkumulátor kapacitáskihasználtsága (ha a szükséges minimum SoC 20%, $\eta_{batt} = 0,8$).

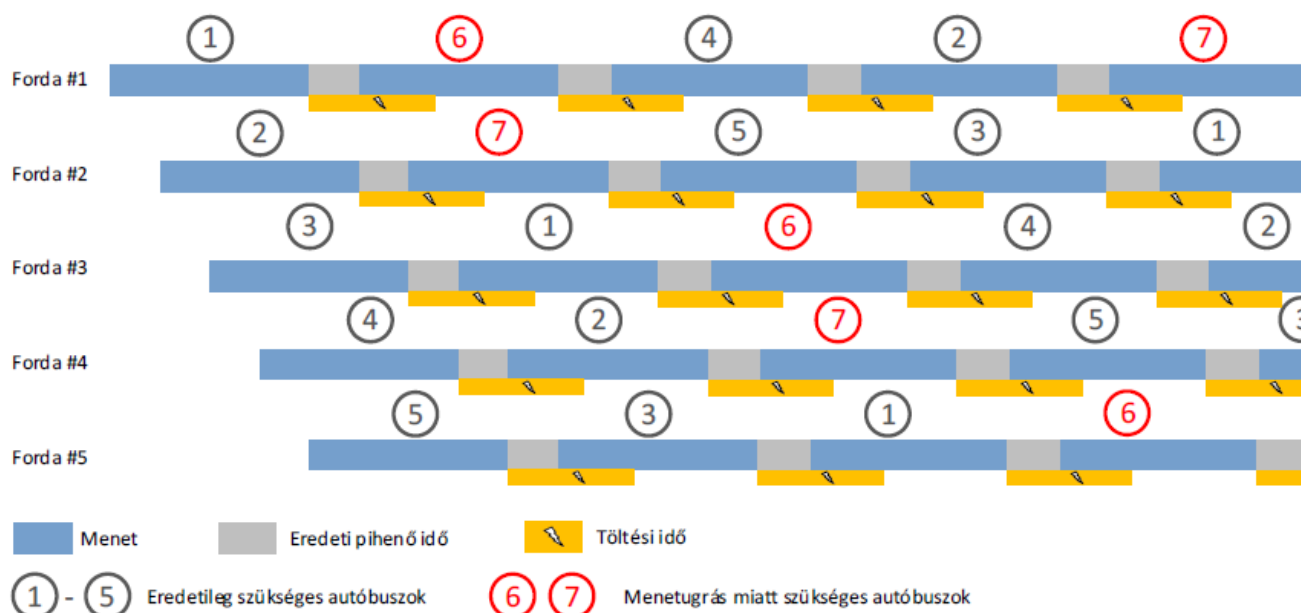
6. Szükséges járművek számának számítása

Statikus töltés esetén: Adott viszonylaton szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok száma a jelenleg szükséges hagyományos meghajtású autóbuszok és a menetugrások számának összege. (11)

$$n_{ebus} = n_{bus} + \sum n_{ts} \quad (11)$$

ahol n_{bus} a jelenleg szükséges autóbuszok száma.

A 6. ábra a menetugrás és a menetugrás miatti extra elektromos autóbusz igényt szemlélteti egy példa viszonylat esetében. Az elektrifikációt megelőzően dízel autóbuszokkal a viszonylat öt fordával, vagyis öt dízel autóbusszal szolgálható ki (sorok). Elektrifikációt követően, a végállomási töltési idősükséglet miatt +2 jármű, azaz összesen 7 akkumulátoros elektromos autóbusz szükséges. Minden autóbusznak egy menetet (kék sáv) követően tölteni szükséges. Az eredetileg rendelkezésre álló menetek közötti pihenő idő (szürke sáv) nem elegendő a töltésre (sárga sáv). Például: autóbusz 1 nem tudja az eredeti 2. menetét teljesíteni, menetugrás alkalmazása szükséges és extra autóbusz beállítása (autóbusz 6). Azonban autóbusz 1 töltése az eredeti 2. fordá 2. menetének kezdetére sem fejeződik be, így újabb menetugrás alkalmazása, ezáltal újabb extra autóbusz beállítása (autóbusz 7) szükséges. Ekkor autóbusz 2 is már tölt. Tehát autóbusz 1 a töltését követően az eredeti 3. fordá 2. menetét tudja elkezdni. Az eredeti fordák megváltoznak, a töltési szükséglet miatt a fordák eltolása szükséges az ábrán látható módon. A példában a végállomáson egyidejűleg három autóbusz is tölt.



6. ábra Fordaváltozás a menetugrás következtében

Forrás: Saját ábra

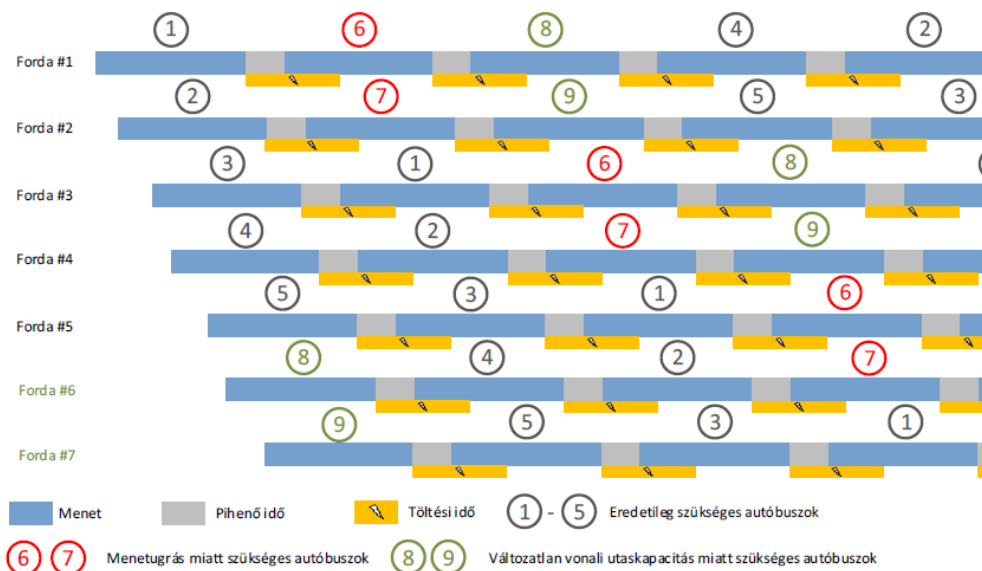
Általánosságban a nagyobb akkumulátorkapacitással rendelkező járművek utasbefogadóképessége kisebb. Mivel az össztömeg nem változik, de az akkumulátorok tömege nagyobb, a szállítható személyek száma csökken. Amennyiben a cél a változatlan utaskapacitás biztosítása a viszonylaton, úgy többletjárművek beállításra és az

indulási időpontok változtatására (sűrítésre) van szükség. A menetugrás miatt beállított járművek nem nyújtanak többletkapacitást, csupán a töltési időszükségletre jelentenek megoldást. A szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok számának meghatározásához a (11) egyenlet kiegészítése szükséges (12):

$$n_{ebus} = (1 - \Delta q) \cdot n_{bus} + \sum n_{ts} \quad (12)$$

ahol Δq az utaskapacitásváltozás.

Feltételezzük, hogy az előbbi példa viszonylat esetében a vonali utaskapacitás változatlan tartása miatt további két jármű beállítása szükséges. Ennek következtében az indítási időköz csökken. A 7. ábra a kialakított új fordatervet szemlélteti.



7. ábra Fordaváltozás a változatlan vonali utaskapacitás biztosítása érdekében

Forrás: Saját ábra

Dinamikus töltés esetén: A szükséges trolibuszok n_{tbus} száma nem változik. A felsővezetékes szakaszokat úgy szükséges kialakítani, hogy a viszonylat azonos számú járművel kiszolgálható legyen. Változatlan vonali utaskapacitás biztosítása mellett a járműszám változhat (13).

$$n_{tbus} = (1 - \Delta q) \cdot n_{tbus} \quad (13)$$

7. Egyidejűleg töltő járművek számának meghatározása

Statikus töltés esetén: A végállomáson töltő járművek $n_{ch(t)}$ száma a t időszakban a végállomáson tartózkodó autóbuszok száma alapján határozható meg. (14)

$$n_{ch}(t) = \sum p(t) \quad (14)$$

ahol p a töltés valószínűsége. A végállomáson minden autóbuszhoz rendelhető egy töltési valószínűség. A valószínűségi érték meghatározása az energiamérleg szerint történik. Az értékek egy lehetséges kategorizálását az 1. táblázat mutatja be. Elérhető szabad töltőberendezés valószínűsége növelhető a p és $\max(\epsilon)$ közötti különbség növelésével, mivel így több töltőberendezés telepítése válik szükségessé. Ez azonban csökkenti egy töltő átlagos kihasználtságát.

1. táblázat A töltés valószínűsége

ϵ	0-0,29	0,3-0,39	0,4-0,54	0,55-0,74	0,75-0,79	0,8-1,0
p	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0

Forrás: Saját értékmegadás

Dinamikus töltés esetén: Csatlakoztatott és töltő trolibuszok $n_{ch}(t)$ számának meghatározása t időintervallumban (13). A p valószínűség bevezetésével kifejezhető annak valószínűsége, hogy a jármű a t időszakban tölt.

$$n_{ch}(t) = n_{tbus,ij}(t) \cdot p \quad (15)$$

ahol $n_{tbus}(t)$ a trolibuszok száma a szakaszon a t időintervallumban. A figyelembe vett t időtartamnak megfelelően kicsinek kell lennie (maximum 1 perc), mivel a szükséges töltési teljesítményt a jármű gyorsítási karakterisztikája befolyásolja. A csúcsteljesítmény akkor adódik, ha a szakaszon lévő összes jármű gyorsít.

8. Töltőberendezések meghatározása

A végállomási statikus töltőberendezések számának, és azon szakaszok meghatározása, ahol felsővezeték kiépítése szükséges.

Statikus töltés esetén: A maximális töltési igény kielégítéséhez szükséges n_d végállomási töltőberendezés száma a (14) egyenlet alapján számítható.

$$n_d = \lceil \max(\sum n_{ch}(t)) \rceil + 1 \quad (16)$$

Dinamikus töltés esetén: Mohó telepítési stratégia alkalmazandó. Az a szakasz jelölendő ki felsővezeték telepítésre, ahol a járatok száma a teljes vizsgált hálózaton a legnagyobb. Ha a vételezett energia nem elegendő a további szakasz(ok) megtételéhez önjáró üzemben $\sum E_{CHARGED,ij} \geq \sum E_{DEMAND,ij}$, további felsővezeték szakasz(ok) kijelölése szükséges.

- VAGY a meglévő felsővezetékes szakasz kiterjesztése egy szomszédos szakasz kiválasztásával a fajlagos telepítési költségek minimalizálásával,
- VAGY egy teljesen különálló szakasz (szomszédos felsővezetékes szakasz nélkül) választása; például ott, ahol magas az egyidejűleg töltő járművek száma; a telepítési költség magasabb lehet, mivel további villamos hálózati beruházások szükségesek.

A telepítési költségek minimalizálásához kétirányú felsővezetékes szakaszok építése javasolt.

9. Beszerzési költség becslése

A becsült beszerzési költség a (15) egyenlettel adható meg az akkumulátoros elektromos autóbuszok vásárlására és a statikus töltők kiépítésére C_{ebus} , valamint a (16) egyenlettel trolibuszok vásárlására és a felsővezeték-hálózat kiépítésére C_{tbus} vonatkozóan.

$$C_{ebus} = n_{ebus} \cdot c_{ebus} + n_{ch} \cdot c_{ch} \quad (17)$$

$$C_{tbus} = n_{tbus} \cdot c_{tbus} + l_{ch} \cdot c_{cat} \quad (18)$$

ahol c_{ch} a statikus töltőberendezés névleges költsége, c_{cat} a töltéshez szükséges felsővezeték névleges költsége, c_{ebus} az akkumulátoros elektromos autóbusz beszerzési ára, c_{tbus} a trolibusz beszerzési ára.

A c_{grid} hálózatfejlesztési költségére közelítő becslés adható a végponton vagy egy szakaszon lévő összesített csúcsteljesítmény alapján (17).

$$C_{grid} = P_{peak} \cdot c_{grid} \quad (19)$$

ahol c_{grid} a hálózatfejlesztés nominális költsége, beleértve az erőművi kapacitásbővítést és az átviteli és elosztó hálózat fejlesztését. A P_{peak} a (18) egyenlet szerint számított csúcsteljesítmény.

$$P_{peak} = n_{ch}(t) \cdot P \quad (20)$$

Minél részletesebb költségadatokat állnak rendelkezésre, annál kevésbé lesznek az eredmények közelítő jellegűek.

Megjegyzés: a további infrastrukturális elemek, például a telephelyen lévő töltőberendezések, a telepített eszközök karbantartása és javítása nem tartozik jelen kutatástanulmány hatókörébe.

Esettanulmány

A kidolgozott módszert a kiterjedt tömegközlekedési hálózattal rendelkező Budapestre alkalmaztuk. A metró és a villamosvonalak mellett közelítőleg 250 autóbusz-viszonylat közel 3000 km hosszúságú hálózaton és 15 trolibusz-viszonylat közel 100 km hosszúságú hálózaton nyújt szolgáltatást. A Budapesti Közlekedési Központ adatai¹ alapján egy átlagos hétköznap 3,1 millió utazás történik, amelyek közel 50%-a autóbusszal vagy trolibussszal történik.

A teljes vizsgálat során összesen nyolc autóbusz-végállomást (43 viszonylattal) és hét viszonylatcsoportot (47 viszonylattal), összesen 85 viszonylatot elemeztünk a reggeli csúcs időszakban, 6-9 óra között. A vizsgált viszonylatokon a reggeli csúcsidőben a forgalomba kiadott járművek közel 43%-a közlekedik. A hét viszonylatcsoport esetében vizsgáltuk, hogy önjáró trolibuszokkal, vagy akkumulátoros elektromos autóbusszokkal előnyösebb az elektrifikáció, míg a végállomások vizsgálatánál csak az akkumulátoros elektromos autóbusszos elektrifikációt tekintettük.

Változók értékmegadása és egyszerűsítések

A tanítási időszakban, hétköznap reggel 6 és 9 óra között érvényes menetrendet és fordatervet vettük alapul.

A γ fogyasztási rátát a (Vepsäläinen et al., 2018) tanulmányban megadott általános fogyasztás alapján becsültük meg. Szóló jármű esetén a fogyasztás mértéke $\gamma = 0,9$ kWh/km, csuklós jármű esetén $\gamma = 1,3$ kWh/km.

A v_{max} maximális sebességet egy adott szakaszon elérhető átlagos sebesség alapján határoztuk meg.

- ha $v_{ave} \leq 25$ km/h, akkor $v_{max} = 30$ km/h,
- ha 25 km/h $< v_{ave} \leq 30$ km/h, akkor $v_{max} = 40$ km/h,
- ha $v_{ave} > 30$ km/h, akkor $v_{max} = 50$ km/h.

Segédüzemi fogyasztóként az alábbi fogyasztókat vettük figyelembe (Szilassy és Földes, 2022): HVAC, BMTS, légkompresszor, szervokormány, rögzítőfék, ablaktörlő, ajtó, lámpa, automata, utastájékoztató kijelző. Az egyszerűsítés érdekében ugyanazokat az értékeket alkalmaztuk szóló és csuklós járművek esetében.

A HVAC és BMTS rendszerek hőmérsékletfüggése jelentős összefüggést mutat (Basma et al., 2020; Vepsäläinen et al., 2018). Annak meghatározásához, hogy melyik hőmérsékletértékre érdemes tervezni, elemeztük a 2008 és 2019 közötti téli napi minimum és nyári maximum hőmérsékletértékeket előfordulási gyakoriságát. A téli napokon 16% az esélye annak, hogy a napi hőmérséklet alacsonyabb, mint -5°C . A legalacsonyabb fok az elmúlt időszakban -16°C volt. Nyári napokon 4,2% az esély, hogy a napi hőmérséklet 35°C fölé emelkedjen. A legmagasabb hőmérséklet 39°C volt. A 3. lépést a 44-es (csuklós) és a 144-es (szóló) viszonylatokra alkalmaztuk. A becsült energiafogyasztást különböző hőmérsékleteken a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat Becsült energiafogyasztás különböző hőmérsékleteken (példa)

Viszonylat	Külső hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]										
	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
44	26,69	25,59	22,15	19,35	17,19	15,69	14,83	14,61	15,04	16,12	17,85
144	20,23	17,25	14,74	12,71	11,14	10,04	9,42	9,26	9,58	10,36	11,62

Forrás: Saját számított adatok

Az energiafogyasztás értéke hidegben nagyobb, mint melegben. Számítások során a -5°C -hoz tartozó energiafogyasztást vettük figyelembe. Ennek megfelelően egy év alatt maximum 4% az esélye annak, hogy a számítottnál magasabb az energiafogyasztás. Ez mindösszesen 15 nap egy évben, kizárólag a téli időszakban. Ekkor a járművek utasterének alacsonyabb hőmérsékletre történő fűtésével a fogyasztás csökkenthető.

A felsővezetékes szakaszok figyelembe vett P névleges teljesítménye 100 kW. Statikus töltők esetében hat különböző névleges teljesítményt vettünk figyelembe a tervváltozatok kialakítása során; $P_i = [100, 200, 300, 350, 400, 450]$ kW. Egyszerűsítésképp egy adott végállomáson az összes töltő azonos névleges teljesítményű. A töltési hatékonyság a transzformátor veszteségből, a kábelvesztéséből, az akkumulátorfigyelő rendszer (BMS) veszteségből, az akkumulátorkomponens ellenállásából és a különböző elektromos alkatrészek feszültségeseéséből származik. A figyelembe vett η_{ch} töltési hatékonyság 0,85 akkumulátoros elektromos autóbusszoknál és 0,7 az önjáró trolibuszoknál.

¹ <https://bkk.hu/magunkrol/rolunk/a-bkk-szamokban/>

Két-két különböző akkumulátorkapacitású (B) járművet tekintettünk a vizsgálat során. Azzal a feltételezéssel éltünk, hogy a hasznos akkumulátorkapacitás fele a névlegesnek. Ez egy maximális, kisebb ráhagyással számított érték (worst case), amely feltételezi a 80%-os akkumulátorhatékonyságot és az optimális 20-80%-os tartományban üzemeltetett akkumulátorokat. A figyelembe vett akkumulátorkapacitást és egy jármű beszerzési árát a 3. táblázat foglalja össze. Változatlan járműtömeeggel számoltunk; a járműtömeg (m) szóló járműveknél 17 tonnának, csuklós járműveknél 29 tonnának választottuk. Azonban a nagyobb akkumulátorkapacitás a szállítható személyek számának csökkenését jelentheti. A piacon elérhető járművek összehasonlításával meghatároztuk a szállítható személyekben bekövetkező változást a jelenlegi dízel és pár kilométeres önjárásra képes trolibuszokat véve referencia értéknek (100%).

A töltőinfrastruktúra figyelembe vett beszerzési költségét gyakorlati és piacelemzésből származó adatok alapján becsültük meg. Egy felsővezeték ccat névleges költsége 750 000 EUR/km. Megkülönböztettük, hogy egy szakasz hány viszonylatot szolgál ki. Így a forgalomtól függő villamosenergia-hálózati terhelés miatt a felsővezeték költsége 1-2 viszonylat kiszolgálása esetén 750 000 EUR/km, 3-5 viszonylat kiszolgálása esetén 1 000 000 EUR/km, 5-nél több viszonylat kiszolgálása esetén 1 500 000 EUR/km. Hegyvidéki szakasz esetén – a bonyolultabb terepviszonyok miatt – az eggyel magasabb kategóriát vettük számításba. Egy statikus töltő c_{cn} költsége a 100, 300 és 450 kW névleges teljesítmény szerint 50 000, 200 000 és 450 000 EUR. A villamos hálózatfejlesztés névleges c_{grid} költségét 600.000 EUR/MW-nak választottuk.

3. táblázat Figyelembe vett akkumulátorkapacitás és beszerzési költség

		Akkumulátor-kapacitás [kWh]		Beszerzési költség [EUR]	Utas-kapacitás [fő]	Rel. Kapacitás [%]
		névleges*	hasznos			
akkumulátoros elektromos autóbusz	szóló, kis kapacitással	200	100	562 500	78	100
	szóló, nagy kapacitással	250	125	600 000	56	72
	csuklós, kis kapacitással	300	150	750 000	120	100
	csuklós, nagy kapacitással	400	200	850 000	90	75
önjáró trolibusz	szóló, kis kapacitással	50	25	500 000	78	100
	szóló, nagy kapacitással	100	50	537 500	56	72
	csuklós, kis kapacitással	50	25	587 500	120	100
	csuklós, nagy kapacitással	100	50	625 000	98	82

Forrás: Saját értékmegadás piacon elérhető járművek adatainak figyelembevételével

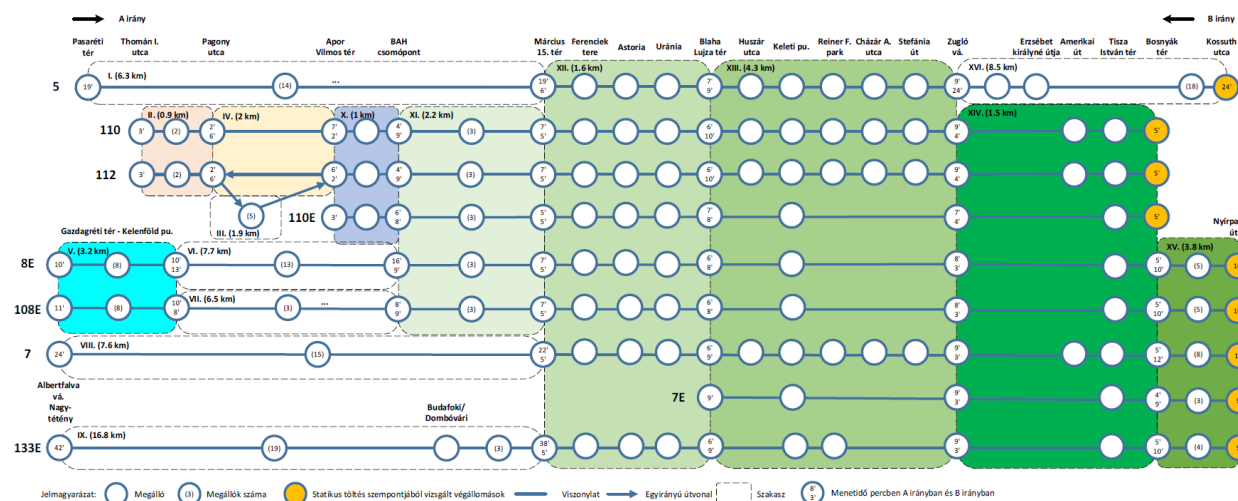
A katalógus adatokból a Mercedes és a Solaris releváns járműveit vettük figyelembe. A relatív kapacitás a jelenleg forgalomban lévő dízelüzemű autóbuszok kapacitásaihoz képest értendő.

Eredmények és megjegyzések

A módszer alkalmazását részletesen egy, a városközponton áthaladó, a város délnyugati és északkeleti részét összekötő viszonylatcsoporton ismertetjük. A Rákóczi úti viszonylatcsoport, 2022. júniusi állapot alapján az alábbi viszonylatokból állt: 5, 7, 7E, 8E, 108E, 110, 110E, 112, 133E (aláhúzással a szóló autóbuszokkal kiszolgált viszonylatokat jelöltük). Az „E” jelek a gyors, expressz viszonylatokat jelölik, amelyek nem minden megállót szolgálnak ki.

1. lépés - Modellézés: A hálózati modellt a 7. ábra mutatja be. A viszonylatok jelentős közös szakaszokkal rendelkeznek. Több viszonylat esetén a végállomások is megegyeznek. A közös hálózati elemeket tekintve három végállomást és 16 szakaszt határoztunk meg. Viszonylatonként a két irányt külön kezeltük, irányonként eltérő energiaigényt megkülönböztetve. A XIII. szakaszon egy rövid, 400 m-es hosszban egyirányú felsővezeték is található

(79-es viszonylat), ezt a szakaszt a vizsgálat során figyelmen kívül hagytuk. A szakaszhatárok a közös szakaszok kezdőpontjától a végpontjáig tartanak. A következő szakaszok hegyvidéki szakaszok jelentős emelkedőkkel: I, II, III, IV, V, VI, X, XI.



8. ábra Hálózati ábra

Forrás: Saját ábra

Az adott szakasz hosszát online térkép segítségével mértük le; az egyes szakaszokon a menetidőt a statikus menetrend alapján képeztük. Egy szakaszon egyidőben egyszerre tartózkodó járművek számát szintén a menetrend alapján határoztuk meg.

Statikus végállomási töltés vizsgálatánál a végállomáson elérhető töltési teljesítmény alapján tervváltozatokat határoztunk meg; a figyelembe vett hat különböző névleges teljesítményű töltőpont szerint. Feltételeztük, hogy az optimalizálás során legjobbnak ítélt töltési teljesítmény nyújtható is, az adott végállomáson.

Dinamikus, felsővezetékes töltésnél a Mohó-algoritmust követve a XIII. szakaszt jelöltük ki elsőnek (legtöbb járat), majd további szomszédos szakaszokat adtunk hozzá.

2. lépés – Energiafogyasztás számítása: A szakaszonként fogyasztott energiaértéket viszonylatonként határoztuk meg (4. táblázat). Az egyes szakaszokon a megállások száma befolyásolja a fékezési veszteség miatt fogyasztott energiát. A hegyvidéki szakaszon lejtőn mérve a emelkedési veszteség akár negatív is lehet, mivel az akkumulátorba energia táplálható vissza. A fogyasztott energia ugyanazon a szakaszon különbözhet annak függvényében, hogy szóló vagy csuklós autóbusz közlekedik.

4. táblázat Energiafogyasztás egy szakaszon viszonylatonként (kivonat)

Fogyasztás	Irány	...	VI. (8E)	VII. (108E)	...	X. (110, 112)	XI. 110, 112	XI. (8E, 108E)	...
b_{ij} [kWh/km]	A	...	0,51	0,36	...	0,49	0,3	0,51	...
	B	...	0,47	0,6	...	0,58	0,3	0,51	...
e_{ij} [kWh/km]	A	...	-0,67	0,02	...	-1,48	-0,22	-0,37	...
	B	...	0,84	-0,02	...	1,85	0,27	0,47	...
$E_{DEMAND,ij}$ [kWh]	A	...	8,74	10,94	...	-0,09	2,15	3,16	...
	B	...	20,13	12,21	...	3,34	3,24	5,01	...
$E_{AUX,ij}$ [kWh]	A	...	6,16	3,08	...	1,54	2,7	2,7	...
	B	...	5	3,08	...	0,77	3,46	3,46	...
$E_{DEMAND,ij}$ [kWh]	A	...	14,9	14,02	...	1,45	4,85	5,85	...
	B	...	25,13	15,29	...	4,11	6,7	8,47	...

Forrás: Saját számított adatok

A teljes vonali energiafogyasztás az egyes szakaszokra meghatározott értékek összegzésével számítható (5. táblázat). Mivel vonalanként csak egy végállomást vettünk figyelembe potenciális töltési helynek, ezért mindkét irányt egy töltéssel szükséges lefedni.

5. táblázat Teljes energiafogyasztás viszonylatonként és irányonként [kWh]

Irány	5	7	7E	8E	108E	110	110E	112	133E
A	61,17	59,47	25,41	67,58	57,03	26,61	22,76	25,97	75,87
B	66,02	56,09	23,75	68,04	67,87	42,21	25,73	42,21	69,74
Összesen	127,2	113,6	49,2	135,6	124,6	68,6	48,5	68,2	145,6

Forrás: Saját számított adatok

Ennek megfelelően elegendő kisebb akkumulátorkapacitácú (200 kWh névleges) szóló elektromos autóbusz a 110, 110E, 112 viszonylatra, és kisebb akkumulátorkapacitású (300 kWh névleges) csuklós a 7, 7E viszonylatokra.

3. lépés – Lehetséges töltési idő meghatározása: A jelenlegi fordatervek alapján meghatároztuk, hogy egy autóbusz mennyi időt tölt a végállomáson. Mivel Budapesten a műszak során egy járművezető egy autóbuszt vezet, a sofőrök pihenő idejét is figyelembe vettük, mint lehetséges töltési idő. Trolibuszok esetében a lehetséges töltési időt az i és j megállóhelyek közötti statikus menetrend adja meg. A 6. ábrán tüntettük fel az utazási időket. Az „A” irány időértékét a felső szám jelzi, míg a „B” irány időértékét az alsó szám mutatja.

4. lépés – Tölthető energia becslése: Statikus töltőn leadott percenkénti energia rendre 1,42; 2,83; 4,25; 4,96; 5,67 és 6,38 kWh 100, 200, 300, 350, 400, 450 kW töltési teljesítmény és a figyelembe vett töltési hatékonyság mellett. Például: dinamikus, felsővezetékes töltés esetén a XI. szakaszon: „A” irányban 5,83 kWh (ha az utazási idő: 5 perc) vagy 8,16 kWh (ha az utazási idő: 7 perc), „B” irányban 9,33 kWh (ha az utazási idő: 8 perc) vagy 10,5 kWh (ha az utazási idő: 9 perc).

5. és 6. lépés – Energiamérleg és a szükséges járművek számának számítása: Az energiamérleg alapján vannak olyan autóbuszok, amelyeket nem lehet teljesen feltölteni a végállomáson, ezért menetugrás és további járműbeállítás szükséges. Statikus végállomási töltés esetén a töltési teljesítmény alapján szükséges járművek számát végállomásonként és viszonylatonként a 6. táblázat tartalmazza. Jelenleg a 110, 110E és 112 viszonylatokat ugyanazok az autóbuszok szolgálják ki. A flotta növekedés 50% feletti, ha a töltési teljesítmény 100 kW, és 11%, ha a töltési teljesítmény 450 kW. A 7E és 108E kivételével minden viszonylaton legalább egy további akkumulátoros elektromos autóbuszra szükség van. Ugyanennyi akkumulátoros elektromos autóbusz elegendő a 7E viszonylat kiszolgálásához minimum 350 kW töltőteljesítmény, és 108E viszonylat kiszolgálásához minimum 200 kW töltőteljesítmény biztosításával.

6. táblázat Szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok száma töltési teljesítmény szerint

	Viszonylat	Jelenlegi	Tervváltozatok (Töltési teljesítmény alapján [kW])					
			100	200	300	350	400	450
Buszok száma	5	20	30	25	23	23	23	22
	7	16	24	20	18	18	18	17
	7E	18	24	20	19	18	18	18
	8E	19	29	24	22	22	21	21
	108E	3	4	3	3	3	3	3
	110/110E/112	27	36	32	30	30	30	30
	133E	19	30	24	22	22	21	21

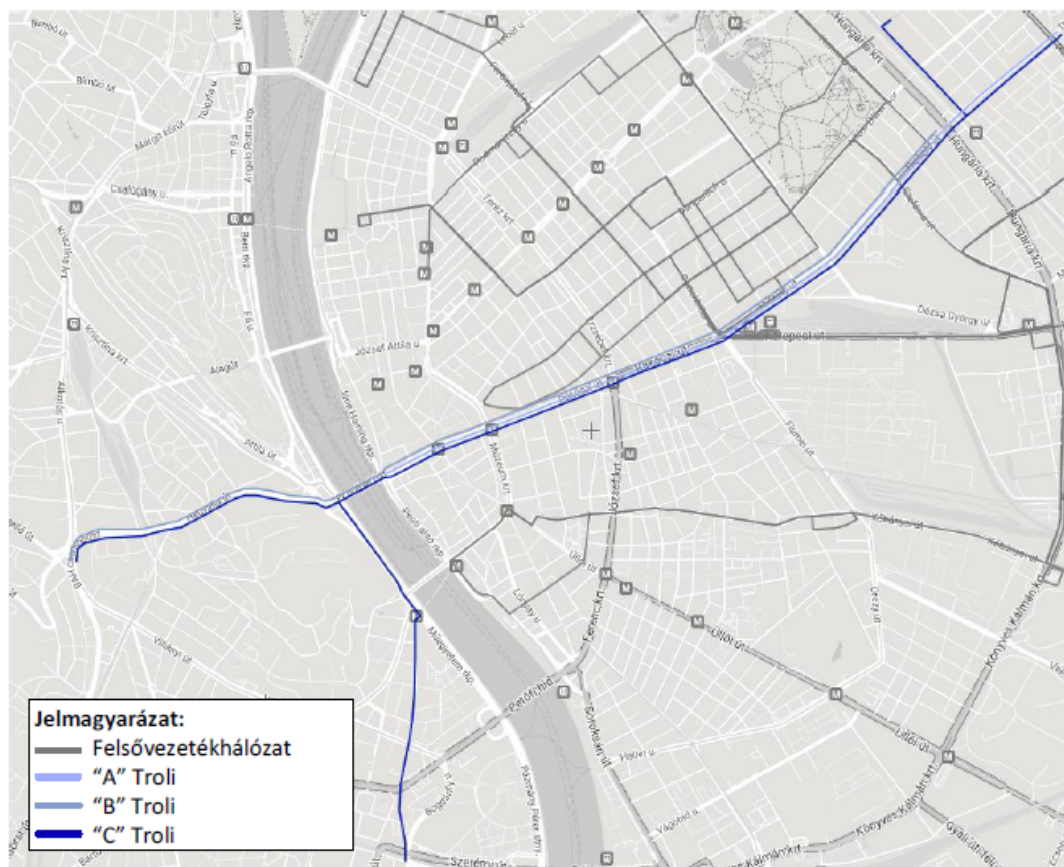
Forrás: Saját számított adatok

Önjáró trolibuszok alkalmazásával és felsővezetés-szakaszok kiépítésével elektrifikálható viszonylatokat a 7. táblázat foglalja össze a trolibuszok névleges akkumulátorkapacitásának feltüntetése mellett változatonként. Az „A” tervváltozatban a XII., XIII. és XIV. szakaszon kiépítendő felsővezeték-hálózat nem tud elegendő energiát biztosítani az önálló szakaszok teljesítéséhez az 5-ös, 8E és 108E viszonylatok esetében. A „B” tervváltozatban a XI., XII. és XIII. szakaszon kiépített felsővezeték-hálózat esetén csak az 5-ös és a 133E viszonylatok elektrifikációja nem lehetséges. A „B” változat kiegészítésével képezhető a „C” tervváltozat; a IX. szakaszon a Budafoki út/Dombóvári útig (további 4,8 km) és a XVI. szakaszon az Erzsébet királyné útig (további 1 km) javasolt a felsővezetékes szakasz meghosszabbítása. Ezen kiegészítéssel a 133E és az 5-ös viszonylatok is kiszolgálhatók önjáró trolibuszokkal. A trolibuszok száma minden tervváltozatban megegyezik a dízel autóbuszok jelenlegi számával. A trolibusz tervváltozatokat térképes nézetben a 8. ábra foglalja össze.

7. táblázat A viszonylatokon alkalmazandó trolibuszok minimális névleges kapacitása változatonként

Viszonylat	Trolibusz tervváltozat		
	A	B	C
5	nem kiszolgált	nem kiszolgált	100 kWh
7	100 kWh	100 kWh	100 kWh
7E	50 kWh	50 kWh	50 kWh
8E	nem kiszolgált	100 kWh	100 kWh
108E	nem kiszolgált	100 kWh	100 kWh
110	50 kWh	50 kWh	50 kWh
110E	50 kWh	50 kWh	50 kWh
112	50 kWh	50 kWh	50 kWh
133E	nem kiszolgált	nem kiszolgált	100 kWh

Forrás: Saját számított adatok



9. ábra Trolibusz tervváltozatok

Forrás: Saját ábra OSM térképen

7. és 8. lépés – Egyidejűleg töltő járművek számának és töltőberendezések meghatározása: A szükséges statikus töltőberendezések száma egy végállomáson megegyezik az egyidejűleg a végállomáson töltőjárművek számával. A 8. táblázat a statikus töltőkészülékek számát foglalja össze a töltési teljesítmény szerint a vizsgált végállomásokon. A dinamikus töltők hossza megegyezik a szakaszok hosszával: „A” tervváltozat: 7,4 km; „B” tervváltozat: 8,1 km; „C” tervváltozat: 13,9 km.

8. táblázat Statikus töltőberendezések száma a végállomásokon

Végállomás	Kiszolgált viszonylat	Tervváltozatok (Töltési teljesítmény alapján [kW])					
		100	200	300	350	400	450
Kossuth utca	5	11	6	4	4	3	3
Bosnyák tér	110/110E/112	10	6	4	4	3	3
Nyírpalota út	7, 7E, 8E, 108E, 133E	39	20	14	12	14	12

Forrás: Saját számított adatok

9. lépés – Beszerzési költség becslése: A hat tervváltozatból három akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozat beszerzési költségét végállomásonként a 9. táblázat foglalja össze. A táblázat tartalmazza a végállomási csúcsteljesítmény értékeket. Minden végállomás esetén a 450kW teljesítményű töltőberendezések alkalmazása a leginkább költségghatékony.

Végállomás	Kiszolgált viszonylat	Tervváltozatok (Töltési teljesítmény alapján [kW])					
		100	200	300	350	400	450
Kossuth utca	5	11	6	4	4	3	3
Bosnyák tér	110/110E/112	10	6	4	4	3	3
Nyírpalota út	7, 7E, 8E, 108E, 133E	39	20	14	12	14	12

9. táblázat Akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozatok beszerzési költsége végállomások szerint (kivonat)

Forrás: Saját számított adatok

Vannak olyan viszonylatok, amelyek kisebb teljesítménnyel is kiszolgálhatók a járművek számának növelése nélkül, ugyanakkor célunk végállomásonként egységes töltési teljesítmény nyújtása volt, annak érdekében, hogy a járművekhez ne kelljen dedikált töltőt kijelölni. A csak akkumulátoros elektromos autóbuszokkal történő elektrifikáláshoz összesen 18 db 450 kW teljesítményű statikus termináltöltőre és 129 db járműre van szükség.

A trolibusz tervváltozatok és a leggazdaságosabb, csak akkumulátoros elektromos autóbuszokat és végállomási statikus töltőket tartalmazó változat főbb jellemzőit a 10. táblázatban foglaltuk össze. Az eltérő megállóhely-kiosztás miatt kitérők beépítése szükséges lehet a trolibuszváltozatok esetében, ami növelheti a költségeket. Két esetet különböztettünk meg:

1. eset: az akkumulátor tömege miatti utaskapacitás-csökkenést figyelmen kívül hagytuk.
2. eset: a jelenleg biztosított viszonylatonkénti utaskapacitás változatlanul tartása; többlet járművek számának meghatározása az akkumulátor tömege miatti utaskapacitás-csökkenést kompenzálандó

Végállomás	Kossuth utca			Bosnyák tér			Nyírpalota út		
Töltési teljesítmény [kW]	100	300	450	100	300	450	100	300	450
Töltőberendezések száma	11	4	3	10	4	3	39	14	12
Csúcsteljesítmény [kW]	1100	1200	1350	1000	1200	1350	3900	4200	5400
Töltőberendezések költsége [Mill. EUR]	0,55	0,8	0,9	0,5	0,8	0,9	0,195	0,28	0,36
Villamos hálózati költség [Mill. EUR]	0,66	0,72	0,81	0,6	0,72	0,81	2,34	2,52	3,24
Járművek száma	30	23	22	36	30	30	107	81	77
Járművek költsége [Mill. EUR]	22,5	17,3	16,5	86,2	65,2	62,0	89,6	67,7	64,5
Összköltség [Mill. EUR]	23,7	18,8	18,2	87,3	66,7	63,7	90,8	73,0	71,3

1. eset: utaskapacitásváltozás figyelmen kívül hagyása, 2. eset: jelenlegi utaskapacitás változatlanul tartása

Forrás: Saját számított adatok

Azzal a feltételezéssel élünk, hogy a végső cél az összes jármű cseréje. Ennek megfelelően, ha egy viszonylaton közlekedő hagyományos meghajtású járművek nem válthatók ki önjáró trolibuszokkal, akkor akkumulátoros elektromos autóbuszok alkalmazását javasoljuk. Az „A” változatban további 61 akkumulátoros elektromos autóbusz beszerzése szükséges, Rákospalota, Kossuth utcánál 3 db, Újpalota, Nyírpalota útnál 6 db statikus töltő létesítése mellett az 5, 8E, 108E és 133E viszonylatok elektrifikációjához. A „B” változatban már csak 43 akkumulátoros elektromos autóbusz, valamint 3-3 statikus töltő szükséges az 5 és a 133E viszonylatok kiszolgálására. A „C” változatban minden viszonylat kiszolgálható önjáró trolibuszokkal. A legalacsonyabb költsége a „C” trolibusz tervváltozatnak van, amelyben a leghosszabb a felsővezetékes szakasz, de nincs szükség akkumulátoros elektromos autóbuszokra és statikus végállomási töltőkre. A „C” tervváltozat összköltsége mindkét esetben alacsonyabb a tisztán akkumulátoros elektromos autóbuszokat alkalmazó tervváltozat összköltségéhez képest. Ennek fő oka, hogy a megnőtt flottaméret és az akkumulátoros elektromos autóbuszok trolibuszhoz viszonyított magasabb beszerzési ára növeli a költséget. Ennek megfelelően ezen viszonylatcsoport elektrifikációjára a legjobb megoldás önjáró képességgel rendelkező trolibuszok alkalmazása, a fonódó szakaszon dinamikus, felsővezetékes töltés használatával.

Összegzés

A teljes vizsgálatot tekintve (összes végállomás és összes vizsgált viszonylatcsoport esetében), a statikus végállomási töltéssel elektrifikálandó viszonylatoknál, mind a nyolc elemzett végállomást figyelembe véve a szükséges végállomási töltőberendezések száma 53 (32 db 300 kWh névleges akkumulátorkapacitással és 21 db 450 kWh névleges akkumulátorkapacitással). A töltők költsége 12 780 000 EUR, a hálózatfejlesztés költsége 11 430 000 EUR. A csúcsgény 19 050 kW. Az összes vonalat ki lehet szolgálni kisebb névleges akkumulátorkapacitású csuklós járművekkel. A szükséges 249 akkumulátoros elektromos autóbusz becsült beszerzési költsége 144 562 500 EUR (155 250 000* EUR). A járművek alapvető paraméterei a következők:

- 168 db szóló autóbusz 200 kWh névleges akkumulátorkapacitással,
- 81 db csuklós autóbusz 300 kWh névleges akkumulátorkapacitással.

Jelenleg 233 hagyományos autóbusz közlekedik a vizsgált viszonylatokon. A flottanövekedés 16 jármű (+6,9%). Minden viszonylat kiszolgálására elegendő a kisebb névleges akkumulátorkapacitású jármű. A dízel autóbuszokhoz képest a szállítható személyek számában ezen autóbuszok esetében a különbség minimális, így a viszonylatok utaskapacitása változatlanul tekinthető.

A hét vizsgált viszonylatcsoport esetében a legtöbb viszonylat elektrifikációja önjáró trolibuszsal a kedvezőbb. Vannak azonban olyan viszonylatok, amelyeket nem lehet hatékonyan kiszolgálni önjáró trolibuszokkal (67, 122,

169E), mivel az önálló szakaszok hosszúak. Összesen 40 km új kétirányú felsővezeték-hálózat építése szükséges, amelynek becsült költsége 59 750 000 EUR.

A szükséges trolibuszok számát a két esetben (utaskapacitás-csökkenés figyelmen kívül hagyása, vagy változatlan össz-utaskapacitást feltételezve) a 11. táblázatban foglaltuk össze. Az 1. esetben mivel változatlan járműtömeggel, de növekvő akkumulátorkapacitással számoltunk, a szállítható személyek száma csökken. A kialakítás miatt a szóló trolibuszok esetében, a számítás alapján nincs férőhelycsökkenés sem az 50 kWh, sem a 100 kW névleges akkumulátorkapacitású jármű esetében, míg a kapacitásváltozás a csuklós járművek esetén -18% (50 kW) illetve -28% (100 kW).

11. táblázat Szükséges trolibuszok száma

Jellemzők/Tervváltozatok	Trolibusz tervváltozatok			Akkumulátoros elektromos autóbusz tervváltozat
	A	B	C	
Felsővezeték hossza [km]	7,4	9,6	13,9	-
Csúcsteljesítmény [kW]	74 075	154 310	239 400	-
Statikus töltők száma (450 kW)	9	6	-	18
Trolibuszok száma	61 (65*)	83 (94*)	128 (145*)	
Akkumulátoros elektromos autóbuszok száma	67 (89*)	43 (53*)	-	136 (161*)
Felsővezeték költsége (hálózati költséggel) [ezer EUR]	7 400	14 400	20 850	-
Statikus töltők költsége	2 700	1 800	-	5 400
Hálózati költségek a végállomásoknál [ezer EUR]	2 430	1 620	-	4 860
Trolibuszok beszerzéseik költsége [ezer EUR]	34 075 (36 575*)	47 825 (54 700*)	72 200 (86 575*)	-
Akkumulátoros elektromos autóbuszok beszerzéseik költsége [ezer EUR]	54 750 (73 450*)	34 350 (42 850*)	-	99 575 (124 225*)
Teljes költség [ezer EUR]	101 355 (122 555*)	99 995 (115 370*)	93 050 (107 425*)	109 835 (134 485*)

1. eset: utaskapacitásváltozás figyelmen kívül hagyása, 2. eset: jelenlegi utaskapacitás változatlanul tartása

Forrás: Saját számított adatok

A trolibusszal nem kiszolgálható viszonylatok elektrifikációjához minden viszonylat esetében egy további jármű szükséges a dízel üzemi járművek kiváltásához (plusz töltési idő miatt), így összesen 28 (18 937 500 EUR), változatlan utaskapacitás biztosítása mellett pedig további három, összesen 31 (20 812 500* EUR) akkumulátoros elektromos autóbusz és hét végállomáson statikus töltőállomás fejlesztése szükséges (4 600 000 EUR)

Így a becsült teljes elektrifikációs költség változatlan utaskapacitás biztosítása mellett 453 310 000 EUR, a töltőegységek beszerzésével, hálózatfejlesztéssel, felsővezeték kiépítésével míg az utaskapacitás csökkenésének figyelmen kívül hagyásával 418 372 500 EUR. További költség jelentkezhet a telephelyi kiegészítő infrastruktúra fejlesztésénél, valamint a tartalékjárművek vásárlása miatt.

A 3. táblázatban megadott adatokkal a trolibuszviszonylattá alakítandó autóbusz-viszonylatokat tekintve a legnagyobb utaskapacitáscsökkenés a 20E; a 8E; a 133E; valamint az 5-ös és 7-es autóbuszviszonylatcsoportok esetében történik rendre 23,6%; 23,5%; 23,1%; 21,7% és 17,9% értékben. A szolgáltatás színvonalának fenntartása érdekében a kieső utaskapacitást megfelelő számú plusz jármű vonalba állításával pótolni szükséges. A trolibuszokkal vizsgált

viszonylatokon összességében a kapacitáscsökkenés 5,3%. Az utaskapacitás-csökkenés elkerülése érdekében többlett járművek beszerzése szükséges, ami a menetrend változtatását is jelenti.

Konklúzió

A cikk a városi autóbusz-hálózat elektrifikációjára használható komplex tervezési módszert mutatott be. A módszer a jármű, a töltési infrastruktúra és a viszonylatok (útvonal, menetrend stb.) jellemzőit figyelembe véve a viszonylatcsoportos optimalizálást támogatja. Az optimalizálás során különböző akkumulátoros elektromos autóbuszokat és önjáró képességgel rendelkező trolibuszokat, valamint statikus végállomási és dinamikus felsővezetékes töltést vizsgáltunk.

A módszert budapesti esettanulmányban alkalmaztuk és validáltuk. Nyolc autóbusz-végállomást és hét viszonylatcsoportot, összesen 85 viszonylatot elemeztünk, vizsgálva a leghatékonyabb elektrifikációs lehetőségeket. Az esettanulmány főbb megállapítása, hogy a közös végállomással, de minimális fonódó szakasszal rendelkező 47 vizsgált viszonylat esetében 6,9%-kal több akkumulátoros elektromos autóbuszra van szükség az indulási időpontok megváltoztatása nélkül. Megállapítottuk továbbá, hogy a hét, jelentős közös szakasszal rendelkező viszonylatcsoport esetében a fonódó szakaszon felsővezeték telepítése a kedvezőbb költségű, szemben a végállomási töltők alkalmazásával.

Ugyanakkor megállapítható, hogy a nagyobb akkumulátorkapacitás miatt, a szállítható személyek számában jelentős csökkenés tapasztalható több viszonylatcsoport esetében (pl. 20; 8E, 133E); a szolgáltatási színvonal megtartása érdekében többlettjárművek beállítása szükséges, ami az elektrifikációs költség növekedését eredményezi.

A módszer továbbfejlesztése során tervezzük az ütemezés korlátjainak feloldását és a becsült változók pontosítását, így például a villamosenergia-hálózati költségek és a rendelkezésre álló hálózati kapacitás pontosabb felmérését. További célunk egy töltésütemezési módszer kidolgozása, amely tovább pontosíthatja a szükséges töltőberendezések és járművek számát.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a BKK - Budapesti Közlekedési Központnak az autóbuszjáratokkal kapcsolatos adatszolgáltatásért.

Jelölésjegyzék

B	akkumulátor kapacitás
b_{ij}	fékezési veszteség
c_{cat}	felsővezeték névleges költsége
c_{ch}	töltőberendezés névleges költsége
c_{grid}	hálózatfejlesztés névleges költsége
E_{AUX}	segédüzemi energiafogyasztás
E_{DEMAND}	teljes energiaigény
E_{DRIVE}	menetdinamikai energiafogyasztás
e_{ij}	emelkedési veszteség
i	autóbusz-megálló sorszáma
l_{ch}	felsővezetékes szakaszok teljes hossza
l_{ij}	szakasz hossza
n_{bus}	jelenleg szükséges járművek száma
n_{ebus}	szükséges akkumulátoros elektromos autóbuszok száma
n_{ch}	szükséges statikus töltőberendezések száma
n_{tbus}	szükséges trolibuszok száma
n_{ts}	menetugrás (a következő menet teljesítése szükséges csak)
$n_{ch}(t)$	töltő járművek száma a t intervallumban
$n_{tbus,ij}(t)$	trolibuszok száma egy szakaszon egy adott intervallumban
p	töltés valószínűsége

P_{AUX}	segédüzemi rendszerek teljesítményigénye
P_{peak}	villamos hálózat csúcsteljesítménye
SoC	akkumulátor töltöttségi állapota
t_{ch}	töltési idő
t_{hw}	követési időköz
t_{ij}	utazási idő a szakaszon
γ	fogyasztási ráta
ϵ_{ij}	energiamérleg
η_{batt}	akkumulátor kapacitáskihasználása
η_{ch}	töltési hatékonyság
η_{PC}	energiaátalakító hatékonysága




Felhasznált irodalom

- Basma, Hussein et al. (2020): Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. *Energy (Oxford, England)*, 207(118241), 118241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>
- Baumeister, Dirk et al. (2021). Optimal Catenary Planning of Trolleybus Systems. ETG Congress.
- Borén, Sven (2019): Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. *International Journal of Sustainable Transportation*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1666324>
- Csonka Bálint (2021): Optimization of static and dynamic charging infrastructure for electric buses. *Energies*, 14(12), 3516. <https://doi.org/10.3390/en14123516>
- Electric Bus Market. *MarketsandMarkets*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electric-bus-market-38730372.html> (2023. március 29.)
- He, Yi – Song, Ziqi – Liu, Zhaocai (2019): Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. *Sustainable Cities and Society*, 48(101530), 101530. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101530>
- Laib, Felix – Braun, Andreas – Rid, Wolfgang (2019): Modelling noise reductions using electric buses in urban traffic. A case study from Stuttgart, Germany. *Transportation Research Procedia*, 37, 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.206>
- Leou, Rong-Ceng – Hung, Jeng-Jiun (2017): Optimal charging schedule planning and economic analysis for electric bus charging stations. *Energies*, 10(4), 483. <https://doi.org/10.3390/en10040483>
- Lin, Yuping et al. (2019): Multistage large-scale charging station planning for electric buses considering transportation network and power grid. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*, 107, 423–443. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.009>
- Liu, Tao – (Avi) Ceder, Avishai (2020): Battery-electric transit vehicle scheduling with optimal number of stationary chargers. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*, 114, 118–139. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.009>
- Ojer, Iñaki et al. (2020). Development of energy management strategies for the sizing of a fast charging station for electric buses. 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe).
- Paternost, Rudolf Francesco et al. (2022): Catenary-powered electric traction network modeling: A data-driven analysis for trolleybus system simulation. *World Electric Vehicle Journal*, 13(9), 169. <https://doi.org/10.3390/wevj13090169>
- Sebastiani, Mariana Teixeira – Luders, Ricardo – Fonseca, Keiko Verónica Ono (2016): Evaluating electric bus operation for a real-world BRT public transportation using simulation optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: A Publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council*, 17(10), 2777–2786. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2525800>
- Szilassy Péter Ákos – Földes Dávid (2022): Consumption estimation method for battery-electric buses using general line characteristics and temperature. *Energy (Oxford, England)*, 261(125080), 125080. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125080>
- Uslu, Tugce – Kaya, Onur (2021): Location and capacity decisions for electric bus charging stations considering waiting times. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 90(102645), 102645. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102645>
- Vepsäläinen, Jari et al. (2018): Energy uncertainty analysis of electric buses. *Energies*, 11(12), 3267. <https://doi.org/10.3390/en11123267>
- Wang, Xiumin et al. (2017): Electric vehicle charging station placement for urban public bus systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems: A Publication of the IEEE Intelligent Transportation Systems Council*, 18(1), 128–139. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2563166>
- Wang, Yongxing – Liao, Feixiong – Lu, Chaoru (2022): Integrated optimization of charger deployment and fleet scheduling for battery electric buses. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 109(103382), 103382. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103382>
- Wang, Yusheng et al. (2017): Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in Davis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 100, 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.01.001>
- Wu, Xiaomei et al. (2021): A novel fast-charging stations locational planning model for electric bus transit system. *Energy (Oxford, England)*, 224(120106), 120106. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120106>
- Zeus.Eu. <http://zeus.eu/uploads/publications/documents/zeus-report2017-2018-final.pdf> (2023. március 29.)

Tudományos cikk

Automata forgalmi statisztika objektumdetektálás és adaptív járműtrajektória klaszterezés alapján

Beküldve: 2023.06.20.
Elfogadva: 2023.09.26.
Online közzétéve: 2023.12.18.

-  **AGG ÁRON DÁVID** PhD hallgató, Széchenyi István Egyetem, GIVK - MMTDI, aggaaron@gmail.com
-  **PÉTER BENCE GÁBOR** BSc hallgató, Széchenyi István Egyetem, GIVK, peter.bence2000@gmail.com
-  **DR. HORVÁTH ANDRÁS** egyetemi docens, minőségügyi rektorhelyettes, Széchenyi István Egyetem, GIVK - Fizika és Kémia tanszék, horvatha@sze.hu

Kivonat: Az Intelligens Közlekedési Rendszerek (ITS) dinamikusan fejlődő és széles körben kutatott terület manapság. Nagyon szerteágazó tudományterület, amelynek fontos része a forgalmi dinamikaelemzés, forgalomszámlálás és a forgalmi előrejelzések. Ebben a cikkben egy adaptív forgalmi statisztikageneráló eljárást mutatunk be. A módszer álló megfigyelő szemszögéből készült videófelveteleken YOLOv7 objektumdetektorral detektálja a közlekedő járműveket és azonosítja azok kategóriáját. A videórészleteken elvégzett detektálásokat az általunk bemutatott módszer DeepSort követő algoritmus segítségével kapcsolja össze, aminek eredményeként előállnak az elhaladó járművek menetvonalai. Az útvonalak csoportokba sorolását OPTICS csoportképző (klaszterező, angolul clustering) eljárással végezzük el, aminek paraméterezésével szabályozzuk a létrejövő statisztika részletességét, ezáltal lehetővé válik akár utcafinomságú vagy sávszintű forgalmi adatok generálása ugyanabból a felvételtől. Jelen cikkünkben négy különböző helyszínen készült felvételen teszteltük az eljárásunkat, aminek eredményeként nemcsak az egyes irányok tetszőleges felbontású forgalmi statisztikáit állíthatjuk elő, hanem azok időszakok szerinti és útirány szerinti normalizáltjait is. A normalizált statisztikai adatok megmutatják a forgalom szempontjából frekvenciált időszakokat és útvonalakat. A cikk végén gyakorlati hasznosíthatóságra irányuló példákon keresztül mutatjuk be a módszer teljesítőképességét.

Kulcsszavak: járműdetektálás, járműkövetés, forgalmi statisztika, gépi látás, gépi tanulás

Automatic traffic statistics generation based on object detection and adaptive vehicle trajectory clustering

Abstract: Intelligent Transport Systems (ITS) is a dynamically growing and widely researched field today. It is a very diversified field of science, with traffic dynamics analysis, traffic counts and traffic prediction being an important part of it. In this paper, an adaptive traffic statistics generation method is presented. The method uses a YOLOv7 object detector to detect vehicles on the road and identify their category on video images from the viewpoint of a stationary observer. The detections performed on the video sequences are combined by our presented method using DeepSort tracking algorithm, which results in the trajectories of the moving vehicles. The trajectories are clustered using the OPTICS clustering method, which is parameterised to control the level of detail of the resulting statistics, allowing the generation of either street-level or lane-level traffic data from the same record. In this paper, we tested our method on videos recorded in four different locations, resulting in not only traffic statistics with arbitrary resolution for each direction, but also normalized traffic statistics by time period and by direction. The normalised statistics show the periods and routes that are most frequent for traffic. At the end of the paper, we demonstrate the performance of the method through examples of practical use.

Keywords: vehicle detection, vehicle tracking, traffic flow statistics, computer vision, machine learning

Bevezetés

A közúthálózat tervezése egy összetett folyamat, amelynek részét képezi új utak tervezése, meglévő utak fejlesztése és a közlekedési infrastruktúra optimalizálása. A tervezés során számos szempontt figyelembe kell venni, beleértve a forgalom mennyiségét és jellegét, a terület topográfiáját, a települések közötti kapcsolatokat, a környezeti tényezőket és a pénzügyi korlátokat. A közúthálózatok tervezésének alapvető fontosságú lépése egyebek mellett az adatgyűjtés és a forgalmi elemzés. Adatgyűjtés során a vizsgált területről aktuálisan elérhető információt rögzítjük strukturált formában, amely adatok vonatkozhatnak például a települések elhelyezkedésére, a meglévő úthálózatra, a közlekedési vagy a forgalmi adatokra. Emellett a forgalmi adatok elemzése segít megérteni a meglévő forgalom jellegét és mennyiségét, az utak terheltségét az adott területen, így lehetővé téve a forgalom számára optimális útvonalak és útkapcsolatok meghatározását. A közlekedési adatgyűjtés magában foglalhatja a közúti forgalom mérését, például forgalomfigyelő kamerák, forgalomérzékelők vagy kézi forgalomellenőrzések segítségével. Az adatok között szerepelhet a forgalom intenzitása, sebessége, járműtípusok eloszlása stb.

A közlekedési és utazási szokások megismerésére gyakran használnak kérdőíveket és felméréseket. Ezek az adatok segíthetnek az utazási igények és preferenciák, a célállomások és az útvonalak meghatározásában. Az összegyűjtött közlekedési adatok, például közlekedési statisztikák, közúti baleseti jelentések és városi fejlesztési tervek elemzése segíthetnek a tervezési döntések meghozatalában és a meglévő problémák feltárásában.

A forgalmi elemzés során gyakran használnak speciális szoftvereket és modellező eszközöket a szakemberek, amelyek segítségével előrejelzéseket lehet készíteni a forgalomra vonatkozóan, optimalizálni lehet a forgalmi terhelést vagy értékelni lehet az útvonaltervezési döntéseket, mindezt automatizáltan.

A forgalmi statisztika készítésének eltérő céljai lehetnek. A vizsgálat irányulhat a forgalom intenzitásának mérésére. Ez az adat azt mutatja, hogy az adott útszakaszon vagy kereszteződésben mekkora mennyiségű jármű halad át egy adott időegység alatt. Másik megközelítés alapján vizsgálhatjuk az elhaladó járművek sebességét. Összegyűjthetjük a területen érzékelhető torlódási adatokat is, ami azt mutatja meg, hogy az útszakaszon vagy kereszteződésben milyen mértékű torlódás vagy dugó alakult ki. A torlódási adatok vonatkozhatnak a torlódás időtartamára, hosszára vagy az útszakaszon várható késésre. Távolabbról vizsgálva a problémát, egyes eljárások a forgalmi statisztika időbeli mintázatát próbálják modellezni, hogy a forgalom csúcsidejait, a szezonális változásokat vagy épp a hétköznapok és a hétvégék közötti különbséget kimutassák. Végül, de nem utolsósorban, egy kutatás alapját képezhetik a baleseti adatok is. Azok súlyossága, gyakorisága a közlekedésbiztonság számára jelentenek kiemelkedően fontos információkat.

Általánosságban elmondható, hogy a forgalmi elemzések eredményei segítenek az új útvonalak tervezésében, a meglévő utak fejlesztésében, a forgalom irányításában és a közlekedési rendszer optimalizálásában. Ezáltal hozzájárulnak a hatékonyabb és fenntarthatóbb közlekedési infrastruktúra kialakításához.

A forgalomszámlálás és forgalmi statisztikakészítés gyakran alkalmazott eszközei a forgalomérzékelők, ezek olyan eszközök, amelyek a járművek mozgását érzékelik és rögzítik. Ilyen eszközök például a hurokérzékelők, amelyek az útburkolatba építve a fölöttük elhaladó járművet érzékelik elektromágneses úton. Forgalomszámlálás történhet manuálisan, kézi megfigyeléssel is. Ebben az esetben forgalomellenőrök vagy kutatók kézzel számolják össze a járműveket egy adott helyszínen és időszakban. Általában közlekedési csomópontokban, útkereszteződésekben alkalmazzák ezt a módszert. A forgalomfigyelő kamerák és a hozzájuk kapcsolódó felügyeleti rendszerek képek vagy videók feldolgozásával képesek a járművek mozgását érzékelni, ami alapján meghatározható a járművek száma, sebessége, típusa, és egyéb forgalmi jellemzők. A forgalmi adatgyűjtő rendszerek automatizálásával és hálózatba kötésével komplex forgalomfelügyeleti rendszereket hozhatunk létre. Ez alapulhat a kamerás rendszereken, GPS alapú adatgyűjtésen vagy akár mobilhálózati cellainformációk összesítésén. Az a közös mindegyik esetben, hogy a nyers adatok feldolgozását végző szoftveres algoritmus képes az adatok szűrésére, rendezésére és elemzésére.

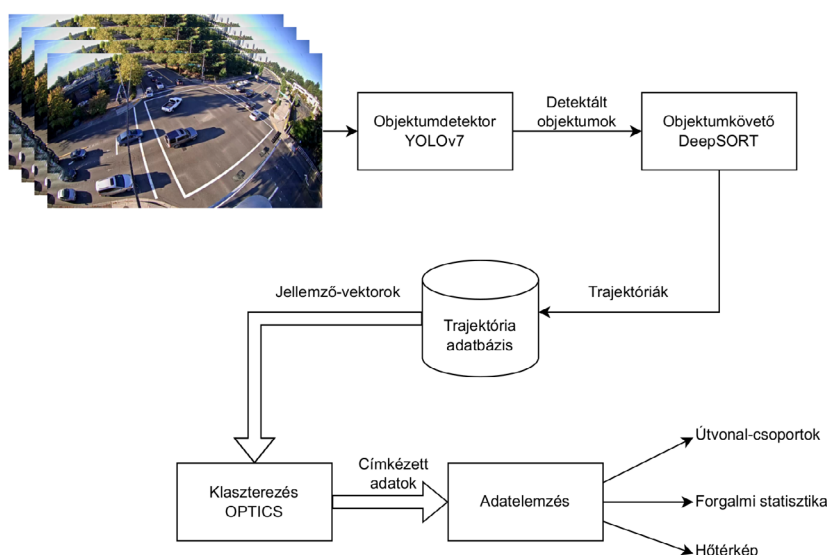
Jelen cikk célja is egy forgalomelemzést és ezen belül a forgalmi adatgyűjtést és statisztikakészítést támogató szoftveres eljárás ismertetése. A kutatás kezdetén azt a kiinduló hipotézist állítottuk fel, hogy gépi látás segítségével és gépi tanuló módszereket alkalmazva létrehozható egy olyan eljárás, amely képes kiváltani a manuális forgalomszámlálást úgy, hogy megfelelő részletességgel hozza létre tetszőleges közúti csomópont forgalmi statisztikáját. Ezen belül megvizsgáltuk, hogy az automatikus eljárások tetszőleges csomóponti geometria esetén helyesen azonosítják-e a tipikus közlekedési útvonalakat. Megvizsgáltuk továbbá, hogy a közlekedők útvonalainak csoportosítása során alkalmazott módszerek paramétereinek állításával, az emberi gondolkodásnak megfelelő, különböző finomságú (utca vagy sávszintű) csoportosítások hozhatók létre. A módszer közlekedési csomópontokról készült

kamerák képén képes felismerni a közlekedő járműveket, azok pozícióját és mozgási irányát. A videófelvételeken összekapcsolja a detektált járműveket, ezzel létrehozva azok menetvonal-jadatait. Az eljárás a vizsgált időszakban egy helyszínen készült felvételeken felismert összes elhaladó jármű pályájának összegyűjtését követően előre beállított finomsággal csoportosítja az adatokat, és statisztikai alapon vizuálisan megjeleníti az eredményeket.

A cikk második részében a kutatáshoz kapcsolódó releváns szakirodalmakat tekintjük át, valamint a vizsgálatokhoz használt adatbázist is bemutatjuk. Ezt követően részletesen ismertetjük módszerünket, és annak gyakorlati alkalmazhatóságát. Az utolsó fejezetben összegezzük az általunk létrehozott eljárás képességeit és az elért eredményeket.

Irodalmi áttekintés

A gépi látás alapú forgalomszámlálás alapját a kamerák képén elvégzett járművek detektálása adja. A járművek mozgásának elemzéséhez és ezáltal a forgalmi statisztika létrehozásához a videó egymást követő képkockáin a detektált objektumokat szükséges összepárosítani, ezt nevezzük objektumkövetésnek. A követett járműveket az általunk készített módszer automatikusan csoportokba sorolja csoportképző (klaszterező, angolul clustering) eljárás segítségével, majd összegzi az egyes csoportokba sorolt járműpályák számát. Az eljárás működését bemutató blokkdiagram az 1. ábrán látható.



1. ábra Adaptív forgalomszámláló rendszer működése

Forrás: saját szerkesztés

Módszerünket a „Bellevue” videó adathalmazon teszteltük és a későbbiekben bemutatott eredmények ennek az adathalmaznak a forgalmi statisztikáit tartalmazzák. A Bellevue Traffic Video Dataset 1280x720 pixel felbontással, másodpercenként 30 képkockasebességgel rögzített videókat tartalmaz. Öt különböző helyszínről, összesen 101 órnyi felvétel áll rendelkezésre. A kutatáshoz 4 helyszín felvételeit használtuk fel, amelyek mindegyikéről 22 vagy 23 órnyi felvétel áll rendelkezésre. Rendszerint egy nap forgalmát rögzítették az adathalmazba 1 órás felosztással. A felvételek 2017 szeptemberben kerültek rögzítésre, későbbi felhasználásra, + gépi tanuló eljárások fejlesztéséhez és közlekedéstudományi kutatásokhoz. A felvételeket közlekedési csomópontok környezetében telepített kamerákról rögzítették (City of Bellevue, 2017). Az négy kiválasztott helyszínt ábrázoló képek láthatók a 2. ábrán. Minden helyszín hasonló kamerapozícióból és látószögéből megfigyelt csomópont. A csomópontok azonosítására, azok neveit és rövidítéseit használjuk jelen cikkünkben, amelyek a 2. ábrán is jelölve vannak: Bellevue Bellevue NE8th, Bellevue 150th Eastgate, Bellevue 150th Newport, Bellevue 150th SE38th.



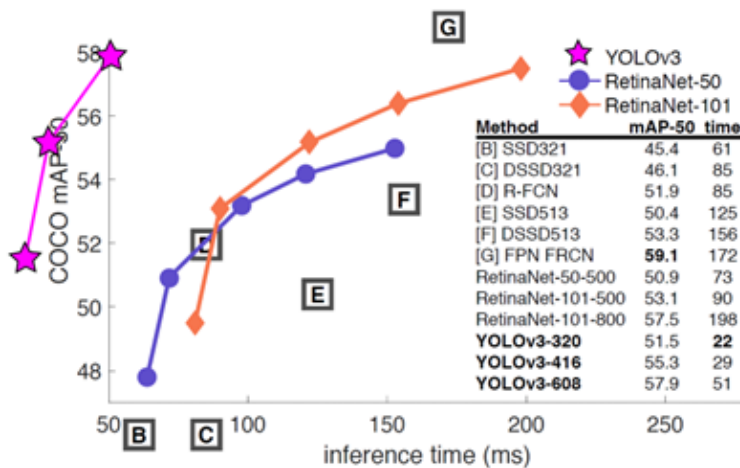
2. ábra Mintaképek a vizsgált négy kereszteződésből

Forrás: (City of Bellevue, 2017)

Objektumdetektálás

Ahogy a bevezetőben is említettük, módszerünk objektumdetektálást alkalmaz a kamerafelvételeken látható járművek detektálására. A detektálás történhet klasszikus képfeldolgozási módszerekkel, például háttérleválasztás (Picardi, 2004), valamilyen vizuális jellemző alapján történő felismeréssel, például: HOG (Navneet et al., 2005), Gabor (Jain et al., 1997), Haar-like (Leinhart et al., 2002), SURF (Bay, 2006), vagy optical flow alapú eljárásokkal (Sepehr et al., 2013). A másik, manapság leggyakrabban alkalmazott eljárás a neurális hálózatokkal történő objektumdetektálás. Az általunk létrehozott módszer ez utóbbit alkalmazza.

Járműdetektálásra alkalmazható objektumdetektáló eljárások az általános célú objektumdetektorok továbbfejlesztésével vagy azok specifikus újratanításával érhető el. Az általános célú neurális hálózatok között a konvolúciós neurális hálózatokat alkalmazzák a leggyakrabban erre a célra (LeCun et al., 2015). Ezek közül néhány gyakran alkalmazott eljárás: Region-based CNN [RCNN] (Girshick et al., 2016), Fast-RCNN (Girshick, 2015), Single Shot Detector [SSD] (Wei et al., 2016), Residual networks [ResNet] (Xie et al., 2017), és a You Only Look Once [YOLO] (Redmon et al., 2018). Munkánkban a YOLO objektumdetektor hetedik verzióját a YOLOv7 (Wang et al., 2023) objektumdetektort alkalmazzuk. A detektálási pontossága minimálisan alacsonyabb, mint az SDD vagy a Faster-RCNN detektoroké, ez látható a 3. ábrán, azonban a YOLO objektumdetektorral valós idejű működés érhető el, ami a többi módszerről nem mondható el. Az ismertetett eljárás gyakorlati alkalmazásához és további kutatásokhoz nélkülözhetetlen, hogy a detektálást valós időben tudjuk futtatni megfelelő sebességgel. Összehasonlításként a YOLO akár 150 FPS-el képes elfogadható pontosságú detektálásra, míg a többi detektor ennél jóval alacsonyabb, 8 FPS mellett tudja ugyanezt a teljesítményt elérni (Farhadi et al., 2018).



3. ábra Objektumdetektáló eljárások pontosságának összehasonlítása

Forrás: Farhadi et al., 2018

Objektumkövetés

A képfeldolgozás alapú forgalomszámláló eljárások alkalmazása során az objektumkövetés az egymást követő képkockákon történt detektálás összekapcsolását jelenti. Egy jármű megjelenésétől az eltűnéséig történő követésének eredményét az adott jármű pályájának, útvonalának vagy menetvonalának nevezzük.

A követés szintén megvalósítható a járművet ábrázoló képrészlet vizuális jellemzővektorainak (HOG, Haar-like, SURF, SIFT) és ezek egymáshoz viszonyított „távolságának” meghatározásával (L1, L2 distance). Több objektumkövető eljárás épít a Kálmán-szűrő (Kalman, 1960) alkalmazására, amely során az objektum mozgásának lineáris előrejelzése alapján párosítja össze a várt és a valós pozíciókat (Li et al., 2010). Az egyik state-of-the-art módszer, amely szintén Kálmán-szűrő alapú objektumkövető eljárás, a Simple Online and Realtime Tracking [SORT] (Bewley et al., 2016). A SORT képről képre alkalmazza a Kálmán-szűrőt, valamint a magyar módszert, hogy az egyes befoglaló téglalapok közötti átfedést nagy pontossággal és valós időben kiszámítsa. A SORT-t eljárás jól működik közlekedési környezetben járművek követésére, mivel az általunk vizsgált álló megfigyelő szemszögéből készült felvételeken a járművek irányváltási lehetőségei korlátozottak. Zajosabb környezetben, gyalogosokat vizsgálva már megfigyelhetők az eljárás hibái, amelyeknek a javítására született meg a DeepSORT, amely képi információ neurális hálózat által történő feldolgozását párosította a SORT algoritmushoz, ezzel 45%-kal javítva az eredeti eljárás követési pontosságán (Wojke et al., 2017).

Menetvonalak csoportosítása

A forgalmi statisztika generálásához a kameraképen összegyűjtött adatokat szükséges strukturálni. A forgalomszámlálást jelen tanulmányban bemutatott módszer útvonalakra bontott időszakos összegzésből állítja elő. Ehhez az útvonalakra bontást szoftveresen elvégezhetjük valamilyen szabályrendszer manuális felállításával vagy automatikusan csoportképző (klaszterező, angolul clustering) eljárás implementálásával. A csoportképző algoritmusok egy nem címkézett adathalmazból, azaz ismert bemeneti értékkel és ismeretlen kimeneti értékkel rendelkező adathalmazból dolgoznak. Céljuk az adathalmazban megtalálható szabályszerűségek, kapcsolatok, esetleg függőségek feltérképezése és az adathalmaz elemeinek csoportokba sorolása ezen feltételek alapján. A kutatás során több csoportképző eljárást kipróbáltunk, többek között particionáló vagy felosztó módszerek közül előre ismert csoportszám esetén alkalmazható:

- a K-közép eljárás (Hartigan et al., 1979),
- a zajjal terhelt sűrűség-alapú térbeli klaszterezés (DBSCAN - Density-based spatial clustering of applications with noise) (Khan et al., 2014),
- a klaszterstruktúra azonosítása rendezési pontok segítségével (OPTICS - Ordering Points To Identify Cluster Structure) (Ankerst et al., 1999) vagy
- a kiegyensúlyozott iteratív redukció és klaszterezés függelmi viszonyok feltérképezésével (BIRCH - Balanced Iterative Reducing and Clustering using Hierarchies) (Zhang et al., 1996) felosztó eljárások.

A K-közép csoportképző algoritmus úgy osztja fel az adatokat, hogy n darab azonos varianciájú csoportba próbálja meg besorolni őket, minimalizálva az inerciát vagy a csoporton belüli adatpontok közötti távolság négyzetösszegét. Ez az eljárás megköveteli a csoportok számának megadását, azonban jól skálázható nagy számú minta esetén. A zajjal terhelt sűrűség-alapú térbeli klaszterezés a csoportokat úgy tekinti, mintha azok nagy sűrűségű területek lennének, amelyeket alacsony sűrűségű területek határolnak. Ennek az általános megközelítésnek az eredménye, hogy ennél az eljárásnál a csoportok alakja tetszőleges formájú lehet, ellenben a K-közép felosztó eljárással, ahol csak konvex alakú csoportok megengedettek. A klaszterstruktúra azonosítása rendezési pontok segítségével algoritmus, a zajjal terhelt sűrűség-alapú térbeli klaszterezési eljárás általánosításának tekinthető. A paraméterezése hasonló. A legfőbb különbség a két eljárás között, hogy a csoportokon belüli pontok távolságát meghatározó paraméter a klaszterstruktúra azonosítása rendezési pontok segítségével algoritmus esetén, nem egy diszkrét érték, hanem egy tartomány. A kiegyensúlyozott iteratív redukció és klaszterezés függelmi viszonyok feltérképezésével felosztó eljárás az adatok alapján egy fát épít, amelyet csoportosító jellemző fának (Clustering Feature Tree-nek, CFT) nevezünk. Az algoritmus egy tömörítő eljárásához hasonlítható, amelyben az adathalmazt tömöríti veszteségesen egy döntési fába. Korábbi vizsgálati eredményeink alapján a végső forgalomszámláló módszerünkben a klaszterstruktúra azonosítása rendezési pontok segítségével (OPTICS) csoportképző eljárást alkalmaztuk.

Forgalomszámlálás

A bevezetőben bemutattuk, hogyan kapcsolódik a forgalomszámlálás az intelligens közlekedési rendszerek (ITS) széles kutatási területéhez. A manuális forgalomszámlálás mellett rengeteg technológiai módszer áll rendelkezésre a forgalmi adatok gyűjtésére és statisztikai elemzésére.

A már említett útburkolatba telepített hurok a járművek fém szerkezetét képes érzékelni. Ezzel nem csak az elhaladó járművek darabszámára, hanem a forgalom áramlásának sebességére is tudunk következtetést adni (Gajda et al., 2012). További forgalomszámláláshoz alkalmazható szenzortechnológiák lehetnek még a Bluetooth vagy WiFi alapú rendszerek, GPS/GSM/GPRS alapú helymeghatározó rendszerek, a RADAR vagy LIDAR érzékelők és a képkalkító szenzor alapú eszközök csoportja, amelybe tartoznak a kamerák, infrakamerák, hőkamerák (Jain et al., 2019).

Fontos szempont a forgalomszámlálás megvalósításánál az alkalmazás helyszíne. Sok eljárás kifejezetten autópályák környezetében alkalmazható (Alqaness et al., 2021, Ren et al., 2020). Ezek esetében a feladat általában egy kijelölt virtuális vonalon áthaladó járművek számának meghatározása adott időszakra vonatkozóan. Ettől eltérő eset a forgalmi csomópontokban történő forgalomszámlálás, amely ennek a műnek is a fő célja (Zhang et al., 2020). Ebben az esetben a cél a kereszteződéseken és csomópontokon áthaladó járművek számának összesítése úgy, hogy azokat a belépési és kilépési pontok alapján kategorizálják. A statisztika csomópontok esetén is adott időszakra vonatkozóan kerül megállapításra. Korábbi kutatások az egyes irányokat manuálisan kategorizálták (Azimjonov et al., 2023), és ez alapján generálták a forgalmi statisztikai adatokat. Eljárásunkban ennek kiváltására alkalmazunk csoportképző eljárást, amely eredménye, hogy az összesített adathalmazból adaptívan határozhatók meg a csomópont belépési és kilépési pontjai a kameraképen látható jelentre vonatkozóan. A felosztó eljárás átparaméterezésével finomabb felbontás érhető el, így akár sávokra bontva vizsgálható a forgalmi statisztika. Míg az adatok között nagyobb távolságot engedve a csoportosító eljárás során egy elnagyoltabb, csak a főbb irányokra vonatkozó statisztika állítható elő ugyan abból az adathalmazból. A két beállítás között több beállítás, ezáltal útvo-nalszám is képezhető.

Módszertan

Ahogy az 1. ábrán is látható a forgalomfigyelő rendszerünk működési folyamatábrája, a módszertan bemutatása során a feldolgozási folyamat főbb lépésein fogunk végighaladni megfelelő logikai sorrendben.

Adathalmaz előkészítése

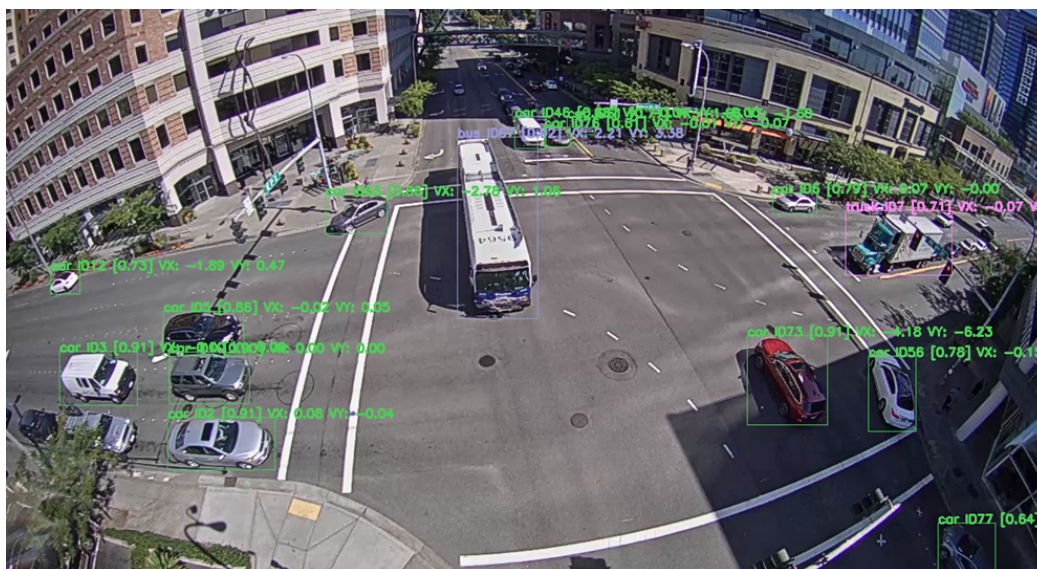
A megfelelő adathalmaz kiválasztása során fontos szempont volt, hogy a forgalomszámlálási problémát szemléletesen lehessen vizsgálni rajta. Ennek érdekében az általunk kiválasztott adathalmaz négy különböző helyszínről tartalmaz videófelvételeket. A felvételek mindegyike 22 vagy 23 órányi rögzített adattal rendelkezik, óránként darabolva. A helyszínek mindegyike az USA-ban található Washington állambeli Bellevue város közlekedési kamerarendszerről lett rögzítve. A városban több közlekedési kamera képe elérhető online közvetítésen keresztül. Mi egy előre rögzített adathalmazból használtuk az említett négy helyszín felvételeit. A videókat strukturáltan, helyszínenként külön kezeltük mind a tárolás, mind pedig a későbbi feldolgozás során. A videók előkészítésének feladata volt az egyes helyszínekhez tartozó videók megfelelő sorrendben történő betöltése, amely biztosítja a videók rögzítési idejében történő feldolgozást. A videók feldolgozását és a rendszer további moduljait is Python nyelven írtuk és a hozzá kapcsolódó modulokat használtuk: OpenCV, Numpy, Matplotlib, Pandas.

Objektumdetektálás

A forgalomszámlálás alapját az objektumdetektálás képezi. Az objektumdetektálás során a detektor bemene-tére egy képet adunk, ami jelen esetben a videófelvétel egy adott időpillanatban készült képkockája. Az objektumdetektor az előzetesen betanított objektumtípusokat felismeri a képen és meghatározza, hogy a képnek mely területén jelenik meg az objektum. A detektált objektumokat tartalmazó képrészlet leírására az objektumdetektor kimeneti értéke az aktuális képen érzékelt minden objektumra vonatkozóan tartalmazza az objektum típusát, az objektum középpontjának koordinátáit vagy az objektum befoglaló téglalapjának bal felső sarokponti koordinátá-it, az objektum szélességét és magasságát pixelszámban kifejezve, valamint egy valószínűségi értéket is rendel az

objektumhoz, amely a felismerés valószínűségét írja le. Az általunk létrehozott eljárásban a YOLOv7 objektumdetektornak az MS COCO (Lin et al., 2014) adathalmazon tanított modelljét használtuk a detektálásra. Ez a modell 80 különböző típusú objektum felismerésére képes. A közlekedők mellett például közúti jelzőtáblákat, tűzcsapokat és állatokat is detektálni tud. Mi a detektálások közül kizárólag az autót, teherautót és busz kategóriájú detektálásokat vettük figyelembe a feldolgozás során, és ezek közül is csak azokat, amelyek felismerési valószínűsége nagyobb vagy egyenlő 60%-al. Az objektumdetektor kiválasztása során fontos szempont volt a valós idejű működés, mivel a kutatás során a járművek útvonalainak modellezését és azok előrejelzését tűztük ki végső célul és mindezt szeretnénk a kamerák elő képén futtatva alkalmazni. A state-of-the-art objektumdetektorok közül a YOLO általános célú objektumdetektort választottuk, mivel pontossága és futási sebessége kielégíti az általunk támasztott követelményeket. A 3. ábrán látható összehasonlító táblázat is alátámasztja a YOLO alkalmasságát a feladatra. Kezdetben a YOLO 4-es verzióját használtuk, amely C programozási nyelven került implementálásra. A pontossága ennek a modellnek kielégítő volt, időközben bemutatásra került a YOLOv7, amely már Python alapokon működő eljárás és sebességben, valamint pontosságban is felülmúlja a YOLOv4-t. Ezek alapján a végső módszerünkben a YOLOv7 objektumdetektort alkalmazzuk.

Az detektálás kimeneti értékeit átstrukturáltuk, és további adatokkal egészítettük ki. Minden detektálási értékhez, azaz minden felismert objektumhoz, hozzárendeltük a videó azonosítóját, valamint a képkocka sorszámát, amelyen látható. A detektálás eredményét szemlélteti az 5. ábra. A képen zöld színű kereteztük be az autókat, lila színű a buszokat és rózsaszínnel a teherautókat. A keret fölé kiírtuk a jármű típusát, egyedi futósorszám alapján azonosítóját, a felismerés valószínűségét, valamint a jármű X és Y irányú sebességét pixel/szekundumban kifejezve.



4. ábra Objektumdetektálás eredménye

Forrás: saját szerkesztés

Objektumkövetés

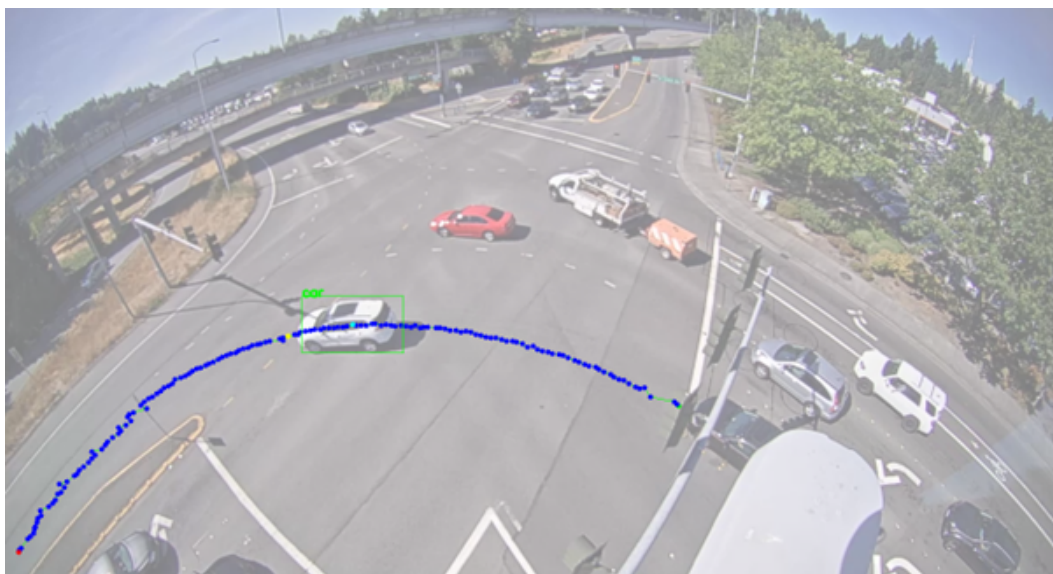
A detektálást az egyes videóban rögzített képkockák mindegyikén lefuttattuk időrendi sorrendben. Minden detektálási lépést közvetlenül egy objektumkövetési lépés követ és ez ciklikusan ismétlődik, amíg a videó utolsó képkockáján is el nem végeztük. A detektor kimenete az objektumkövető modul bemenetére kerül. Az objektumkövető algoritmus első lépésben beállítja a kezdőértékeket. A kezdőértékek beállítása során minden detektált objektumhoz kiszámítja a követéshez szükséges változók értékét, amelyek a képen elfoglalt pozíció és a mozgási sebesség. A DeepSORT ezt követően előrejelzést készít arra vonatkozóan, hogy a detektált objektum várhatóan hol fog elhelyezkedni a képen. Az előrejelzést Kálmán-szűrő segítségével valósítja meg. A következő képkockán elvégzett detektálást követően az algoritmus frissíti a követéseket, a valós detektálások és az előrejelzések közötti távolság alapján összepárosítja az előző és az új képen detektált objektumokat. A párosítás optimális végrehajtásához a magyar módszert használja a DeepSort. Paraméterezhető határérték alapján dönti el, hogy az előrejelzett befoglaló téglalap és az új detektálás befoglaló téglalapja megfelelő mértékben átfedésben vannak-e. Amennyiben igen, úgy az előző detektáláshoz hozzárendeli az új detektálás adatait. A DeepSort az összepárosítás során még

egy jellemzővektort is készít az objektumot ábrázoló képrészletről. Ezt az előző és az új képen is végrehajtja, majd ezeknek a különbségét kiszámítva megerősíti a detektálás pontosságát. Enélkül a funkció nélkül a SORT algoritmus hajlamos az objektumazonosítók felcserélésére.

Az objektumkövető algoritmus kimenetén minden ciklusban az összepárosított objektumok, esetünkben a detektált járművek jelennek meg. Ahhoz, hogy ezt az információt hasznosítani tudjuk, további feldolgozás szükséges. Az adatokat adatstruktúrába szerveztük annak érdekében, hogy a további fejlesztés és adatfeldolgozás minél gördülékenyebb legyen. Létrehoztunk egy TrackedObject (követett objektum) nevű osztályt, amely nem csak a detektálási adatok tárolására, hanem a követés során létrejövő adatsorok kezelésére is alkalmas. Az osztály automatikusan képes kiszámítani az adott objektum X és Y irányú sebességét és gyorsulását pixel/sec, illetve pixel/sec² mértékegységekben. Az adatstruktúra külön tárolja az objektum középponti koordinátáinak X és Y komponenseit, a képkockák azonosítóit, amelyeken az objektum korábban megjelent, az objektum típusát jelző címkéket és azt is, hogy milyen régóta követjük az objektumot. Az osztályba beépítve megtalálható egy normalizáló és egy skálázó függvény is, amelyek a különböző felbontású videók esetén alkalmasak a pixelértékben kifejezett számértékek konvertálására, valamint újra felskálázására. A skálázás szükségessége a videók eltérő felbontására vezethető vissza. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a koordináta értékekből jellemzővektorokat hozunk létre például a csoportképzéshez is. A gépi tanuló eljárások nagy része érzékeny a paraméterek értéke közötti nagyságrendi különbségre, aminek eredményeként előfordulhat, hogy a bemeneti vektor egyes értékeire érzéketlenebb lesz a végső modell. Ahhoz, hogy a jármű pozícióját leíró, a kép síkjában lévő vízszintes és függőleges koordináták közötti különbség gátló hatásától megszabaduljunk, a koordináta értékek átskálázására kerülnek 0-1 közötti intervallumra úgy, hogy a vízszintes koordináták értékeit elosztjuk a kép szélességével, a függőleges koordináta értéket pedig a kép magasságával pixelben kifejezve.

Az objektumkövetés ciklikus végrehajtásának eredményeként létrejönnek a járművek menetvonalai. Ezek a menetvonalak változó hosszúságúak attól függően, hogy milyen sokáig voltak a felvételen láthatók. A menetvonalak vizualizálhatók például úgy, hogy kirajzoljuk azokat a középponti koordinátákat, amelyekben előzetesen tartózkodott a jármű, erre mutat példát a 6. ábra. Az ábrán a videóból kivágott képkocka színeinek élénkségét csökkentettük, hogy a kirajzolt útvonal kellően kontrasztosan jelenjen meg. Jól látható, hogy a detektálások általában nem tökéletesen követik le az objektumot, ennek oka, hogy a kirajzolt menetvonalra zaj ül. Jelen tanulmányban ennek a szűrésétől és figyelembevételétől eltekintünk.

A követésnek még egy fontos paramétere van, amely az adott objektum archiválására vonatkozik. Ez a paraméter és a hozzá kapcsolódó archiválási mechanizmus lehetővé teszi, hogy a hibásan vagy egyáltalán nem detektált objektumokat a detektálási hiány után újra követhessük, és ne veszítsük el. Túl nagy értéket adva ennek a paraméternek előfordulhat, hogy egy, a képről kilépő jármű esetén összekapcsolja azt egy másik, néhány képkocka különbséggel, hasonló pozícióban megjelenő járművel. Ezt az értéket empirikus úton 10-re állítottuk be. Fontos még megemlíteni, hogy az optimális paraméterbeállítások ellenére is előfordulhatnak hibák mind a detektálás, mind pedig a követés során. Az általunk vizsgált 4 helyszínen a hibás esetek száma az összes esethez viszonyítva 4-6% között mozgott. Ezeket az eseteket egyszerű szabály alapú szűréssel leválasztottuk az adathalmazról.



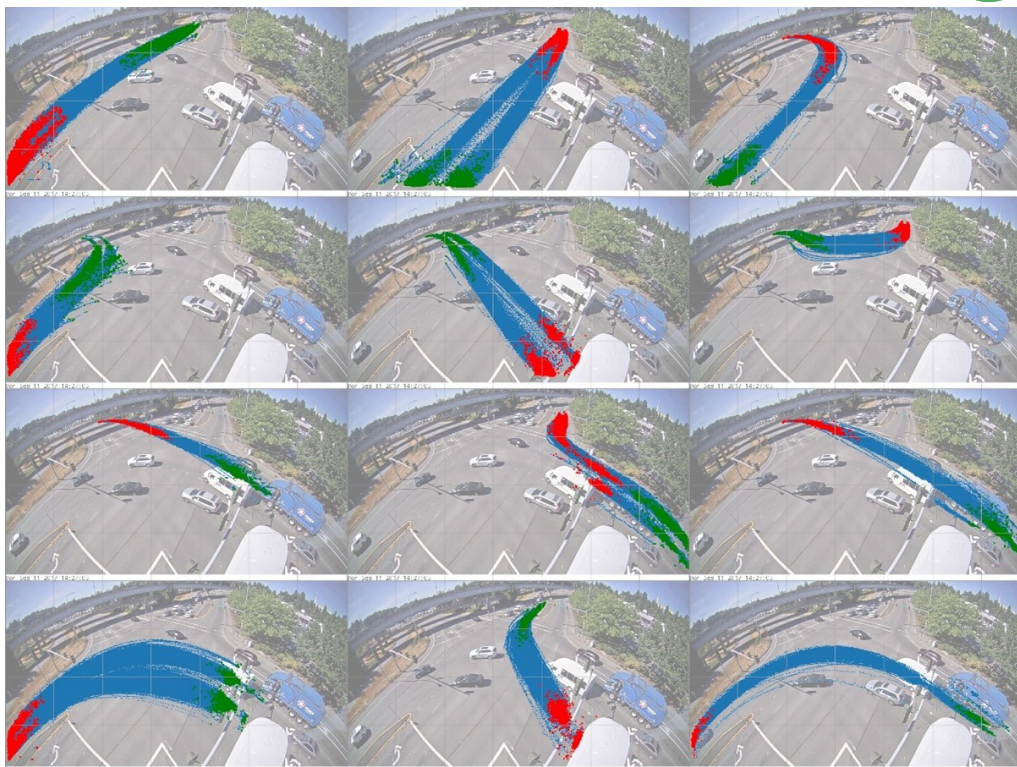
5. ábra Járómenetvonal

Forrás: saját szerkesztés

A menetvonalak egyes elemei tartalmazzák azt az információt, hogy a jármű melyik időpillanatban (videó képkocka azonosító), milyen pozícióban (jármű középpontjának X és Y koordinátái) és mekkora kiterjedésben (járművet befoglaló téglalap W szélessége és H magassága) volt jelen a képen.

Csoportképzés

Forgalmi statisztika generáló eljárásunk során a csoportosító eljárás (klaszterezés, angolul clustering) alkalmazásának célja, hogy adaptívan, a vizsgált helyszínre szabva, minimális emberi beavatkozással az előzőekben létrehozott útvonalakat csoportosítsa. A megfelelő csoportképző eljárás kiválasztásához több módszert is kipróbáltunk. Kutatásunk során elvégeztük a csoportképzést egy minta adathalmazon, amely mind a négy helyszínről két órányi videórészletet tartalmaz. A csoportképzést automatikus paraméterbeállításokkal futtattuk le a DBSCAN, az OPTICS, a BIRCH és a K-közép felosztó eljárásokkal. Az előzetes teszt eredményeként az OPTICS csoportképző eljárást választottuk ki a rendszerünkbe történő integrálásra, mivel ez generálta a legkevesebb hibásan csoportosított menetvonalat. Az OPTICS (Ordering Points To Identify the Clustering Structure) a csoportosítani kívánt adatokban először olyan helyeket keres, ahol az adatok nagy sűrűséggel találhatók meg, majd ebből kiindulva építi ki a csoportokat. Mivel a járművek menetvonalai változó hosszúságúak, ezért a csoportosítás végrehajtása előtt szükséges az adatok rendezése, és minden menetvonalból egy jellemző vektor létrehozása. A forgalmi statisztika szempontjából a hasznos információ, amire kíváncsiak vagyunk, és amit összesíteni szeretnénk, az az, hogy melyik irányból érkezett a jármű és melyik irányba haladt tovább. Ez alapján kijelenthető, hogy a vizsgálat szempontjából releváns információt a jármű menetvonalának belépési és kilépési pontjai tartalmazzák, ami alapján a felosztó eljáráshoz létrehozott jellemzővektorba a járművek pályáinak belépési és kilépési pontjaihoz tartozó X és Y koordinátáinak 0-1 intervallumra normalizált értékét rendeltük. A kezdő- és végpont alapú jellemzővektor létrehozását videónként mindegyik menetvonalra elvégeztük, majd ezeket egy adathalmazba fűztük össze, így létrejött a csoportképző eljárás bemenetére adható adattömb.

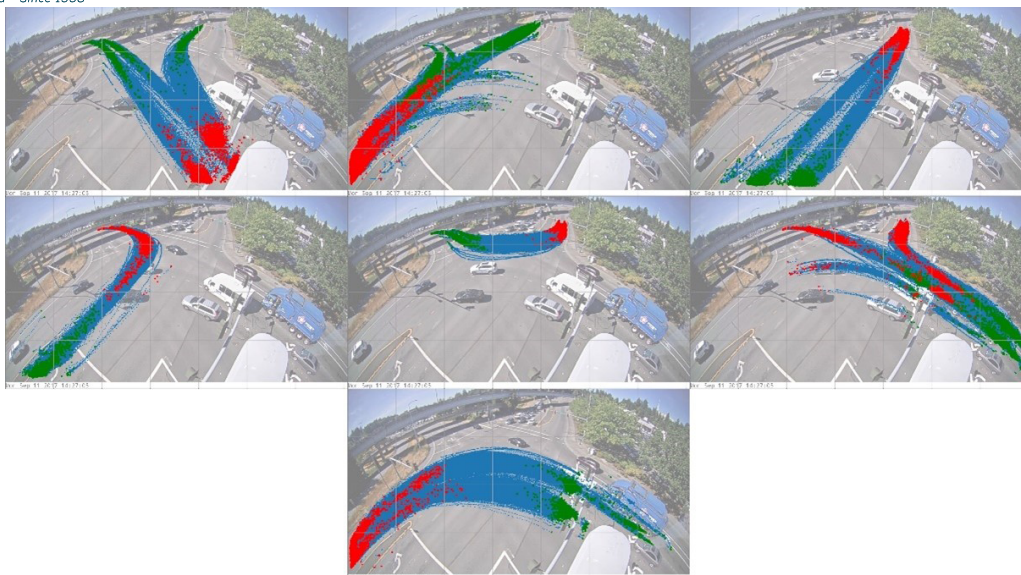


6. ábra Csoportképző eljárás eredménye alapbeállításokkal: 12 eltérő útvonal-csoport

Forrás: saját szerkesztés

Az egyes helyszínekről rendelkezésre álló videókról összegyűjtött menetvonalak mindegyikéről előállított jellemzővektorokat összesítettük, majd az OPTICS csoportképző bemenetére adtuk. A csoportképző eljárás kimenetén egy listát állít elő, aminek mérete megegyezik a bemeneti tömb sorainak számával, jelen esetben az adott helyszínen rögzített menetvonalak számával. A lista elemei a bemeneti adatok sorrendjében tartalmazzák az azokhoz tartozó csoportcímkéket. A 7. ábra a címkék menetvonalakhoz történő hozzárendelésének eredményét, az útvonalcsoportok megjelenítését ábrázolja. Az ábrán 12 darab eltérő útvonalcsoport került megjelenítésre úgy, hogy a képrészletek háttéréül az adott helyszín egyik felvételéből kivágott képkockát használtuk fel. A helyszín képének színeit kifakítottuk, hogy a kirajzolt eredmények jól érzékelhetőek legyenek. A grafikonok mindegyikén egy-egy csoporthoz tartozó menetvonalak detektálási pontjait jelenítettük meg. A menetvonalak kezdőpontjait zöld színnel jelöltük, a végpontjait piros színnel, míg a menetvonalak közbenső pontjait kék színnel. Ennél a helyszínnél első megközelítésben 12 darab eltérő mozgási útvonalcsoportot sikerült szétválasztani a csoportképzés során. Az eljárás hasonló eredményt produkált mind a négy kereszteződés esetén.

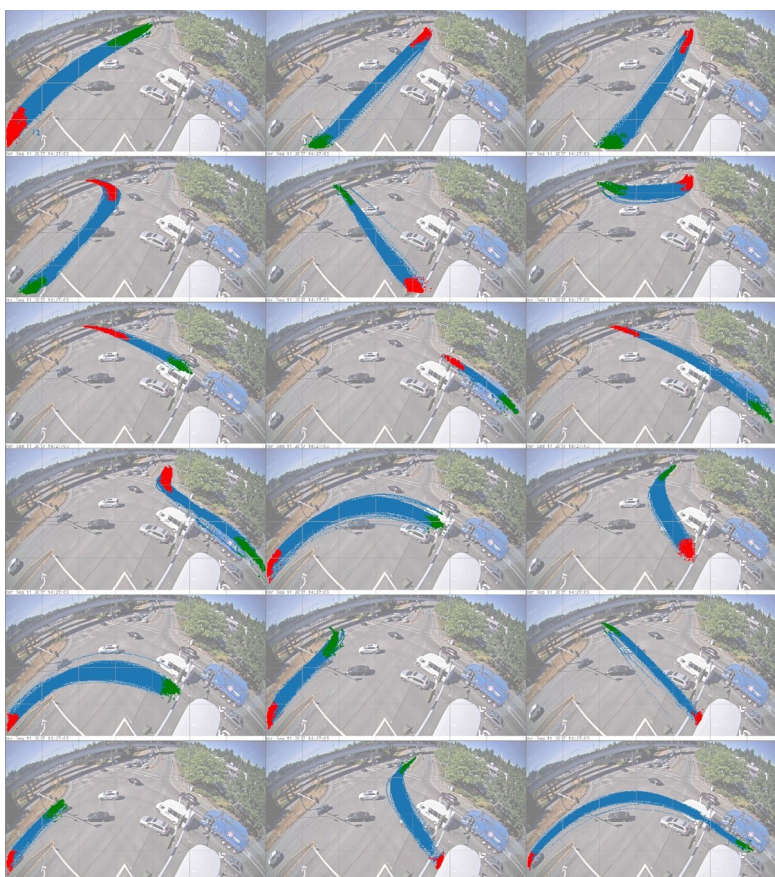
Az OPTICS csoportképző eljárás konfigurálása során több paraméter értékének beállítása lehetséges, amelyek a végeredményt befolyásolhatják, ilyen például az egy csoportba sorolt elemek minimális száma, a csoportosított elemek közötti távolság számításához használt metrika és az egy csoportba sorolt elemek közötti legnagyobb távolság értéke. Ahhoz, hogy az optimális csoportképzést elérjük vizsgálatokat végeztünk a paraméterbeállítások befolyásoló hatására vonatkozóan. A kísérlet során az OPTICS valamennyi paraméterének nagyságrendi változtatásának hatását vizsgáltuk a kimenetre, azaz a létrejött menetvonal csoportok helyességére vonatkozóan. A csoportképzés helyességét az egyes útvonal-csoportok vizuális megjelenítésével elemeztük. A kísérlet eredményeként megállapítottuk, hogy míg a távolságszámító metrika paraméterének befolyásoló hatása a mi adataink esetén elhanyagolható, addig az egy csoportba sorolt elemek minimális száma és a csoporton belüli elemek között megengedett legnagyobb távolság nagyban meghatározza a kimenet értékét. A 8. és a 9. ábrán két példával szemléltetjük a vizsgálat eredményeit. Az ábrán az előző esettől két eltérő paraméter beállítással futtatott csoportképzés eredményeit jelenítettük meg. A 8. ábra azt az esetet mutatja, amikor az egy csoportba sorolás távolságlimitjét megemeltük. Látható, hogy kevesebb csoport keletkezett, viszont az egyes csoportokba az emberi logika alapján elkülöníthető útvonalak is tartoznak, ezért ez nem bizonyult megfelelő választásnak.



7. ábra Csoportképzés eredménye: nagyobb távolságparaméter megengedésével csak hét eltérő útvonal-csoport keletkezett

Forrás: saját szerkesztés

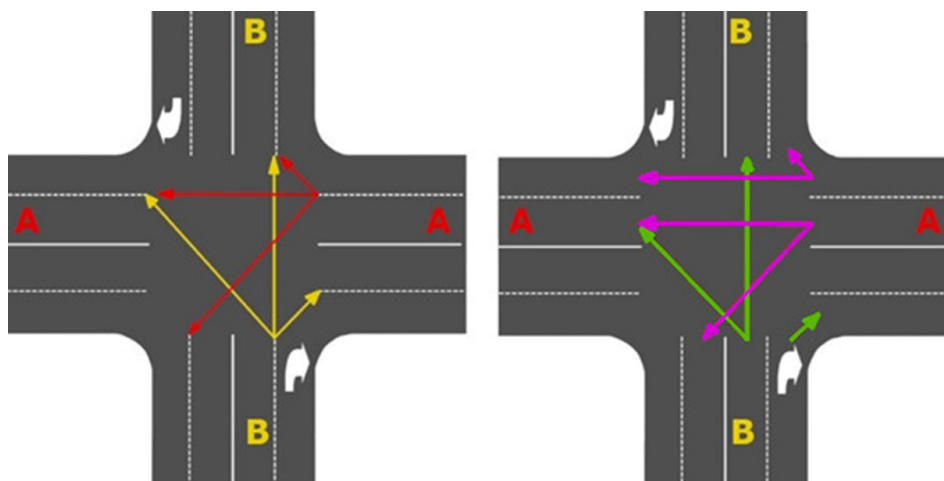
A 9. ábrán egy szigorúbb, kisebb távolságot megengedő és a minimális elemszámhoz kisebb értéket rendelő beállítást használtunk. Jól látható, hogy az első két esethez képest több csoport keletkezett, számszerűen 18 és több, az alapbeállításokkal keletkezett útvonal-csoport tagjai itt szétváltak. Például az első sor második és harmadik képe két olyan csoportot mutat, melyek a 7. ábrán még egy csoportba voltak sorolva (lásd 7. ábra 1. sor, 2. kép), de most a finomabb felbontás sáv-szinten is elkülönítette a járműveket. A paraméterek beállítását minden esetben manuálisan végeztük el megvizsgálva az adott jelenet bonyolultságát és a csoportképzés eredményének részletességét. A célunk a csoportképzés paramétereinek vizsgálatával a forgalmi statisztika generáló eljárás adaptivitásának biztosítása volt úgy, hogy a statisztika részletessége a felhasználói igények alapján változtatható legyen.



8. ábra Csoportképzés eredménye: finomabb beállításokkal 18 eltérő útvonal-csoport keletkezik, melyek már sáv-szintű felbontást tartalmaznak

Forrás: saját szerkesztés

Elképzelhető olyan eset, amikor egy csomópont forgalmi adataira csak korlátozott részletességgel van szükség. Ehhez példának nézzük a 10. ábrán látható csomópontot. Az ábrán egy kétsávos út (A) keresztez egy másik, szintén kétsávos utat (B). Az A útvonalon jobbról érkező járművek a példában három irányban haladhatnak tovább: egyenesen tovább az A útvonalon, balra nagy ívbe kanyarodva a B útvonalon, illetve jobbra kis ívben kanyarodva szintén a B útvonal ellenkező irányába. A járművek a másik három irányból érkeve hasonlóan három lehetőség közül választhatnak a továbbhaladásra. Ez összesen 12 lehetséges útvonalat feltételez. Ha azonban részleteiben vizsgáljuk meg a csomópont forgalmát, akkor láthatjuk, hogy a B útvonalról érkeve jobbra csak a kanyarodósávból haladhatnak tovább az A úton, amely szükségessé teszi azt, hogy megkülönböztessük a jármű érkezési sávját is, ne csak az érkezési irányát. Ha ezt tovább bővítjük, akkor értelemszerűen a továbbhaladás is sávokra bontható, amelyből lényegesen több lehetséges útvonal különböztethető meg.



9. ábra Két alkalmazási példa a forgalmi statisztika változtatható felbontására. bal oldal: út szintű, jobb oldal: sáv-szintű felbontás

Forrás: saját szerkesztés

Vizsgálataink során megállapítottuk, hogy a csoportképzés paramétereinek optimális értékei az adathalmaz méretétől és a helyszín geometriai tulajdonságaitól függenek. Minél nagyobb az adathalmaz annál nagyobb értéket kell adni az egy csoporton elfogadott minimális elemszám értékének, ezt addig kell növelni amíg a be nem sorolt menetvonalak száma 4-6% alá nem kerül. Ezután a csoporton belüli elemek között megengedett legnagyobb távolság paraméterével lehet a csoportosítás finomságát csökkenteni vagy növelni.

Forgalmi statisztika

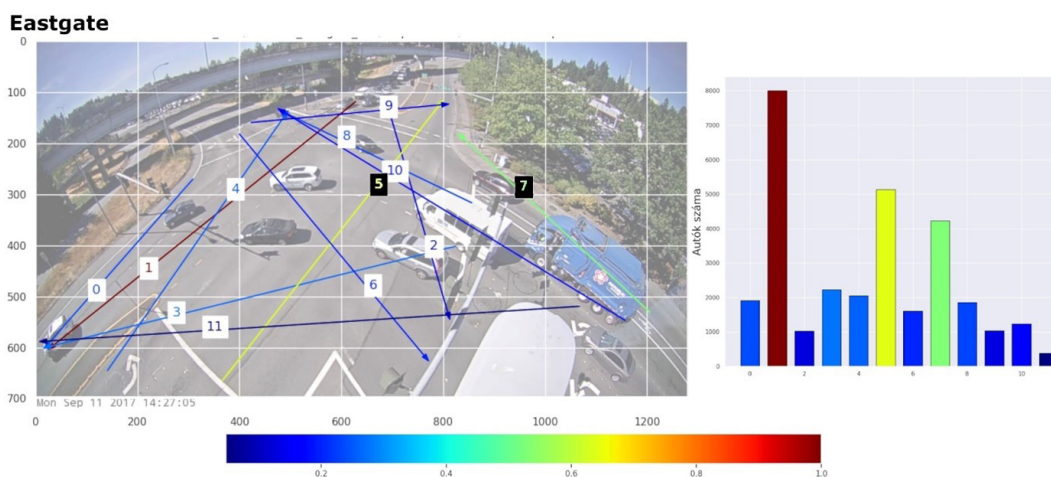
Az előző fejezetben a csoportképzéssel felosztottuk a videófelvételeken elhaladó járműveket és azok menetvonalait. A továbbiakban a csoportképzés eredményeiből generált forgalmi statisztikákat ismertetjük. A statisztika előállításához, valamint a további feldolgozásokhoz a csoportképzés legfinomabb felbontását alkalmaztuk. A forgalomszámlálás célja az egyes csoportokba tartozó menetvonalak számának összesítése és strukturált megjelenítése. Ahhoz, hogy a létrejött adatok a későbbiekben széles körben hasznosíthatóak legyenek, a forgalmi statisztikát táblázatos formába rendeztük. Az eljárás a csoportképzést követően óránként, a videófelvételek szakaszoltságának megfelelően összegzi a csoportok elemszámait. Az első helyszínről készült eredmények láthatók a 1. táblázatban. A táblázat sorai az időszakokat tartalmazzák, amelyek egy-egy órányi időtartamot ölelnek fel, ezek jelölése található az első oszlopban. A további oszlopok rendre a csoportképzés során generált különböző irányokat jelölik. A táblázat elemei azoknak a járműveknek a darabszámát tartalmazzák, amelyek az adott órában és adott irányba elhaladtak.

1. táblázat Eastgate csomópont forgalmi adatai

Időszak	Útvonal-csoport 0	Útvonal-csoport 1	Útvonal-csoport 2	Útvonal-csoport 3	Útvonal-csoport 4	Útvonal-csoport 5	Útvonal-csoport 6	Útvonal-csoport 7	Útvonal-csoport 8	Útvonal-csoport 9	Útvonal-csoport 10	Útvonal-csoport 11
0-1	5	27	4	14	9	21	6	2	5	0	0	0
1-2	4	9	1	5	4	8	5	5	6	3	0	0
2-3	4	7	2	5	1	2	1	3	4	0	0	0
3-4	0	18	6	2	2	10	5	0	6	4	0	0
4-5	11	32	2	9	12	28	5	8	7	2	0	0
5-6	11	62	6	18	59	63	10	15	66	11	2	0
6-7	44	186	32	47	140	186	44	207	171	31	43	5
7-8	72	339	74	93	313	503	61	311	225	42	150	7
8-9	111	580	111	108	364	674	74	300	154	53	162	16
9-10	88	457	119	113	266	527	93	328	144	85	164	20
10-11	94	451	132	139	121	359	89	315	105	81	97	22
11-12	127	482	82	191	90	374	136	359	130	71	102	20
12-13	151	596	78	219	92	329	206	400	135	81	117	37
13-14	117	498	71	167	111	257	137	291	101	82	81	33
14-15	196	710	60	189	107	295	120	348	100	88	91	67
15-16	263	1072	71	282	95	384	144	347	114	121	91	74
16-17	293	1011	48	230	73	347	154	348	90	108	84	39
17-18	45	206	17	50	18	112	42	85	18	26	20	4
18-19	30	231	25	35	21	190	59	159	55	40	14	1
19-20	15	214	22	57	17	126	32	129	55	21	8	8
20-21	33	176	16	57	26	78	40	83	27	19	6	11
21-22	31	110	8	27	11	44	16	22	16	12	0	4
22-23	13	76	7	21	9	23	6	16	13	4	0	1

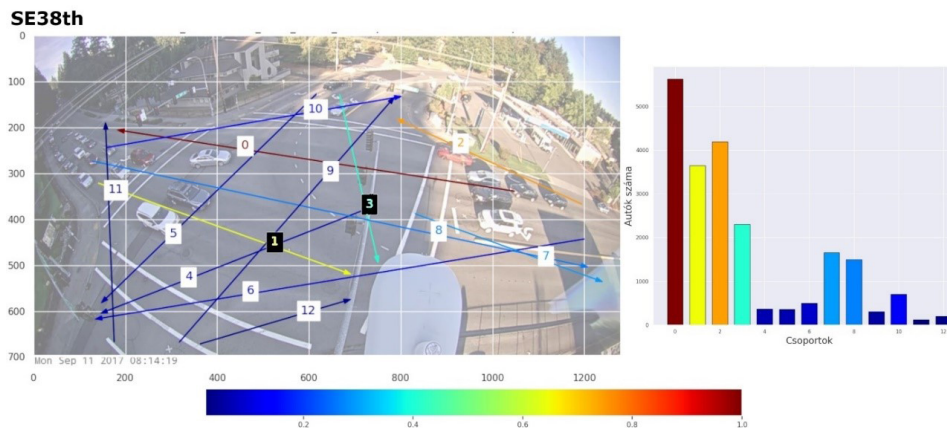
Forrás: Saját szerkesztés

A táblázat a nyers adatokat tartalmazza. A pontosabb megértéshez szükség volt olyan szemléltető ábra létrehozása, amelyen az egyes irányok egyértelműen beazonosíthatók. A táblázat értelmezéséhez kiegészítettük az eljárásunkat egy automatikus útvonal vizualizálóval, amely az adott helyszín felvételeiből kivág egy képkockát és az útvonalakat a kezdeti és végpontjait összekötő egyenessel jelöli, valamint az irányultságát az egyenes végén nyíllal szemlélteti. Ezeknek az egyeneseknek a kezdő és végpontjait az egyes csoportokba tartozó menetvonalakból számítottuk ki úgy, hogy egy adott csoportba tartozó összes menetvonal kezdő és végpontjának X és Y koordináta szerinti átlagát vettük és elneveztük őket útvonal-csoport szerinti átlagos belépési és kilépési pontoknak. A megkülönböztethetőség érdekében a vonalak közepén jelöltük az útírány azonosítóját is, valamint különböző színekkel jelöltük a vonalakat és számokat. A jelöléshez használt szín kiválasztásához egy hisztogramot hoztunk létre az útírányok összesített forgalmi adataival és az egyes útírányokhoz tartozó elhaladások darabszámai alapján normalizáltuk. Ezt követően egy színskálát rendeltünk a hisztogramhoz, amelyen a színek értéke a menetvonal normalizált forgalmi adatai alapján kerül kiválasztásra, így az ábráról első pillantásra eldönthető, hogy melyik útvonal mekkora arányban volt terhelt napi-összesítésben. A vizsgált négy helyszínhez az útvonalak értelmezését és a hisztogramjait a 11-14. ábrák tartalmazzák.



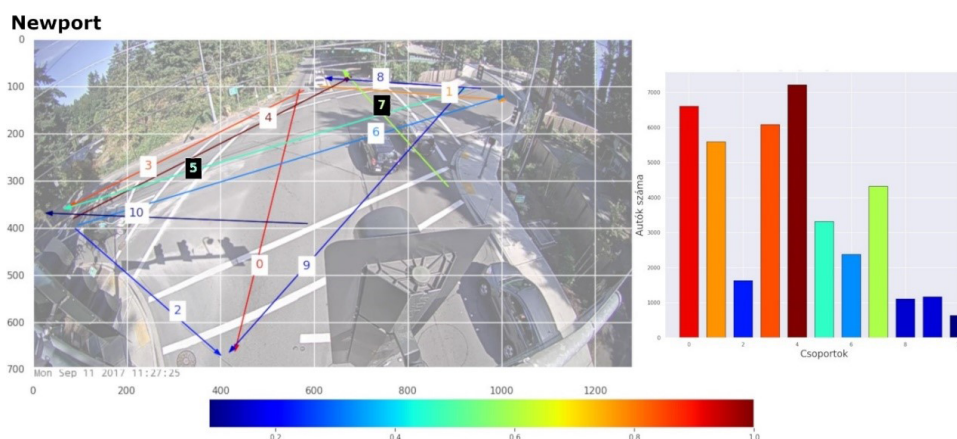
10. ábra Eastgate csomópont útvonalai és a forgalmi intenzitás hisztogramja

Forrás: saját szerkesztés



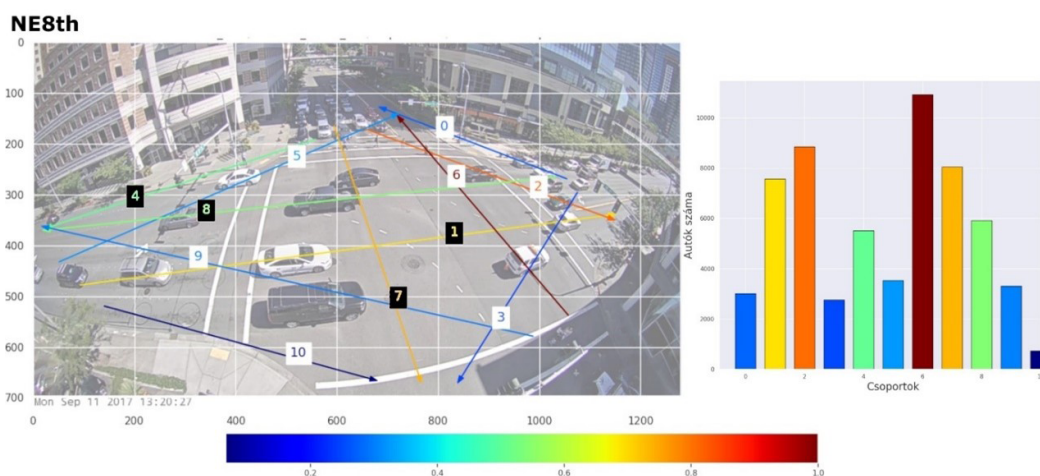
11. ábra SE38th csomópont útvonalai és a forgalmi intenzitás hisztogramja

Forrás: saját szerkesztés



12. ábra Newport csomópont útvonalai és a forgalmi intenzitás hisztogramja

Forrás: saját szerkesztés



13. ábra NE8th csomópont útvonalai és a forgalmi intenzitás hisztogramja

Forrás: saját szerkesztés

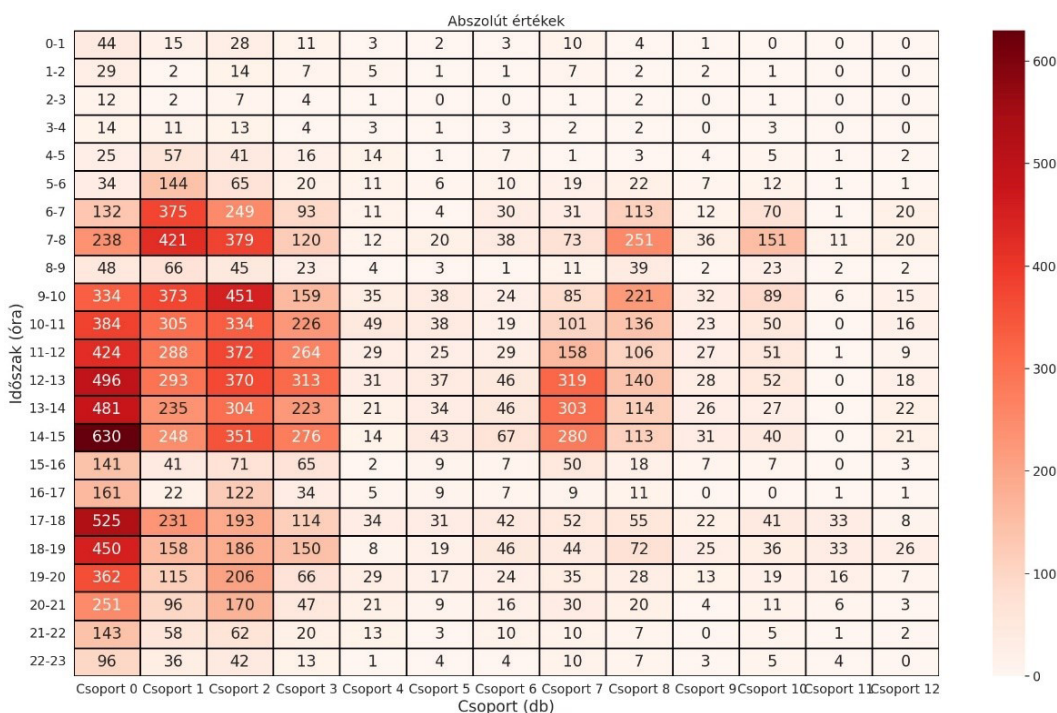
A csomópontok forgalmának további elemzéséhez automatikus hőkép generáló funkcióval egészítettük ki forgalomszámláló módszerünket. Ennek célja a forgalom dinamikájának gyors áttekintése volt. Első megközelítésben a járműelhaladás darabszáma alapján generáltuk a hőképet. Ezen a színezett táblázaton azt figyelhetjük meg, hogy globálisan melyik útvonal és melyik időszakban volt a legnagyobb mértékben terhelt a forgalom által. A 15. ábra az Eastgate csomópont globális forgalmi adatait tartalmazza. Látható, hogy a „Csoport 1” címkeű útvonal a legterheltebb, főként 14-17 óra között. (Az útvonalcsoportok elhelyezkedését a kereszteződést bemutató 11.

ábrán láthatjuk.) A 4-5. és a 7. útvonal-csoportot a reggeli és délelőtti órákban érinti sűrűbb forgalom, míg a többi irány esetén is hasonló dinamika figyelhető meg alacsonyabb maximumértékek mellett.



14. ábra Globális forgalmi „hőterkép” (Eastgate)

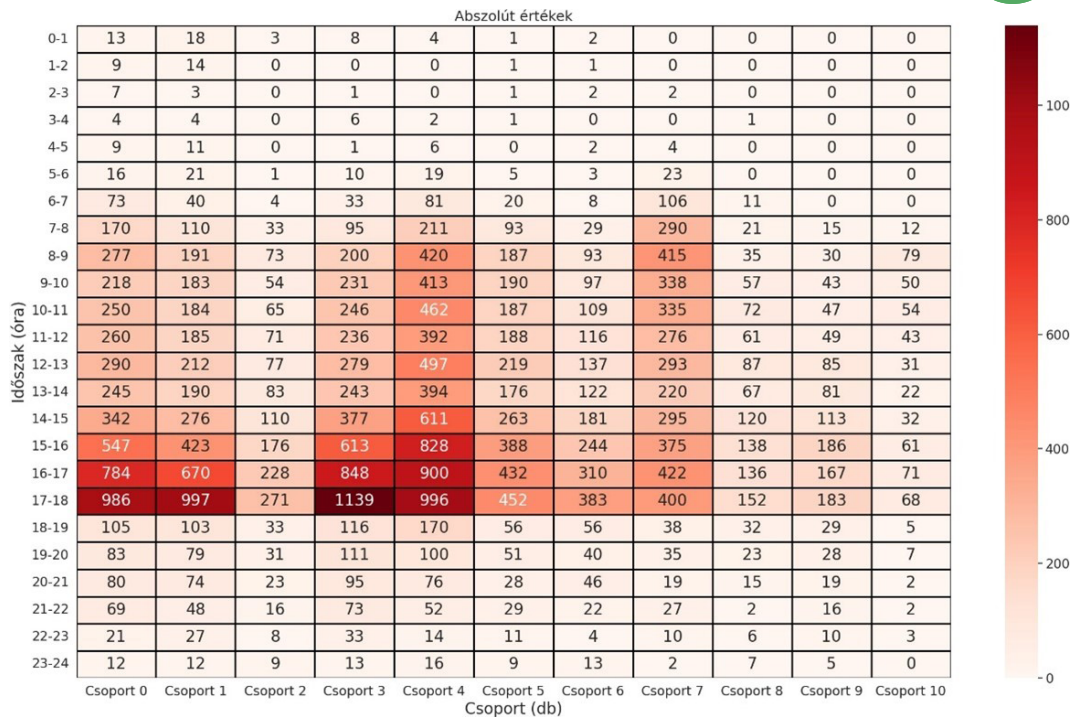
Forrás: saját szerkesztés



15. ábra Globális forgalmi „hőterkép” (SE38th)

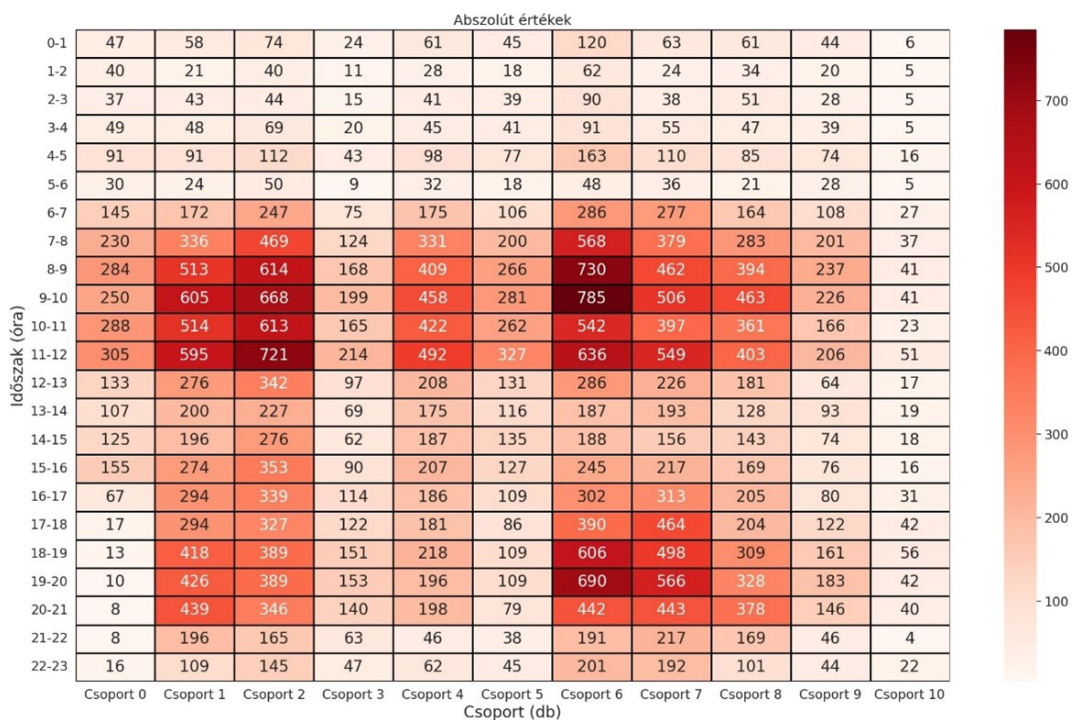
Forrás: saját szerkesztés

A második hőterképen, a 16. ábrán az SE38th csomópont eredményei láthatók. Az előző esettől teljesen eltérő viselkedést mutat, a 0-3 útvonal-csoportok fogalma a délelőtti órákban megnő és egészen estig kitar, majd fokozatosan lecseng, valamint 15-17 óra között egy kisebb visszaesés is tapasztalható.



16. ábra Globális forgalmi „hő térkép” (Newport)

Forrás: saját szerkesztés



17. ábra Globális forgalmi „hő térkép” (NE8th)

Forrás: saját szerkesztés

A Newport-i csomópont esetén, a 17. ábrán az SE38th-hoz hasonló fokozatos felfutás tapasztalható, ami 18 óra után hirtelen visszaeséssel zárul. Ennél az csomópontnál kevésbé dominál a reggel-délután pár, amikor is a reggeli órákban az egyik útvonalcsoport terheltsége jellemzően nagyobb, majd ennek az útírnének az ellenkező irányú párja a délutáni órákban terheltebb.

Utolsó példaként az NE8th csomópontot emeljük ki a 18. ábrán, ahol a forgalmi rend az előzőektől eltérően a legtöbb irány esetén délelőtti és délutáni csúccsal is rendelkezik, valamint jóval egyenletesebb a forgalom eloszlása az irányok között.

A forgalmi hőtérképek a helyszínt ismerő közlekedésmérnököknek fontos információkkal szolgálhatnak a forgalom dinamikájának elemzéséhez. Ebben a cikkben ilyen elemzést mi nem végzünk, mert a cél a módszer használhatóságának bemutatása.

Normalizált forgalmi statisztika

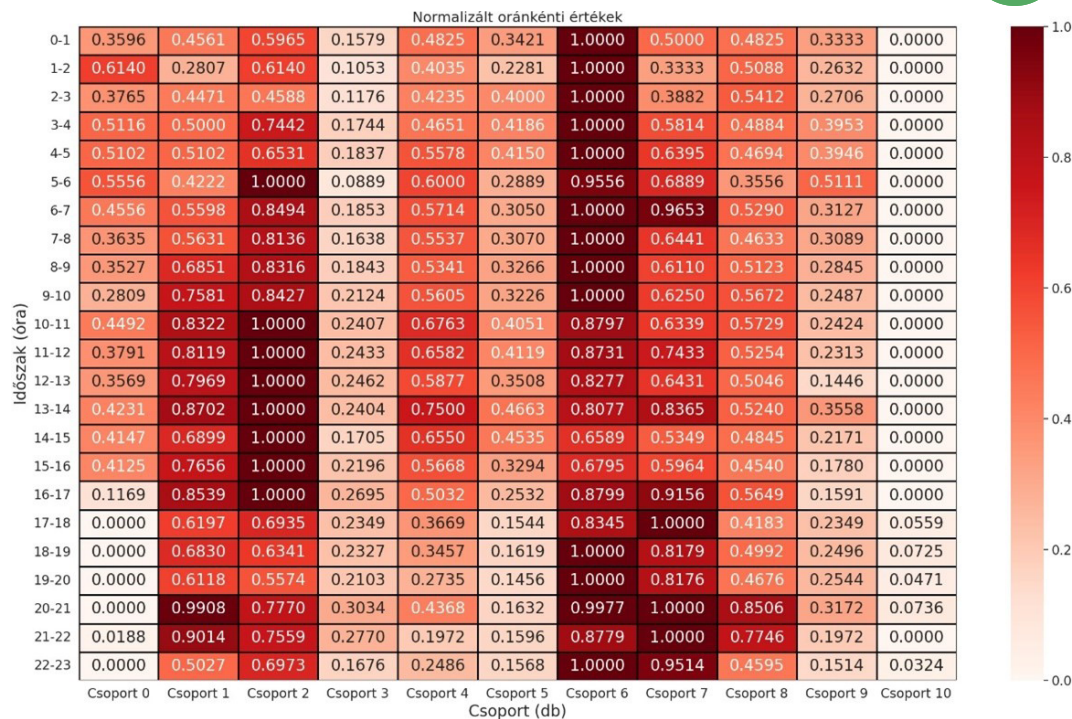
A forgalmi adatokból képzett hőtérkép rendkívül szemléletesen mutatta be a globális forgalmi csúcsok helyét és az egyéb forgalmdinamikai sajátosságokat. A mélyebb vizsgálathoz a hőtérkép speciális, normalizált változatait állítottuk elő. Először megvizsgáltuk az irányonként normalizált esetet. Ekkor minden oszlopot, azaz útirányt külön-külön normalizáltunk azért, hogy információt kapjunk arra vonatkozóan, hogy melyik időszak a legforgalmasabb az adott irányban. A 19. ábrán látható az NE8th csomópont irányonként normalizált hőtérképe. Szinte az összes útirány esetén a 8-12 óra közötti időszak erősen terheltnek bizonyult, valamint néhány esetben az esti órákban zajlott még kiemelkedően nagy forgalom.



18. ábra Irányonként normalizált forgalmi „hőtérkép” (NE8th)

Forrás: saját szerkesztés

Második esetben azt vizsgáltuk, hogy az egyes órákban mely útirányok bizonyulnak a legforgalmasabbnak. Ehhez soronként normalizáltuk a forgalmi mátrixot, aminek eredménye a 20. ábrán látható. Szintén az NE8th csomópont esetén este 18 órától kezdődően, a hajnali órákban, egészen 9 óráig a 6. útirányt találtuk a legforgalmasabbnak, míg napközben a 2. irány veszi fel a legnagyobb terhelést.



19. ábra Időszakok alapján normalizált forgalmi „hő térkép” (NE8th)

Forrás: saját szerkesztés

Eredmények összegzése

Kutatásunkban az intelligens közlekedési rendszerek (ITS) területén belül egy forgalom számláló és forgalmi statisztika generáló módszert dolgoztunk ki. Létrehoztunk egy komplex gépi látás alapú járműkövető eljárást, amely automatizáltan képes a kamera képén érzékelt közlekedőket azok mozgási pályája alapján csoportosítani. Bebizonyítottuk, hogy az OPTICS csoportképző eljárás alkalmas különböző részletességű forgalmi statisztika előállítására az általunk vizsgált adathalmazon, amellyel akár sáv-szintű forgalmi statisztika is képezhető. Módszerünkkel továbbá a forgalom szempontjából általános belépési és kilépési pontokat azonosítottunk a kamera képén látható jeleneten, amelyek az egyes csoportokba tartozó közlekedők menetvonalaiából származtatható. Kutatásunk kitért a létrehozott forgalmi statisztikák mélyebb elemzésére. A forgalmi adatokból létrehozott hő térkép alapján az egyes helyszínek vonatkozásában meghatároztuk a globális forgalmi csúcsokat, majd útirányra és időszakra bontva vontunk le következtetéseket a vizsgált adathalmazról. Kijelenthető, hogy sikeresen implementáltuk az objektumdetektáló és objektumkövető módszereket, amelyek rendkívül jó alapot adtak jelen tanulmányban ismertetett módszer létrehozásához. A korábbi forgalomszámláló eljárásoktól eltérő megközelítést alkalmazva, sikerült tetszőleges geometriájú közlekedési csomópontok forgalomszámlálására alkalmas, kamera alapú módszert létrehoznunk. Ezek alkalmazásával a már felszerelt kamerák képének alapján az igényeknek megfelelő részletességű forgalomszámlálási adatok generálhatók, akár archív adatokból, akár minimális késéssel, élőben. A létrejött módszer akár utólag is változtatható felbontása előnyt jelent a hurokérzékelőkkel szemben. Az automatizált működés a manuális forgalomszámlálás velejáráját, az emberi tényezőt kizárja a forgalmi statisztika készítés folyamatából. Valamint vizuális elemzés alapú módszerünk alkalmazása a GPS-alapú alternatívák alkalmazásával szemben pontosabb, akár sáv-szintű statisztika készítését teszi lehetővé, amely a későbbiekben könnyedén kiegészíthető a járművek típusával vagy vizuális jellemzőikkel.

Kutatásunkat a jövőben szeretnénk bővíteni a YOLO objektumdetektor által biztosított objektumkategóriákkal, amivel egy újabb forgalmi statisztikai szempontot tudunk a rendszer működésébe beépíteni és képesek leszünk részletesebb forgalmi adatokat biztosítani. Jövőbeli kutatási irány lehet, jelen munkára alapozva, a gyalogos forgalom vizsgálata is, amely nem képezte eddigi kutatásaink tárgyát.

Felhasznált irodalom

- City of Bellevue (2017): Traffic Video Dataset. <https://github.com/City-of-Bellevue/TrafficVideoDataset> (2023.április.25.)
- Picardi, Massimo (2004): Background subtraction techniques: a review, 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583) vol. 4., 3099-3104, <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1400815>
- Navneet, Dalal - Triggs, Bill (2005): Histograms of oriented gradients for human detection, 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05), vol. 1., 886-893. <https://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>
- Jain, Anil K. - Ratha, Nalini K. - Lakshmanan, Sridhar (1997): Object detection using gabor filters, Pattern Recognition, 30:2, 295-309, [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00068-4](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00068-4)
- Lienhart, Reiner - Maydt, J.: An extended set of Haar-like features for rapid object detection, Proceedings. International Conference on Image Processing, 2002. szeptember 22-25., Rochester, <https://doi.org/10.1109/ICIP.2002.1038171>
- Bay, Herbert - Tuytelaars, Tinne - Van Gool, Luc: SURF: Speeded up robust features, 9th European Conference on Computer Vision (ECCV 2006), 2006. május 5-13., Graz, 404-417. o., https://doi.org/10.1007/11744023_32
- Sepehr, Aslani - Mahdavi-Nasab, Homayoun (2013): Optical flow based moving object detection and tracking for traffic surveillance, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 7:9, 1252-1256.
- LeCun, Yann - Bengio, Yoshua - Hinton, Geoffrey (2015): Deep learning, Nature 521, 436-444., <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Girshik, Ross et al. (2016): Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 38:1, 142-158., <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2437384>
- Girshick, Ross (2015): Fast R-CNN, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 1440-1448, <https://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2015.169>
- Liu, Wei, et al.: Ssd: Single shot multibox detector, Computer Vision-ECCV 2016: 14th European Conference, 2016. október 11-14., Amsterdam, 1:14, 21-37. o. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2
- Xie, Saining, et al.: Aggregated residual transformations for deep neural networks, IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017. július 21-26., Honolulu, 1492-1500. o. <https://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2017.634>
- Redmon, Joseph - Farhadi, Ali (2018): Yolov3: An incremental improvement, arXiv (elektronikus kiadvány), <https://arxiv.org/abs/1804.02767> (2023.06.20.)
- Wang, Chien-Yao - Bochkovskiy, Alexey - Liao, Hong-Yuan Mark: YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2023. június 18-22. Vancouver, 7464-7475. o. https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2023/html/Wang_YOLOv7_Trainable_Bag-of-Freebies_Sets_New_State-of-the-Art_for_Real-Time_Object_Detectors_CVPR_2023_paper.html (2023. június 20.)
- Kalman Rudolph Emil (1960): A new approach to linear filtering and prediction problems, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 82:1, 35-45. <https://dx.doi.org/10.1115/1.3662552>
- Li, Xin - Wang, Kejun - Wang, Wei - Li, Yang: A multiple object tracking method using Kalman filter, The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation, 2010. június 20-23., Harbin, 1862-1866 o. <https://dx.doi.org/10.1109/CINFA.2010.5512258>
- Bewley, Alex et al.: Simple online and realtime tracking, 2016 IEEE international conference on image processing (ICIP), 2016. szeptember 25-28., Phoenix, 3464-3468 o. <https://dx.doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533003>
- Wojke, Nicolai - Bewley, Alex - Paulus, Dietrich: Simple online and realtime tracking with a deep association metric, 2017 IEEE international conference on image processing (ICIP), 2017. szeptember, 17-20., Beijing, <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962>
- Hartigan, J. A. - Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm, Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics), 28:1, 100-108. <https://doi.org/10.2307/2346830>
- Khan, Kamran et al.: DBSCAN: Past, present and future, The Fifth International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT 2014), 2014. február 17-19., Bangalore, <https://doi.org/10.1109/ICADIWT.2014.6814687>
- Ankerst, Mihael et al. (1999): OPTICS: Ordering points to identify the clustering structure, ACM Sigmod record, 28:2, 49-60. <https://doi.org/10.1145/304181.304187>
- Zhang, Tian - Ramakrishnan, Raghu - Livny, Miron (1996): BIRCH: an efficient data clustering method for very large databases, ACM sigmod record, 25:2, 103-114. <https://doi.org/10.1145/235968.233324>
- Gajda, Janusz et al. (2012): A vehicle classification based on inductive loop detectors, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 21:1, 57-66., <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.08.010>
- Jain, Neeraj Kumar - Saini, R. K. - Mittal, Preeti (2019). A review on traffic monitoring system techniques, Soft Computing: Theories and Applications, 569-577., <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.08.010>
- Azimjonov, Jahongir - Özmen, Aahmet - Varan, Metin (2023): A vision-based real-time traffic flow monitoring system for road intersections, Multimedia tools and applications, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14418-w>
- Ren, Peiming et al. (2020): A novel squeeze YOLO-based real-time people counting approach, International Journal of Bio-Inspired Computation, 16:2, 94-101., <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2020.109674>
- Zhang, Chuan et al. (2020): Verifiable and privacy-preserving traffic flow statistics for advanced traffic management systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69:9, 10336-10347. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3005363>
- Lin, Tsung-Yi (2014): Microsoft COCO: Common objects in context, 13th European Conference, 2014. szeptember 6-12., Zurich, 740-755 o. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10602-1_48
- Al-qaness, Mohamed et al. (2021): An improved YOLO-based road traffic monitoring system, Computing, 103, 211-230., <https://doi.org/10.1007/s00607-020-00869-8>

Műhelytanulmány

Korszakváltás a közlekedésben? A pandémiás helyzet hatásai

Beküldve: 2021.12.14.
Elfogadva: 2023.08.29.
Online közzétéve: 2023.12.18.

- DR. BAUER BÉLA**, tudományos főmunkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Stratégiai és Koordinációs Központ, bauer.bela@kti.hu
- DÉRI ANDRÁS** szenior kutató, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Stratégiai és Koordinációs Központ; egyetemi tanársegéd ELTE PPK Felnőttképzés-kutatási és Tudásmenedzsment Intézet, deri.andras@kti.hu
- DR. MISKOLCZI MÁRK** Egyetemi adjunktus, Budapesti Corvinus Egyetem (BCE) Fenntartható Fejlődés Intézet, Turizmus Tanszék, mark.miskolczi@uni-corvinus.hu
- KOVÁCS TAMÁS** központvezető, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Stratégiai- és Koordinációs Központ Email: kovacs.tamas@kti.hu

Kivonat: Tanulmányunk a pandémiás helyzet közlekedésre és – részben – a turizmusra gyakorolt hatásait a Közlekedéstudományi Intézet Stratégiai és Koordinációs Központjának 2020-as kvalitatív és kvantitatív, és 2021-es kvantitatív kutatásának eredményei alapján elemzi, elsősorban problémafelvető, leíró jelleggel. Bemutatjuk, hogy 2020-ban az óvatosság határozta meg leginkább a közlekedési módok választásával kapcsolatos attitűdöket, és azt, hogy a fiatalok kisebb arányban tettek le az autós közlekedésről, mint az idősek, míg a kerékpárhasználók aránya csak az idősek körében nem nőtt jelentősebben

Kulcsszavak: közlekedés, szociológia, COVID19, eszközváltás, turizmus

A new era in transport? The impact of the pandemic situation

Abstract: Our study analyzes the effects of the pandemic on transport on the basis of the results of qualitative and quantitative research in 2020 and quantitative research in 2021 of the Strategic and Coordination Center of the Institute of Transport Sciences, mainly in a problem-solving, descriptive manner. We show that in 2020, caution was the main determinant of attitudes towards transport mode choice, and that young people abandoned car use to a lesser extent than older people, while the share of cyclists did not increase significantly only among older people.

Keywords: : transport, sociology, COVID19, modal shift, tourism

Bevezető gondolatok

Az új típusú koronavírus-világjárvány (COVID-19) úgy tematizálta a legtöbb tudományterületet, mint a közbeszédet. Ahogyan a gazdaság területén korábban elképzelhetetlen mértékű hatásai voltak (König - Winkler, 2021), úgy (ezzel összefüggésben, de ezen túlmutatóan is) befolyásolta az egyes emberek életét, mindennapjait, mentális és fizikai állapotát.

A pandémia következtében megváltozó folyamatok egyik meghatározó területe a közlekedés és a turizmus. Az ezeken a területeken történő változások egyszerre ábrázolják a járvány életmódbeli és gazdasági hatásainak drámai mértékét.

Tanulmányunk az egyéni közlekedési módok pandémia hatására végbemenő változásait vizsgálja, illetve ezek mellett az attitűdbeli változásokra is kitér. Szöveggörnyezetként bemutatjuk, hogy a világjárvány miként értelmezhető átfogó (globális) szinten, és hogyan helyezhető el a járványhelyzet szociológiai értelmezésében a közlekedési szokások vizsgálata, majd – néhány jelentősebb nemzetközi kutatás eredményeinek bemutatásával – a járványhelyzet hatásainak általánosítható elemeit értelmezzük.

Tanulmányunk elsődleges célja a magyarországi helyzet bemutatása, amelyet jelenleg elsősorban leíró jelleggel vélünk megtehetőnek. A mélyebb (különösen kvantitatív) elemzésekhez idősoros adatokra is szükség lesz,

véleményünk szerint ennek nagyobb lehetősége lesz a járványhelyzet elmúlt (vagy normalizálódása) után.

A fentiekből kiindulva a tanulmány célja a közlekedési szokásokban beállt változások, és az ezekhez kapcsolt attitűdök vizsgálata és értelmezése. Tanulmányunk amellett érvel, hogy az idősoros vizsgálatok mind tudományos, mind gyakorlati, közlekedésszervezési szempontból elengedhetetlen fontosságúak.

A tanulmány felépítése a következő: a járványhelyzet szociológiai kontextusának felvázolása és a közlekedéssel kapcsolatos nemzetközi kutatások illusztratív említése után ismertetjük a KTI kutatásaihoz használt módszertant és kutatási kérdést, majd a kapott eredményeket mutatjuk be és értelmezzük.

Változó szokások, változó közlekedés

A járványhelyzet szociológiai értelmezésében alapvető fontosságú kérdés a normalitás átalakulásának vizsgálata. Olyan helyzetek és szokások, amelyek korábban elképzelhetetlenek, de legalábbis merőben szokatlanok számíthattak, mára általánosan elterjedtté, megszokottá, időnként normatívvá is válhattak (gondoljunk csak a maszkviselésre az európai országokban). A COVID-19 értelmezhető olyan korszakhatárnak, amely az ezt átélőket (különösen a fiatalokat) szimbolikus univerzumok közti vándorokká teheti. A szimbolikus univerzumok jelentését a fenomenológiai szociológia határozta meg: ezek „olyan különböző értelmi területeket integráló tradíció-összeségek [...], amelyek az intézményes rendet szimbolikus totalitásként fedik be.” (Berger - Luckmann 1998 [1966], 136) „A szimbolikus értelmi világ elrendezi a személyes tapasztalat szubjektív értelmezéseit” (Berger - Luckmann 1998, 139). Szabó Andrea és Déri András ezt egyenesen egy aszteroida hatásához hasonlítják:

„Azt állítjuk, hogy a koronavírus-járvány és az azzal együtt járó lezárások és szociális szeparáció egy kataklizmatikus esemény, külső, exogén sokk, amelyet érdemes aszteroida-hatásként definiálni. Az aszteroida-hatást úgy határozhatjuk meg a társadalomtudományokban, mint a csillagászatban: a becsapódó aszteroida megváltoztathatja az adott bolygó röppályáját, elmozdítja a világ korábbi folyását, megváltoztatja az élet korábbi feltételeit (de: nem mindenre és mindenkire hat ugyanúgy).” (Déri - Szabó 2021)

Déri és Szabó is hangsúlyosan kiemeli a közlekedési szokások változását, mind a turizmussal összefüggésben, mind a közösségi közlekedéssel kapcsolatos bizalomvesztés és átalakuló normarendszer (főleg, de nem kizárólag a maszkviselés esetén) mentén. Fontos kérdés, amit a későbbiekben is érdemes vizsgálni, hogy a pandémiás helyzet hozott-e hosszantartó változásokat, vagy a közlekedési szokások visszarendeződése történik. Jelenleg nem áll rendelkezésünkre adatbázis, amely 2022-re vonatkozóan olyan adatokat tartalmazna, amelyek gyengítik, illetve erősítik ezt a feltételezést. Azonban az érzékelhető, hogy megnövekedett – főleg a nagyobb településeken – az alternatív közlekedési eszközök (többek között e-rollerek, e-kerékpárok) használata. Ezeknek az eszközöknek a használatáról és megítéléséről érdemes folyamatos adatgyűjtést folytatni, mivel megnövekedő szerepük és jelentőségük a közlekedésben befolyásolhatja, átalakíthatja a KRESZ bizonyos rendelkezéseit, szabályait.

A közlekedési szokások és a turizmus vizsgálatát nemzetközileg is kiemelt érdeklődés övezte-övezi. Tanulmányunknak nem célja a nemzetközi kutatások meta-analízise (ez is egy későbbi, a pandémia utáni időszak normalizációja utáni korszak projektje lehet), azonban ezzel együtt is látszik néhány fő irány és fő tanulság, amit a nemzetközi elméletek és kutatások is kirajzolnak. Ezek közül talán az elméletileg legjelentősebb tanulság a közlekedési- és turizmusszektor globális megroppanására vonatkozik. Škare M, Soriano DR és Porada-Rochoń M (2021) meggyőzően érvelnek amellett, hogy míg a korábbi, a szektorra jellemző válságok idioszinkratikus természetűek voltak, azaz alapvetően lokális, időben korlátozott és gyorsan lecsengő jellegűek (vagyis a válság előtti állapot gyorsan helyreállt), a COVID-19 által okozott válságjelenség világméretű, és összemérhetetlen a korábbiakkal. Bár a negatív gazdasági hatások inkább a turizmussal (és természetesen a határátlépések nehézségéből fakadó egyéb gazdasági nehézségekkel) függnek össze, azt, hogy a közlekedés terén mindenre kiterjedő változások születhettek, ez is illusztrálja.

Kifejezetten a személyközlekedés változásaiban a nemzetközi szakirodalom az alábbi tendenciákat azonosította:

- A közösségi közlekedéssel kapcsolatban kiemelt kérdés a közegészségügyi vonatkozásoké, és bár a tapasztalat azt mutatja, hogy a megfelelő maszkhasználattal az ilyen közlekedés nem különösebben veszélyes a járvány terjedése szempontjából¹, az ezzel kapcsolatos társadalmi attitűdöket nagyon erősen

¹ Megjegyzendő, hogy a témában 2021-ig publikált tanulmányok elsősorban az első két hullámra vonatkoznak, amikor a vírus terjedése a későbbi hullámokénál kisebb mértékű volt.

jellemzi az ettől való félelem, ami tartósan is fennmaradhat (Tirachini - Cats, 2020).

- A személyközlekedés, különösen a közösségi közlekedés vonatkozásában kiemelten jelentős, és sokakat foglalkoztató kérdés a „mi legyen”, azaz, hogy a beálló változásokra hogyan reagáljon a közlekedésszervezés: számos tanulmány keresi az ad-hoc tervezés helyett a bizonyítékalapú döntéshozatal megalapozásának az útját (ld. pl. Gkiotsalitis - Cats, 2021).
- A „mi legyen” kérdéseknek egy specifikus, ám igen elterjedt fajtája a fenntarthatósággal függ össze: az optimistább megközelítések szerint a fenntarthatóság irányába teendő lépés lehet a szükségtelen közlekedés elhagyása, a közlekedési normák és gyakorlatok átalakulása és a közlekedési rendszerek hatékonyságának növelése (Griffiths S. - Furszyfer Del Rio D. - Sovacool B., 2021). Ezzel kapcsolatban egyébként egy 2020 májusi kutatás, amit hat európai ország 21 városában folytattak, azt mutatta, hogy a válaszadók összesen 64 százaléka nem akart visszatérni a járvány előtti légszennyezettségi szintekhez. Az olasz városokban a válaszadók majdnem 85 százaléka legalább részben egyetértett azzal, hogy a városoknak lépéseket kell tennie a légszennyezettség csökkentése érdekében a gyaloglás, a kerékpározás és a közösségi közlekedés támogatására – és ezzel még az állítást legkisebb mértékben elfogadó német városokban is 64 százalék körüli volt az egyetértés (Európai Parlament, 2020).
- A közlekedési szokások változásának eddigi legnagyobb volumenű vizsgálata a Boston Consulting 2020 áprilisi kutatása, amely során összesen 5000 alanyt kérdeztek meg az Egyesült Államok, Kína, Németország, Franciaország, Spanyolország és az Egyesült Királyság nagyobb városaiban. Azt találták, hogy „A lezárások alatt szinte minden közlekedési mód használata meredeken csökkent. (...) Nem meglepő módon a magántulajdonban lévő kerékpárok és e-rollerok használata mindhárom vizsgált régióban nőtt, az Egyesült Államokban és Kínában pedig a kerékpármegosztás is, amihez a rendszeres fertőtlenítés és az árcsökkenés is hozzájárult. (...) Csökkent a személygépkocsival történő utazás, ami egyrészt kiszorította a közösségi (közforgalmú) közlekedést és a fuvarmegosztást (más, kevésbé használt közlekedési módok mellett), de ez a jelenség az utazások teljes számának csökkenésével is összefügg.” (Bert et al., 2020). A kutatás emellett azt is találta, hogy a közösségi közlekedésbe vetett bizalom csökkent, hiszen a válaszadók nagyobb része a lezárások vége után is kevésbé gyakran tervezte azt használni (a tendenciákban nem, csak a mértékben mutatkozott aszerint különbség, hogy rövid, vagy középtávon vizsgálták a hajlandóságot). Csak a saját kerékpárt és a magántulajdonú autót tervezték többen a lezárások után gyakrabban használni. Még a közösségi közlekedést rendszeresen használóknak is csak a fele jelezte azt, hogy ugyanolyan gyakran vagy gyakrabban fog e módon közlekedni a járványhelyzet végével, mint előtte. Minden más közlekedési eszköz esetén ez az arány legalább kétharmados volt. (Bert et al., 2020). Egy németországi, szintén 2020-as, reprezentatív kutatás pedig azt találta, hogy a járvány a monomodális közlekedés jelentős terjedésével járt, és teljes visszarendeződés nem várható (Eisenmann et al., 2021).

Összességében tehát mind a szokások, mind az attitűdök terén egyirányba mutató változásokat tapasztalhatunk a 2020-as évre vonatkozó nemzetközi kutatásai alapján: a monomodális, egyéni közlekedés (különösen a személygépjárművek használata) erősödött meg, és némileg ezzel ellentmondó módon a fenntarthatóság szempontjai is erősödhetnek.

A kutatás módszertana

A kutatás keretében a közlekedési szokások változásait, és az ehhez kapcsolódó attitűdöket és társadalmi diskurzusokat vizsgáltuk. Kutatásunk során azt a kérdést kívántuk megválaszolni, hogy milyen tendenciák azonosíthatók a személyközlekedés alakulásában a vírushelyzet során, és kvalitatív kutatásunkban azt is vizsgáltuk, milyen attitűdök kapcsolódnak ehhez, és milyen jövőképük van az embereknek a közlekedéssel összefüggésben.

A feltáró kutatás első lépéseként, 2020. július 14-17. között fókuszcsoportos interjúkat folytattunk le, amelyek a kvantitatív kutatási fázis céljainak pontosítását szolgálták. A kvalitatív, részben strukturált adatfelvételi módszer lehetővé teszi, hogy a szabadon folyó csoportbeszélgetések alapján a vizsgált problémát – jelen esetben a pandémia közlekedési attitűdre gyakorolt hatásait, a turisztikai szokásokat – több megközelítésből is megvizsgálhassuk (Malhotra N. K. - Dash S., 2016).

A járványügyi helyzetre való tekintettel az adatfelvétellel ugyan személyesen, de a fizikai távolságtartást és egészségvédelmi előírásokat betartva, alacsonyabb létszám mellett (4 fő/csoport) került sor.

A kutatás keretében összesen 6 fókuszcsoportos beszélgetést tartottunk, amelyekben törekedtünk eltérő

szociodemográfiai háttérű alanyok bevonására. Ebből kiindulva, a fókuszcsoportos interjúkba különböző korcsoportba tartozó, eltérő iskolai végzettséggel rendelkező alanyok kapcsolódtak be (lásd a Mellékletben). Az alanyok kiválasztásának fontos kritériuma volt továbbá, hogy a résztvevők a világjárványt megelőző időszakban rendszeres résztvevői voltak turisztikai célú, repülővel tett utazásoknak². A fókuszcsoportos interjúkra négy településen, Budapesten (3 csoport), Tatán (1 csoport), Debrecenben (1 csoport), valamint Pécsen (1 csoport) került sor³.

A 90-110 perces időtartamú fókuszcsoportos interjúk vezérfonalát az általános közlekedési, illetve repülési szokások, a légi közlekedés megítélése, fenntarthatósági aspektusainak feltárása, valamint a COVID-19 pandémia és turizmus kapcsolatának feltárása keretezte.

A fókuszcsoportos interjúk eredményeiből kiindulva 2020 őszén (október-november) kvantitatív adatfelvételre került sor (CAPI), amelynek keretében a COVID-19 pandémia közlekedési és turisztikai szokásokra gyakorolt hatását tártuk fel. A CAPI (Computer Assisted Personal Interviewing) a kvantitatív adatgyűjtés egy technikája, amely esetében egy kérdezőbiztos a kutatásba bevont alany válaszait egy digitális eszközön (pl. laptop, tablet) megjelenített kérdőívfelületen rögzíti (Babbie, 2015).

A kérdőíves felmérés keretében 2020-ban 1200 válaszadó bevonására került sor. Az adatfelvétel Magyarország lakosságának szempontjából, a szociodemográfiai kontrollkategóriák alapján (korcsoportokra – 18-64 év közötti lakosság, nemre, településtípusra) reprezentatívnak tekinthető.

A 2021-es adatfelvétel már CATI módszertannal (Computer Assisted Telephone Interviewing) történt, amely során telefonon kérdeztük le alanyainkat. 2021 nyár végén 1000 18-64 éves válaszadó bevonásával vettük fel kutatásunkat, szintén korcsoportokra, nemre és településtípusra reprezentatívan. A tanulmányban a központi témakörhöz kapcsolódó részeredményeket (mobilitási szokások átrendeződése) mutatjuk be.

² A repülési tapasztalat mint kritérium egyik oka a turisztikai célú, hosszabb távú utazásokban való részvétel vizsgálatának szempontja, a kutatásnak azonban egy másik, a cikkben nem ismertett fókusza a légiközlekedés volt, ez is indokolta a kiválasztást.

³ A csoportok összetételéről ld. a Mellékletet

Eredmények

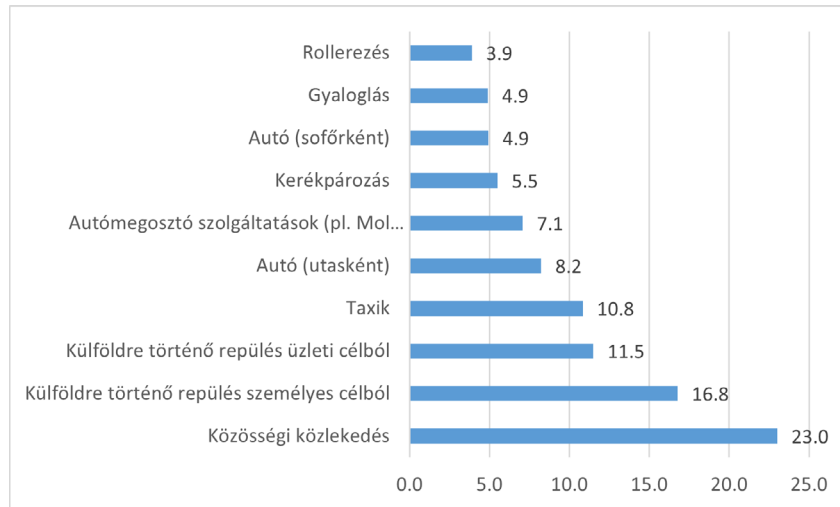
A fókuszcsoporthoz tartozó kutatásunk eredményeit az alábbi táblázatban összegezzük:

1.táblázat Fókuszcsoporthoz tartozó beszélgetések: főbb tanulságok

Témakör	Főbb tanulságok	Jellemző idézetek
Közlekedési szokások a vírushelyzetben	A vírushelyzet aktuális hatásaiban szinte mindenki érzékelte a forgalom csökkenését és a közösségi közlekedési eszközök kiürülését.	<i>alany1, „Mintha kihalt volna a város.” (Pécs)</i>
	Több alanyunk is jelezte, hogy mobilitása a vírushelyzet miatt jelentősen visszaesett, a munkavállalóknál gyakran a home office, az idősebbeknél a fokozott óvatosság volt ennek tipikus oka.	<i>alany9 „Ha van választásom, akkor inkább mondjuk, autómegosztóval megyek, mert akkor tudom, hogy ott biztos nem fognak a nyakamba hányni. Igen, szerintem már rájöttetek, hogy én könnyen parázok dolgoktól, úgyhogy inkább ezt választom, ha lehet” (Bp1)</i>
	Nyáron alanyaink nagyobb része nem várt komolyabb változásokat a helyi és belföldi utazási szokások terén. Egyedül a közösségi közlekedésnél merültek fel az egyéni szokásokban lehetséges tartósabb változások, a tömött járatok fokozottabb kerülése.	<i>alany3 „próbálok olyan járatokkal járni, amivel, meg olyan időben, amin tudom, hogy nincsenek sokan (Tata)</i>
Autós közlekedés	Erősebb biztonságérzet. A vírushelyzet pozitív hatása: kisebb forgalom. Szabályszegek percepciója megmarad.	<i>alany5, „Szerintem nyugisabb volt, már bocsánat, hogy közbeszóltam, merthogy sokkal kevesebb autó volt az úton jóval. (Bp2)</i> <i>„Ugyanúgy láttam a közlekedést, tehát az a kevés autó is úgy sietett, minthogyha nem is tudom, tehát és szabálytalanul: gyorsajtás, irányjelző, amiről beszéltünk, irányjelző nem kirakása. Tehát az a kevés ember is szabálytalanul közlekedik” (Bp1)</i>
Közösségi közlekedés	A vírushelyzet jellemzően eltántorította alanyainkat a közösségi közlekedés használatától, a tömeg és a zárt tér félelemkeltő volt – szinte mindenhol talákoztunk ilyen véleményekkel, de egyértelműen a budapesti csoportokban merült fel legerősebben.	<i>alany3: Hát mert féltünk. (Bp2)</i> <i>alany4: Nem volt jó érzés felszállni a buszra. (Bp1)</i> <i>alany8 „Hát, most hogyha kérdezted a covidos időszakot is, hát akkor kissé elszálltunk a kocsiba. Mert én is vezetek, van saját kocsink, és csak kocsival mentünk tényleg mindenhova. De máskülönben BKV-zom” (Bp2)</i> <i>alany1 „Én abba a pillanatba, hogy ez kitört véletlenül se mentem semmilyen tömegközlekedéssel” (Pécs)</i>
	Kényelmetlenség (különösen a maszkviselés kapcsán).	<i>alany2: A maszkot, azt biztos nem fogom már hordani [a vírushelyzet után]. (Tata)</i>
	Nyáron alanyaink nagyobb része nem várt komolyabb változásokat a helyi és belföldi utazási szokásokban. Egyedül a közösségi közlekedésre vonatkozóan merültek fel az egyéni szokásokban	<i>alany8 próbálok olyan járatokkal járni, amivel, meg olyan időben, amin tudom, hogy nincsenek sokan (Tata)</i>

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Az eredmények megerősítik a nemzetközi kutatási tapasztalatokat, a közösségi közlekedéssel kapcsolatos bizalomvesztés tapintható volt, míg a személygépjárműveket biztonságosnak vélték alanyaink. Érdekes tanulság volt a korábbi normalitáshoz való erős kapaszkodás: a visszarendeződés iránti várakozás. A kvantitatív eredmények tekintetében érdemes megvizsgálni a 2020-as és 2021-es eredményeket.⁴

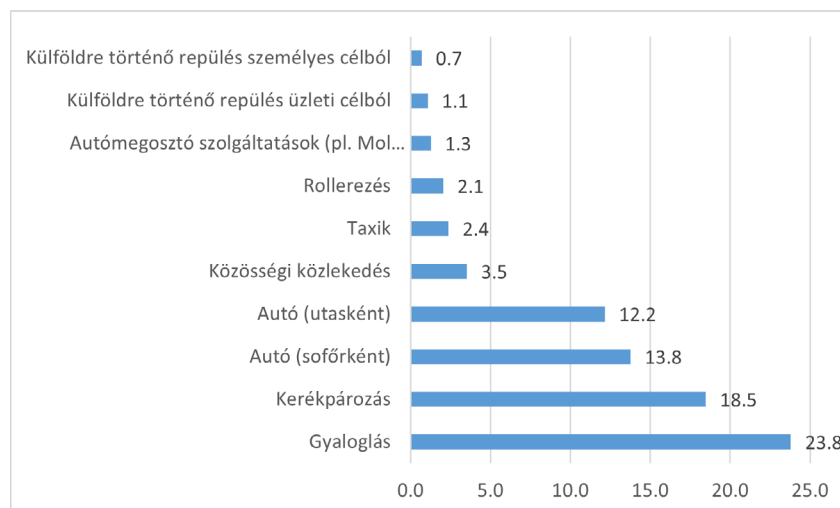


1. ábra Egyes közlekedési módot elhagyók és kevesebbet használók százalékos aránya⁵, 2020

Forrás: szerzők saját szerkesztése

2020-as adatfelvételünket tekintve az látható, hogy a legnagyobb arányban a repüléstől és a közösségi közlekedéstől fordultak el alanyaink. Míg az első tendencia elsősorban a turizmus jelen tanulmányunkban kevésbé tárgyalt visszaesésével függ össze, a másodikban azt láthatjuk, ami a kvalitatív eredményekben is megjelenik: a bizalomvesztés hatásait. A taxis közlekedés visszaesése is kiemelhető az adatok alapján, de az is látványos, hogy a mikromobilitás és a kerékpár használatától minimálisan fordultak csak el az emberek.

Ehhez képest érdemes azt is vizsgálni, mely közlekedési módok használata növekedett.



2. ábra Egyes közlekedési módokat gyakrabban használók százalékos aránya a pandémia ideje alatt, 2020

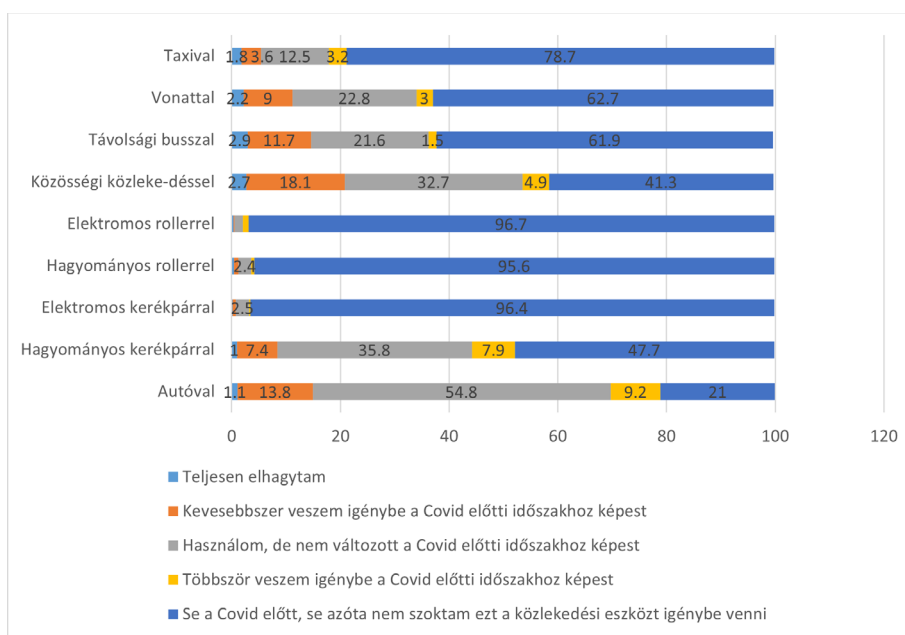
Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Mint látható, a kerékpározás és a gyaloglás 2020 nyarán kiemelkedően népszerűvé vált, érdekes azonban, hogy a mikromobilitás, miközben nem is vett népszerűségéből, nem vált jellemzőbbé. Viszonylag sokan számoltak be az autós közlekedés gyakoribbá válásáról is.

⁴ Megjegyzendő, hogy a nem pontosan megegyező kérdésfeltevés és az adatfelvétel módja teljes összehasonlíthatóságot nem teszi lehetővé, így az adatokat nem tudjuk összevontan bemutatni, azonban a tendenciák értelmezéséhez megfelelő.

⁵ Azon válaszokat összegeztük, amelyek vagy az adott közlekedési mód teljes elhagyására vonatkoztak (teljesen elhagyta, a vírus miatt nem közlekedik így), vagy a kisebb mértékű használatra (kevesebb alkalommal használja)

2021-ben, immáron a szimbolikus univerzumok változásának megszilárdulásával is, feltettük a közlekedési módok változását vizsgáló kérdést.



3. ábra Milyen gyakran szokott az alábbi módokon közlekedni a COVID19 előtti időkhöz képest? A válaszok százalékos megoszlása, 2021

Forrás:

A 2021. évi adatokból is az látszik, hogy a vírushelyzet nagy vesztese a közösségi közlekedés (beleértve a helyközi buszokat, és - kisebb mértékben - a vasúti közlekedést is). A válaszadóink 18⁶ százaléka kevesebbszer használja a közösségi közlekedést, 12 százalékuk kevesebbet ül távolsági buszra, és 9 százalékuk kevesebbet utazik vonattal, mint a vírushelyzet előtt. A válaszadók 9 százaléka többet közlekedik autóval, 8 százalékuk pedig kerékpárral mint a pandémiás időszak előtt. Az autós közlekedést emellett jelentős forgalomcsökkenés is jellemezte (a válaszadók 14 százaléka kevesebbszer közlekedett autóval), a kerékpárosoknál ez az arány 7,5 százalék.

A 2021-es adatoknál azt is megvizsgáltuk, hogy a közlekedési szokások változásai milyen mintázatot mutatnak korcsoportok szerint. Két esetben találtunk szignifikáns összefüggéseket: az autós közlekedést az idősebbek hagyták el nagyobb arányban (elképzeltető, hogy esetükben az autózás felhagyását gyorsította fel a pandémiás helyzet miatti forgalomcsökkenés), míg a kerékpározás esetén a használat növekedése elsősorban a középkorúaknak volt köszönhető: a 40-49 évesek 14 százaléka jelezte, hogy többet biciklizik – minden más életkori csoportban ez az arány 10 százalék alatti volt. Ez minden bizonnyal összefüggésben lehet azzal is, hogy a kisebb településeken volt jellemzőbb a kerékpárra való átállás, ezt az összefüggést azonban a kis mintaelemszám miatt a jelen adatfelvétel nem tudta szignifikánsan alátámasztani.

Ha a 2020-as és 2021-es adatokat összevetjük, viszonylag konzekvens tendenciákat látunk, a kisebb eltérések az eltérő módszertanból és kérdésfeltevésből is származhatnak. Ezzel együtt feltűnő, hogy míg 2020-ban jóval többen voltak azok a sofőrök, akik többet vezettek személyautót, mint akik kevesebbet, 2021-re ez az arány megfordult, és valamivel többen állították, hogy kevesebbet vezetnek, mint amennyien azt válaszolták, hogy többet. Ez elképzeltetően az otthoni munkavégzés elterjedésével is magyarázható. Alapvetően is az látszik, hogy 2021-ben a különböző eszközökön többet közlekedők aránya tendenciaszerűen alacsonyabb, mint 2020-ban, feltételezhetően 2021-ben egy általánosan alacsonyabb fokú mobilitás jellemezte hazánkat, mint akár 2020-ban is.

⁶ A százalékos arányt - a szöveges részben - minden esetben egész számra kerekítettük

A COVID19 lecsengése utáni helyzet

Noha a tanulmányban ismertetett kutatásaink nem tértek ki a pandémiás lezárások feloldása utáni helyzetre, az erre való reflexió megkerülhetetlen. Az utóbbi időszak tudományos és publicisztikai jellegű forrásaiból egyértelműnek látszik, hogy a közösségi közlekedés iránti bizalomvesztés, noha nem drasztikus, de tartós: Budapesten a jegybevételek még 2022-ben is 16%-kal maradtak el a 2019-estől⁷. Ez a változás a kevés nemzetközi szakirodalommal is összhangban van. Az otthoni munkavégzés ugyanis a pandémia utáni világban is elterjedt maradt, számos munkáltató tesz lehetővé rugalmasabb munkavégzési formákat. „Az otthoni munkavégzés szabadsága a városlakókat arra is készítheti, hogy külvárosokba költözzenek, ami meghosszabbítja az alkalmi ingázást és potenciálisan növeli az autófüggőséget. Sok városban az autóforgalom visszatért a járvány előtti szintre, és tovább növekszik. A jövőben kialakuló távmunkaminták döntő szerepet játszhatnak abban, hogy az emberek autócentrikusabb életmódot folytatnak-e vagy sem.” (ITF, 2023: 6) A jelentés emellett azt is aláhúzza, hogy miközben a közösségi közlekedés jelentősége nem feltétlenül csökken, változó igények is jellemezhetik. Például a kevésbé kihasználó csúcsidős kihasználtság terén. Egy 2023-as kutatás⁸, amely a világ nyolc nagyvárosában (London, Párizs, Torino, Düsseldorf, Toronto, Washington, Bangkok és Dubai) vizsgálta a közlekedési szokásokat, azt találta, hogy London és Dubai kivételével a személyautós közlekedés lett/maradt az elsődleges közlekedési forma. Ez összecseng a közösségi közlekedés jelentőségvesztésével összefüggő tapasztalatokkal és adatokkal. A válaszadók nagy többsége (legkevesebben Washingtonban, 58%, legtöbben Bangkokban, 91%, átlagosan 71%) azt jelezte, hogy a járványhelyzet megváltoztatta a közlekedési szokásait.

Összefoglalás, konklúzió

Kutatásunk eredményei azt mutatták, valóban érdemes a COVID-19 hatásait korszakhatárként vizsgálni. Természetesen csak hosszabb távon derülhet ki, valójában milyen tartós hatásai lesznek a pandémiás helyzetnek, azonban a közösségi közlekedéssel kapcsolatos bizalomvesztés mind a kvalitatív, mind a kvantitatív adatok alapján látványos volt (és illeszkedett a nemzetközi trendekbe). Fontos kiindulópont a további adatfelvételek szempontjából, hogy a pandémia a közösségi (közforgalmú) közlekedésbe vetett bizalmat erőteljesen csökkentette, azonban többen használnak személygépkocsit. Ugyanakkor jelentősen emelkedett a kerékpárt használók száma. Az újonnan biciklire szállók elsősorban nem a fiatalok köréből kerültek ki. A személyautók használatának gyakoribbá válása a környezettudatossággal valamelyest szembeállítható, amely ellentmondás – további - vizsgálata szintén indokolt. A COVID-19 az egyéni és a monomodális közlekedés megerősödését hozhatja magával, amely mindenképpen új kihívásokat jelenthet a közlekedésszervezés szempontjából. A közlekedési szokások alakulásának hosszú távú, idősoros vizsgálata így alapvető fontosságú. Különös tekintettel azokra az alternatív közlekedési eszközökre (pl.: e-roller; e-kerékpár), amelyek szerepe – előzetes feltételezésünk szerint – felértékelődik, felértékelődhet. Ennek okát és jelentőségét, érdemes folyamatosan vizsgálni tárgyává tenni, többek között azért, mert a közlekedésben való megjelenésük és az ezzel együtt járó közlekedésbiztonsági kockázatok a KRESZ módosítását is igénylik.

Felhasznált irodalom

- Babbie E. R. (2015): *The Practice of Social Research*. Toronto: Nelson Education.
- Berger P. L. – Luckmann T. (1998 [1966]): *A valóság társadalmi felépítése*. Tudásszociológiai értekezés. Budapest: Józsefvég Műhely.
- Bert J., Schellong D., Hagenmaier M., Hornstein D., Wegscheider A. K., Palme T. (2020): *How COVID-19 Will Shape Urban Mobility*. BCG, June 16, 2020, <https://www.bcg.com/publications/2020/how-covid-19-will-shape-urban-mobility> (letöltve: 2021. 12. 01.)
- Déri A. – Szabó A. (2021): *Generációs kihívás a poszt-covid időszakban*. Szociológiai Szemle 2021/4, megjelenés alatt
- Eisenmann C., Nobis C., Kolarova V., Lenz B., Winkler C. (2021): *Transport mode use during the COVID-19 lockdown period in Germany: The car became more important, public transport lost ground*, *Transport Policy*, vol. 103(C), 60-67.
- Európai Parlament (2020): *COVID-19 and urban mobility: impacts and perspectives*. Rapid-response briefing, Policy Department for Structural and Cohesion Policies Directorate-General for Internal Policies PE 652.213 – September 2020.
- Gkiotsalitis K. & Cats O. (2021) *Public transport planning adaption under the COVID-19 pandemic crisis: literature review of research needs and directions*, *Transport Reviews*, 41:3, 374-392, DOI: 10.1080/01441647.2020.1857886
- Griffiths S. Furszyfer Del Rio D. és Sovacool B. (2021): *Policy mixes to achieve sustainable mobility after the COVID-19 crisis*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 143, June 2021, 110919
- ITF (2023), *Shaping Post-Covid Mobility in Cities: Summary and Conclusions*, ITF Roundtable Reports, No. 190, OECD Publishing, Paris.
- König M, Winkler A. COVID-19 (2021): *Lockdowns, Fatality Rates and GDP Growth: Evidence for the First Three Quarters of 2020*. *Inter Econ.* 2021;56(1):32-39. doi: 10.1007/s10272-021-0948-y.
- Malhotra N. K., Dash S. (2016): *Marketing research: An applied orientation*. Saddle River: Pearson.
- Škare M, Soriano DR és Porada-Rochoń M (2021): *Impact of COVID-19 on the travel and tourism industry*. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 163, February 2021, 120469
- Tirachini, A., & Cats, O. (2020). *COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs*. *Journal of Public Transportation*, 22(1), 1.

⁷ <https://lakogyules.budapest.hu/bejegyzes/2023/05/25/tulelunk-ha-beledoglunk-is-varosuzemeltetes-novekvo-elvonasok-mellett>

⁸ <https://www.mondaq.com/uk/rail-road--cycling/1348216/a-changing-perspective-of-public-transport-in-a-post-covid-19-era>

Melléklet

Fókuszcsoportos beszélgetések: szűrési kritériumok, csoportösszetétel

Kód	Régió	Fókuszcsoportok helyszíne	Alanyok szociodemográfiai ismérvei	
			Legmagasabb iskolai végzettség	Életkor szerinti megoszlás
BP1	Pest megye	Budapest	Szakmunkásképző (n ⁹ =1)	56-74 éves (n=2)
			Középfokú végzettség (n=2)	41-55 éves (n=2)
			Felsőfokú végzettség (n=1)	
BP2			Szakmunkásképző (n=1)	25-40 éves (n=2)
			Középfokú végzettség (n=2)	18-24 éves (n=2)
			Felsőfokú végzettség (n=1)	
BP3			Középfokú végzettség (n=2)	56-74 éves (n=1)
			Felsőfokú végzettség (n=4)	41-55 éves (2)
				25-40 éves (3)
T1	Komárom-Esztergom megye	Tata	Szakmunkásképző (n=1)	25-40 éves (n=2)
			Középfokú végzettség (n=2)	18-24 éves (n=2)
			Felsőfokú végzettség (n=1)	
P1	Baranya megye	Pécs	Szakmunkásképző (n=1)	56-74 éves (n=2)
			Középfokú végzettség (n=1)	41-55 éves (n=2)
			Felsőfokú végzettség (n=2)	
D1	Hajdú-Bihar megye	Debrecen	Szakmunkásképző (n=2)	56-74 éves (n=2)
			Felsőfokú végzettség (n=2)	25-40 éves (n=2)

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

⁹ A kutatásba bevont alanyok száma (fő)

Az összekapcsolt autonóm járművek mibenlétéről

Beküldve: 2023.04.28.
Elfogadva: 2023.08.18.
Online közzététel: 2023.12.18.



DR. LUKOVICS MIKLÓS habilitált egyetemi docens, PhD, Szegedi Tudományegyetem Gazdaságtudományi Kar, miki@eco.u-szeged.hu

Kivonat: Az autonóm járművekkel kapcsolatos műszaki-természettudományi, valamint társadalomtudományi kutatások száma napjainkban dinamikusan nő, így egyre többet tud a nemzetközi tudományos és gyakorlati közösség az autonóm járművekről. Ezzel párhuzamosan a járműautomatizálásban és a közlekedési infrastruktúrában olyan új technológiák erősödnek meg, amelyek lehetővé teszik azt, hogy az autonóm járművek adatkapcsolatot létesítsenek egymással, a közlekedés egyéb résztvevőivel és az infrastruktúrával. Mindez lehetővé teszi, hogy az autonóm járművek ne csupán „lássák”, hanem „érezékeljék” is a környezetüket, növelve ezzel a városi közlekedés biztonságát, és jelentősen átalakítva a városi közlekedést. Jelen tanulmány célja, hogy körüljárja az összekapcsolt autonóm járművek (Connected and Autonomous Vehicles, CAV) mibenlétét, arról elméleti áttekintést adjon. Célunk, hogy a hazai tudományos és gyakorlati közösség számára olyan „fogalomtárát” hozzunk létre, amely könnyen áttekinthetővé teszi az összekapcsolt önvezető járművek témakörét, megkönnyítve ezzel a városi közlekedési rendszerekbe való illeszthetőségük előkészítését.¹

Kulcsszavak: autonóm járművek, összekapcsolt és autonóm járművek, városi mobilitás

On the Essence of Connected Autonomous Vehicles

Abstract: The number of technical, natural science and social science researches on autonomous vehicles is rapidly increasing, allowing the international scientific and practical community to learn more about autonomous vehicles. At the same time, new technologies are emerging in vehicle automation and transportation infrastructure, which enable autonomous vehicles to establish data connections with each other, other traffic participants, and the infrastructure. This makes it possible for autonomous vehicles not only to „see” but also to „sense” their surroundings, increasing urban traffic safety and significantly transforming urban transportation. The aim of this study is to provide a theoretical overview of the nature of connected and autonomous vehicles (CAV) and to create a „vocabulary” that makes it easy for the Hungaria scientific and practical community to understand the topic of connected autonomous vehicles, facilitating the preparation of their integration into urban transport systems.

Keywords: autonomous vehicles, connected and autonomous vehicles, urban mobility

Bevezetés

Az autonóm járművek képességei és fejlődése folyamatosan az érdeklődés középpontjában áll, mivel azok a jövőbeni közlekedési megoldások egyik legfontosabb forradalmi változását ígérik (Cohen et al., 2020). Az autonóm járművek azonban csak egy része azon új technológiáknak, amelyek gyorsan fejlődnek a közlekedési ágazatban, és számos lehetőséget rejtenek az utazási és szállítási szektor számára, például azt, hogy a közlekedés különböző eszközei adatkapcsolatban álljanak egymással (Jiang, 2022). Ebből adódóan napjainkban az autonóm járművek fogalma mellett egyre gyakrabban találkozhatunk a nemzetközi szakirodalomban az összekapcsolt autonóm járművek (Connected and Autonomous Vehicles, CAV) fogalmával is (Rebalski et al., 2022).

Az autonóm járművek és az összekapcsolt közlekedési infrastruktúra együttesen jelentős változásokat hozhatnak a városi közlekedés területén, és számos lehetőséget kínálnak a hatékonyabb, fenntarthatóbb és biztonságosabb közlekedési megoldások kialakítására (Shepard et al., 2022). Talán éppen erre vezethető vissza, hogy nagyon ritka az olyan technológiai fejlesztés, amely akkora közfigyelmet kap, mint jelenleg az összekapcsolt és automatizált

¹Jelen kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

járművek Chehri és Mouftah (2021). Az adatcsere felhasználható különböző alkalmazások fejlesztésére, amelyek növelhetik a közúti biztonságot, jobban irányíthatják a forgalom áramlását, és további kényelmi szolgáltatásokat nyújthatnak a járművezetőknek.

Az önvezetés és az összekapcsoltság két alapvető jelentőségű tényező, amikor a közlekedési rendszer változásairól beszélünk (Mitteregger et al., 2022). A kettő mégis különbözik, hiszen léteznek olyan önvezető járművek, amelyeknél nem beszélhetünk összekapcsoltságról, és léteznek olyan összekapcsolt járművek is, amelyek nem önvezetők. Egyre hangsúlyosabb azonban a kettő egy lapon való említése, egyre többet használgják a “connected and automated vehicles”, azaz “összekapcsolt autonóm járművek” kifejezést, tehát már nem csak autonóm járművekről beszélünk, hanem olyan autonóm járművekről, amelyek képesek kommunikálni egymással és/vagy a környezetükkel (PSC 2017). Azonban az autonóm járművek és az összekapcsolt közlekedési infrastruktúra bevezetésekor számos kihívás is felmerül, amelyeket figyelembe kell venni az innováció sikeres és fenntartható megvalósítása érdekében.

Mindezek alapján fontos megértenünk azt, hogy miképpen ragadható meg az összekapcsolt autonóm járművek fogalma, így tanulmányunk célja az összekapcsolt autonóm járművek mibenlétének körüljárása. Fontos feltárunk és látnunk az egyes megközelítésekben rejlő logikai különbségeket, és azokat helyesen alkalmazni akkor, amikor a mobilitási kihívásokra adott válaszainkat megtervezzük.

Ennek érdekében tanulmányunkban – egy rövid történelmi visszatekintést követően – elméleti kutatást végzünk, és feltárjuk a nemzetközi szakirodalomban fellelhető fogalmi meghatározások legfontosabb irányait. Kitérünk arra is, hogy a kapcsolódó autonóm járművek számára milyen kommunikációs lehetőségek állnak rendelkezésre (V2V, V2I, V2P, V2X), valamint bemutatjuk ezen járművek funkcionális összetevőit.

Leonardo da Vinci önvezető szekerétől az első önvezető járművekig

Logikusan gondolhatjuk úgy, hogy az autonóm járművek innovációja egyértelműen korunkhoz köthető, azonban már Leonardo da Vinci is élénken gondolkodott a 15. században azon, hogy miképpen haladhatna egy szeker anélkül, hogy azt bármi vontatná vagy tolná. Létre is hozta „önhajtású szekerét”, amely korabeli technikákat alkalmazva, rugós mechanikával működve képes volt előre meghatározott útvonalat, kanyart követni (TWT 2021).

Bimbraw (2015) szerint a mai autonóm járművek felé vezető első fontos lépés a rádióvezérelt autó volt, amelyet Linriccan Wondernek neveztek el. 1925-ben Francis Houdina feltaláló egy távirányítású autót mutatott be Manhattan utcáin, amelyben senki nem ült a vezetőülésben. A rádióvezérlés képes volt beindítani a motort, sebességet váltani, és dudálni. Ez az autó bepillantást adott, milyenek lehetnek majd a jövő autonóm járművei, de gyorsan leállították, amikor a rádióvezérlés kétszer is elveszítette az irányítást az úton, és a Linriccan Wonder ütközött egy másik járművel. Az átalakított formáját a Linriccan Wondernek a „Phantom Auto” néven használták, és 1926 decemberében Achen Motors mutatta be Milwaukee-ben. Kovács (2018) kiemeli, hogy 1940-ben egy amerikai formatervező, Norman Bel Geddes könyvében olyan városokról ír, melyben az autók az úthálózatba épített jelekkel kommunikálnak,

Fontos mérföldköve az autonóm járművek történelmének az 1939-es New York-i világitállítás, ahol a General Motors Futurama projektjében egy képzeletbeli 1960-as jövőképet mutattak be tele önvezető járművekkel. A technológia rádióvezérléssel és az utakon elhelyezett fém elemek elektromágneses jeleinek segítségével tájékozódott a meghatározott vonalakon (Miller 2020).

Kovács (2018) történelmi áttekintésében rámutat arra, hogy 1969-ben egy mesterséges intelligenciával foglalkozó kutató, John McCarthy ír emberi segítség nélkül, kamerák segítségével tájékozódó autóról. Bár ebben az időben ezek az elképzelések még megvalósíthatatlannak számítottak, számos olyan ötlet született, ami talán nem is áll olyan messze a nagyjából száz évvel későbbi valóságtól. A cikk szerint az 1980-as évektől számos fejlesztés indult, ami lehetővé tette az autók önvezetéshez való közeledését. 1995-ben megszületett az egyik valódi előfutára az önvezető járműveknek, egy részlegesen önvezető kisbusz, ami Dean Pomerlau és Todd Jochem munkája volt. A kisbusz Pomerlau már az 1990-es évek elején megfogalmazott elmélete szerint közlekedett, azaz működés közben feldolgozta a képeket, és azok alapján tájékozódott, bár a megállításhoz és a gyorsaság szabályozásához még emberre volt szükség. Pomerlau az önvezető autók rendszerét az emberi idegrendszer működéséhez hasonlította. A 2000-es évektől kezdve az önvezető technológia bizonyos részeit, például a parkolást segítő rendszereket átvette az autóiipar, és folyamatosan tökéletesítette.

Jelentős áttörést talán az először 2004-ben, az Amerikai Védelmi Minisztérium által megszervezett DARPA kihívások jelentettek, amelyeknek célja egy olyan önvezető jármű készítése volt, amely fix akadálypályát teljesíteni

képes. A kihívás célja az volt, hogy a tervezett jármű sikeresen átnavigálja magát egy kegyetlen, 132 mérföldes sivatagos akadálypályán, természetesen katonai felhasználási szándékkal. A kihívásnak 2005-ben lett meg az első nyertese, amelynek díjazása 2 millió dollár volt. Ezt követően olyan nagy momentumra kapott az önvezető technológiák fejlesztése, amelyet Hanky Sjafrie az 1950-es évek úrkutatás helyzetéhez hasonlított könyvében (Sjafrie, 2019).

Ezt követően az események felgyorsultak, és 2023-ban már a világ több száz városában több tucat önvezető járműfejlesztő cég végez utcai teszteket a közúti forgalomban. A világ több nagyvárosában (például Phoenix, San Francisco, Los Angeles, Peking) biztonsági sofőr nélküli robot taxival utazhat bárki, sőt a Waymo és a Cruise cégek már bemutatták a kormánykerék nélküli önvezető autójuk prototípusát.

Kiindulás: az autonóm járművek fogalmi lehatárolása

Az önvezető vagy autonóm járművek fogalma egyre inkább elterjedté és letisztulttá válik, a tudomány és a gyakorlat egyaránt kiemelt jelentőséget tulajdonít a témakörnek. Az önvezető járművek meghatározása során az „önvezető” jelző megértéséből szükséges kiindulni, amelyhez az automatizáció szintjeinek megismerése jelent megfelelő alapot. E szintek kategorizálása szervezettől függően változhat, a legmeghatározóbbak az egyesült államokbeli NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) és SAE (Society of Automotive Engineers), valamint a német BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) csoportosítása. A nemzetközi szakirodalomban a fogalmi lehatárolás a legtöbb esetben a SAE J3016 szabványból indul ki, így kutatásunk során magunk is ezt tekintjük kiinduló pontnak. Az SAE által meghatározott automatizációs szintek a következők (ITF 2015, Lukovics et al., 2018):

- 0. szint: nincs automatizáció, az irányítás folyamatosan a vezető kezében van, még ha a vezetést aktív biztonsági rendszerek segítik is.
- 1. szint: vezetői asszisztens, bizonyos vezetéstámogató rendszerek segítik a jármű mozgását, de az irányításért a vezető a felelős.
- 2. szint: részleges vezetésautomatizálás, a hosszanti vagy oldalirányú vezérlés automatikusan történik bizonyos esetekben, de a vezetőnek folyamatosan felügyelnie kell a járművet.
- 3. szint: feltételes vezetésautomatizálás, a vezetés teljes folyamatát képesek elvégezni a telepített rendszerek, de a vezetőnek folyamatos készenlétben kell lennie.
- 4. szint: magas szintű automatizálás, már nem kell a sofőrnek bármikor készen állnia a közbelépésre, de ha a körülmények indokolják, át kell vennie az irányítást.
- 5. szint: teljes automatizálás, amikor már minden helyzetben önvezető a jármű.

A SAE-tipizáláshoz köti Mitteregger és szerzőtársai (2022: 24) saját definícióját: „Az általánosan „önvezető” vagy „autonóm” járműként ismert jármű megfelel az SAE terminológiájában ajánlott „teljesen automatizált járműnek”(Mitteregger et al., 2022).

A SAE-tipizáláson, illetve a közvetlenül arra épülő fogalmi megközelítések mellett természetesen önálló definíciók is elérhetőek: „Az autonóm jármű olyan gépjármű, amely mesterséges intelligenciát, érzékelőket és a globális helymeghatározó rendszer koordinátáit használja arra, hogy emberi vezető aktív beavatkozása nélkül, önvezetésre legyen képes” (Chehri – Mouftah, 2021: 259).

Ivus és szerzőtársai (2020) azzal egészítik ki mindezt, hogy az autonóm jármű szenzorok, vezérlők és fedélzeti számítógépek, valamint kifinomult szoftverek kombinációját használja, és ezek segítségével képes bizonyos vezetési funkciókat elvégezni az ember helyett.

Az önvezető vagy autonóm jármű fogalmi lehatárolása szempontjából a magyar nyelvű szakirodalomban meghatározó a Csizmadia Zoltán és Rechnitzer János által szerkesztett „Az önvezető járművek világa” című kötet, amelynek fogalomtárában az alábbi definíciók találhatóak (Csizmadia – Rechnitzer, 2021: n.o.):

- „Autonóm jármű (autonomous vehicle): Azokat a járműveket tekintjük valamilyen fokon/szinten autonómnak, amelyeknek bizonyos vezetési, biztonsági vagy kényelmi célokat szolgáló funkciói már automatizáltak, a sofőr közvetlen beavatkozása nélkül is üzemelnek. Az ilyen jellegű technológiák közül néhány már széles körben elterjedt – pl. automatikus sávtartás, sebességtartó automatika (tempomat), parkolási asszisztens – míg mások még inkább csak kísérleti stádiumban működnek (az automatizáltság fokozataihoz lásd SAE szintek). A teljesen automatizált autonóm járműveket önvezető járműveknek nevezzük.
- Önvezető jármű (self-driving vehicle): Az önvezető jármű fogalma alatt az automatizáltság legmagasabb szintjét értjük. Ebben az esetben a vezetéshez kapcsolódó összes feladatot a jármű veszi át, a sofőr

tevékenységére nincs szükség a jármű irányításában, amely a külső környezetet érzékelő szenzorok és az irányítást végző szoftverek kommunikációja alapján történik, tehát emberi beavatkozás nélkül, digitális technológiák segítségével működik (lásd SAE 5. szint). Az autonóm jármű tehát a humán vezetőhöz hasonló áttekintő, környezetelemző és döntéshozó képességekkel rendelkezik. Képes arra, hogy saját döntéseket hozzon, és ezek alapján minden eshetőségre ember által adott utasítás nélkül válaszoljon.”

Az összekapcsolt autonóm járművek definíciós megközelítése

Az összekapcsolt autonóm járművek kifejezés az olyan automatizált járművekre használatos, amelyek képesek egymással és/vagy a környezetükkel kommunikálni (PSC 2017). „A hálózatba kapcsolt és autonóm járművek az Internet-of-Things (IoT) eszközök és a környező fizikai és digitális környezettel való kommunikációra alkalmas hálózati képességek kombinációját jelentik.” (Ivus et al., 2020: 7) „A CAV-ok vezeték nélküli hálózatokat és érzékelőket használnak a releváns forgalmi és egyéb létfontosságú információk megszerzéséhez vezetés közben, az irányítást pedig kifinomult szoftverek végzik” (Ivus et al., 2020: 5). Egy hasonló megközelítés szerint a CAV-ok „olyan járművek, amelyek vezetésautomatizálási rendszerekkel vannak felszerelve, és képesek kommunikálni a közlekedésben részt vevő szereplőkkel” (Lee – Hess 2020, 86.o.). Fontos kiegészítés, hogy cikkben a CAV deklaráltan a hármas, vagy annál magasabb SAE automatizáltsági szintű járművekre vonatkozik.

A CAV-ok képesek lehetnek megváltoztatni a vezetés automatizálásával és az összekapcsolással külön-külön elérhető lehetőségeket (Guanetti et al., 2018).

Rios-Torres és szerzőtársai (2016) alapján a csatlakoztathatóság drámai javulást eredményezhet a környezet iránti tudatosság terén, és ezáltal az autonóm járművek biztonságát is javíthatja, az érzékelő rendszerek korlátai ellenére. Ehhez kapcsolódó megközelítés szerint: „A CAV-ok két különálló komplex koncepció, nevezetesen az összekapcsolhatóság és az autonómia szintézisének tekinthetők, amelyek egyesítése jelentős szinergiákhoz, de potenciálisan katasztrofális sebezhetőségekhez és korábban nem látott fenyegetésekhez, veszélyekhez is vezet”. (Nikitas et al., 2022: 1)

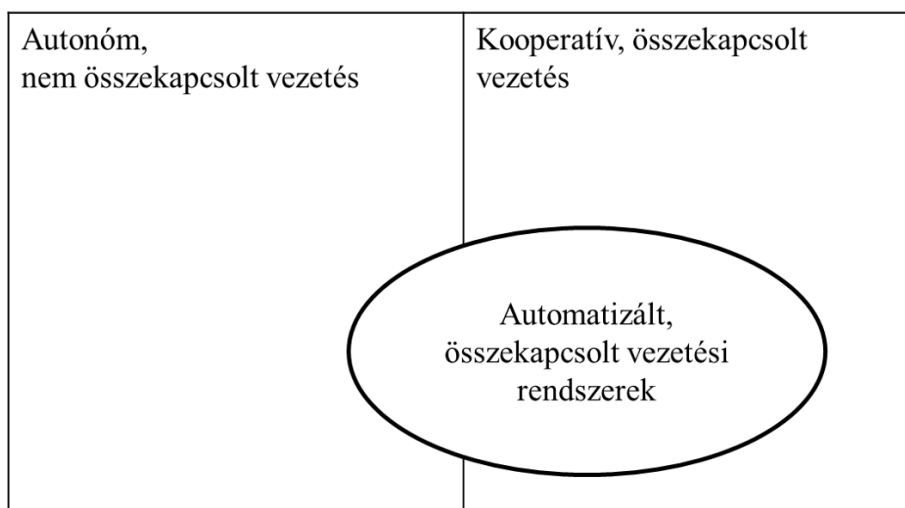
Az összekapcsolt és automatizált járművek rövidebb hézagokat és gyorsabb reakciókat biztosíthatnak a járművek között, miközben a megfelelő célsébségek meghatározásával javíthatják az autópályák kapacitását. E technológiák átfogó célja a biztonság javítása, miközben csökkentik az üzemanyag-fogyasztást, a kibocsátást és a forgalmi torlódásokat.

A CAV-ok lehetséges alkalmazásai például a fokozott tudatossággal megvalósuló valós idejű irányítás és tervezés, a mikroszintű forgalmi információkkal történő útvonaltervezés és a közlekedési jelzésekkel kapcsolatos információkkal történő összehangolt menetrend szerinti közlekedés (Guanetti et al., 2018).

Az összekapcsolódás és az automatizálás a közlekedési rendszer változásának fő mozgatórugói, mégis két alapvetően különböző dologról van szó, amelyek nem feltétlenül kapcsolódnak egymáshoz (Perret et al., 2017: 6). Ennek ellenére egyre nagyobb hangsúlyt kap ezek egyidejűsége és párhuzamos fejlődése: míg a korai kutatások gyakran beszéltek autonóm vezetésről vagy autonóm járművekről, az újabb cikkek egyre gyakrabban használják az „összekapcsolt és automatizált járművek” kifejezést: „Bár az automatizált járműveknek nem feltétlenül kell összekapcsoltnak lenniük, és az összekapcsolt járművek nem igénylik az automatizálást, középtávon várhatóan az összekapcsolhatóság lesz az automatizált járművek egyik fő eszköze” (EC, 2018: 4).

A járművek összekapcsolódásának és az automatizálásnak az egyidejűségét az magyarázza, hogy már jelenleg is a növekvő összekapcsolódást tekintik bizonyos vezetési feladatok előfeltételének. Például az aktuális forgalmi helyzetre, az úttest állapotára és esetleg magára az infrastruktúrára (közlekedési lámpák, fizetőkapuk stb.) vonatkozó adatokra lehet szükség a jármű biztonságos automatizált működésének elősegítéséhez (Ritz, 2018: 184). Továbbá, az automatizált járművek néhány kívánt hatása csak akkor érvényesül, ha összekapcsoltan működnek. Ilyen például az utakon és az úthálózatban a hatékonyság növelése az elosztás eredményeként, a járműforgalom növelése és a biztonság javítása (Kagermann, 2017; Shladover, 2018).

Mitteregger és szerzőtársai (2022) szerint ez azt is jelenti, hogy bár az első automatizált vezetési rendszerek többsége, amelyek csak alacsonyabb szintű automatizált vezetési funkciókat kínálnak, még viszonylag függetlenek és nem, vagy alig vannak összekapcsolva, hosszú távon - amikor az automatizálás magasabb szintjeit elérjük - fontos lesz, hogy az automatizált vezetési rendszerek a lehető legjobban össze legyenek kapcsolva, hogy valóban elérjék a kívánt hatást (1. ábra).



1. ábra Az autonóm, a kooperatív és az automatizált és összekapcsolt vezetési rendszerek

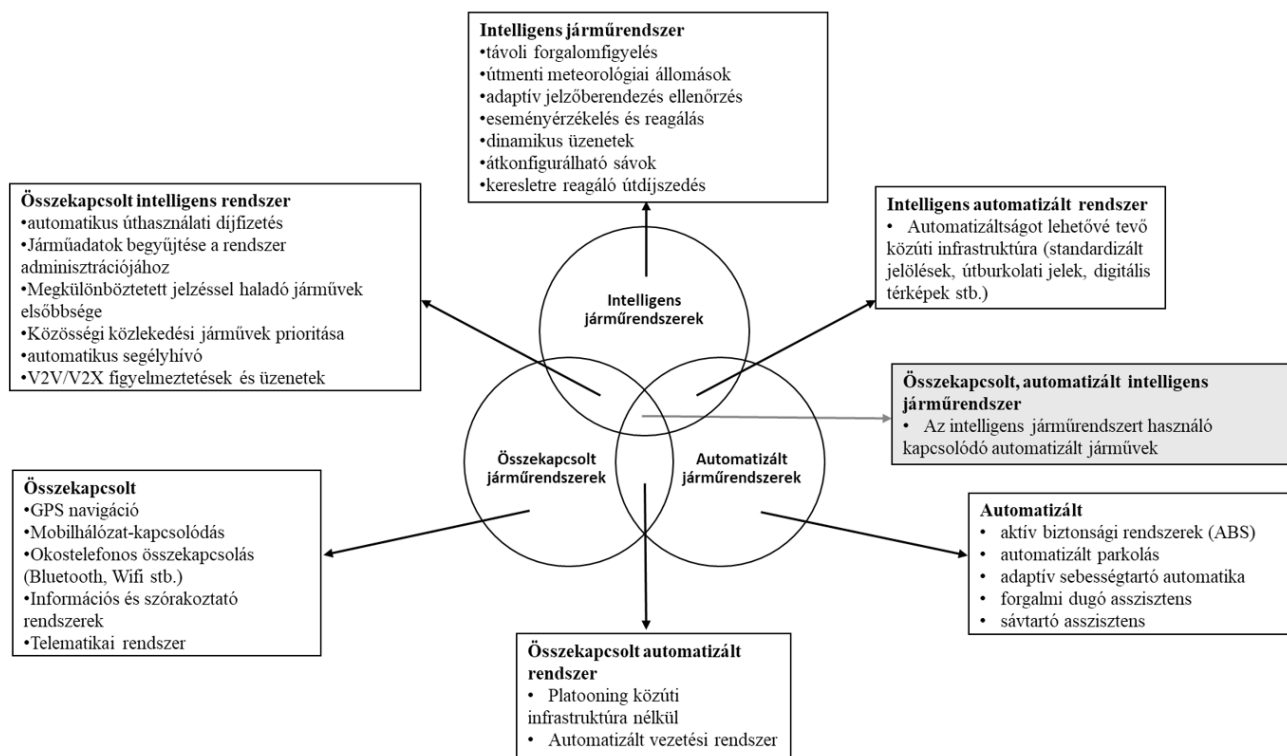
Forrás: Mitteregger et al. (2022) 59. o.

A nemzetközi szakirodalom általában egy egyszerű két dimenziós logika (automatizáció és kapcsolódás) mentén helyezi el a kapcsolódó autonóm járműveket, azonban találkozhatunk olyan megközelítéssel is, ahol a kapcsolódó autonóm járművek fogalmi lehatárolása komplexebb módon, egy három dimenziós strukturában történik. A két dimenziós definíciók által lehatárolt CAV-fogalom ez esetben három rendszer metszéspontjában található: (PSC, 2017):

- Az intelligens közlekedési rendszer egy komplex rendszer, amely magába foglalja az elektronikát, kommunikációt és információfeldolgozást, amelyek önmagukban vagy egymással kombinálva alkalmazva javítják a közlekedési rendszer hatékonyságát vagy biztonságát. A rendszer egészében értelmezendő, minden alkotó elemének a szinergiája fontos. A jármű-jármű (V2V) és a jármű-infrastruktúra (V2I) kommunikációs rendszerek az ITS fontos elemei. A V2V rendszerek a járművek közötti vezeték nélküli kommunikációt írják le, például a biztonsági figyelmeztetések és üzenetek közvetítését. A V2I rendszerek a járművek és az infrastruktúra közötti vezeték nélküli kommunikációt írják le, mint egy olyan rendszer, amely a járművet navigációs célokra összekapcsolja a mobiltornyokkal. Az intelligens járműrendszer például képes felismerni és jelezni, ha a közelben baleset történt.
- Az összekapcsolt járműrendszerek digitális kommunikációt tesznek lehetővé a jármű és a külvilág között. Néhány jármű csak információ fogadására, mások csak információ átadására képesek, illetve van amelyik mindkettőre. Az összekapcsolt járműrendszerek digitális jellegűek és nem tartalmaznak érzékelő alapú (pl. Lidar, radar) vagy analóg rendszereket (pl. AM/FM, VB rádió). Összekapcsolt rendszerről beszélünk például GPS esetében, vagy okostelefonnal, bluetoothon vagy wifin történő összekapcsoláskor.
- Az automatizált járműrendszerek olyan elektronikus rendszerek, amelyek befolyásolják a jármű hosszanti, vagy oldalirányú mozgását. Automatizált rendszer a sávtartó, vagy a parkolóasszisztens, automatizált és összekapcsolt rendszerről pedig például platooning szállítási technológia esetén beszélünk.

Az összekapcsolt önvezető járművek kifejezést számos járműtechnológiára használhatjuk, amelyek a közlekedés javítását célozzák. Ezek a technológiák működhetnek a jármű vagy a közlekedési rendszer szintjén, illetve mindkettőn egyszerre. Számos automatizálási és csatlakoztatási lehetőség létezik, a járművek csatlakoztathatók anélkül, hogy automatizáltak lennének, illetve lehetnek automatizáltak anélkül, hogy képesek lennének egymással kommunikálni (2. ábra). Az összekapcsolt önvezető járműveket gyakran az intelligens közlekedési rendszerekkel (Intelligent Transport System, ITS) azonosítják, pedig ez egy sokkal tágabb, járműrendszereket meghaladó fogalom (PSC 2017).

Az intelligens és automatizált rendszer képes a közúti infrastruktúrák alapján tájékozódni, például képes érzékelni és értelmezni az aszfalton található felfestéseket. Összekapcsolt és intelligens rendszerről beszélünk például abban az esetben, ha járművünk baleset esetén azonnal hívja a mentőket, vagy ha automatikusan elsőbbséget ad a megkülönböztető jelzéssel haladó járműveknek, közösségi közlekedési járműveknek, de ide sorolhatjuk a V2V és V2X kommunikáció során létrejövő figyelmeztetéseket és üzeneteket is. Ezeknek a járműrendszereknek tehát számos különböző kombinációja létezik. Eszerint a megközelítés szerint CAV-ról csak a legkisebb részhalmaz esetében beszélünk, tehát ha intelligens is, automatizált is és összekapcsolt is a járműrendszer, például infrastruktúra alapján tájékozódó önvezető járművek esetén (2. ábra).



2. ábra Fejlett közlekedési technológiák

Forrás: PSC (2017) alapján saját szerkesztés

Figyelemre méltó, hogy az AV és a CAV mozaikszavak mellett további mozaikszavak is feltűnnek a téma szakirodalmának olvasása közben. A CAV rövidítést hajtáslánctól függetlenül használjuk, azaz a vizsgálat szempontjából irreleváns, hogy a jármű robbanómotorral vagy elektromos hajtáslánccal közlekedik. Bizonyos szerzők azonban a jövő mobilitását egyértelműen az önvezetés, a kapcsolódás és az elektromos hajtáslánc kombinációjában látják. A hálózatba kapcsolt és autonóm elektromos járművek (Connected and Autonomous Electric Vehicle, CAEV) alapvetően a hálózatba kapcsolt járművek (Connected Vehicles, CV), az autonóm járművek (Autonomous Vehicles, AV) és az elektromos járművek (Electric Vehicles, EV) kombinációja (Vaidya et al. 2021). Szintén a témakörhöz kapcsolódó kifejezés a kapcsolódó hagyományos jármű (Connected Human-driven Vehicle, CHV), amely arra utal, hogy az összekapcsoltság csak abban az esetben eredményes teljes mértékben biztonságos rendszert, ha a CAV-járművek a hagyományos járművekkel is tudnak kapcsolódni (Niroumand et al., 2020).

Szintén ide tartozik az összekapcsolt automatizált szállítás (connected and automated transport, CAT) és az összekapcsolt és automatizált mobilitás (connected and automated mobility, CAM) is. Ezen technológiák bevezetése várhatóan jelentős hatással lenne a városi fejlődésre, de a kapcsolódó technikai fejlesztések még kísérletezés alatt állnak, illetve ezeken kívül szükség van a társadalmi elfogadás és sok más tényező kialakulására ahhoz, hogy széles körben el tudjon terjedni a technológia (Mitteregger et al., 2020).

Az összekapcsolt autonóm járművek kommunikációja

Khan és szerzőtársai (2022) alapján a CAV-ok kommunikációja többféle lehet:

- „V2V”, vehicle to vehicle: a járművek egymással osztanak meg információkat, ütközés előtt képesek egymásnak figyelmeztetést küldeni, egyéb vészhelyzetekben riasztják egymást
- „V2I” vehicle to infrastructure: a járművek az infrastruktúrával kommunikálnak, valós időben küldenek és fogadnak információt az időjárási viszonyokról, útviszonyokról, forgalmi jelzőlámpákról (pl. zöldhullám), sebességkorlátozásokról és felmerülő útdíjakról
- „V2C” vehicle to cloud: a jármű a felhővel kommunikál
- „V2P” vehicle to pedestrian: a járművek információt kapnak a gyalogosok elhelyezkedéséről és irányváltoztatásairól
- „V2X” vehicle to everything: a jármű a fentiek mindegyikével képes kommunikálni.

- A járművek egymáshoz való kapcsolódási képességét aszerint kategorizálják, hogy mivel jön létre a kapcsolat (1. táblázat). A „vehicle to everything” vagy V2X a járművek teljes kommunikációs képességét írja le: akár egymással (V2V), akár az infrastruktúrával (V2I) vagy a gyalogosok mobil eszközeivel is képesek kommunikálni (V2P) (Shladover, 2018).

1. táblázat Kommunikációtípusok és lehetséges alkalmazásai

Kapcsolat típusa	Magyarázat	Alkalmazás
Jármű-Jármű közötti (V2V)	Járművek egymás közötti kommunikációja	Valós idejű információk a következőkről: <ul style="list-style-type: none"> - ütközés figyelmeztetés - veszélyjelzések - együttműködő adaptív sebességtartó automatika (CACC) - platooning - csatlakozási garancia a közlekedési mód megváltoztatásakor stb.
Jármű-Infrastruktúra közötti (V2I)	Járművek kommunikációja az út menti infrastruktúrával	Valós idejű információk a következőkről: <ul style="list-style-type: none"> - időjárás - útviszonyok - közlekedési lámpák (pl. zöld hullám) - változó sebességkorlátozások - útdíjfizetés stb.
Jármű-Gyalogos közötti (V2P)	Járművek kommunikációja az utasokkal és a nem motorizált úthasználókkal	Valós idejű információk a következőkről: <ul style="list-style-type: none"> - pozíció - sebesség - irány stb.

Forrás: Mitteregger et al. (2022) 62. o.

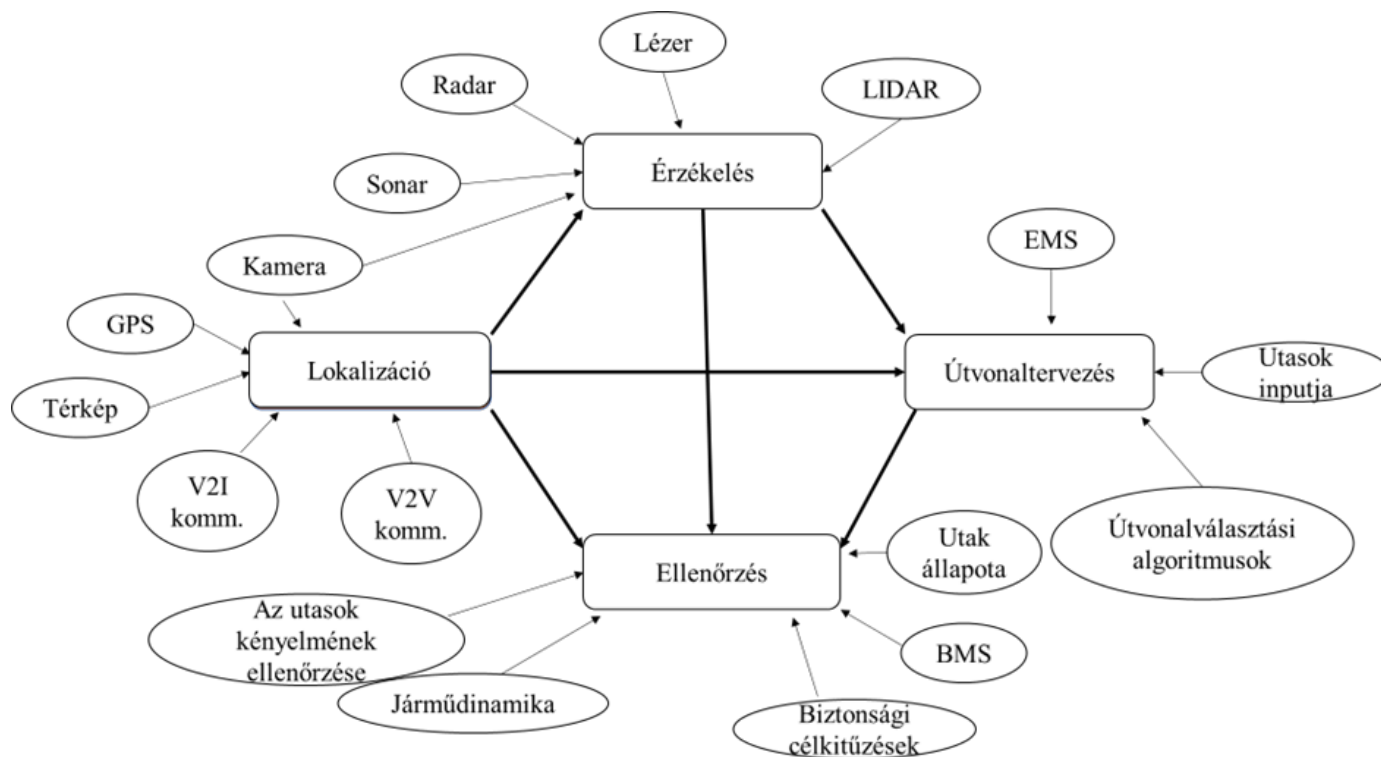
A lehetséges alkalmazások a dinamikus és erősen koncentrált platooningtól, valamint az összekapcsolt ütközés- és veszélyjelzőktől (V2V) az időjárás és útviszonyokra vonatkozó valós idejű információkon át (V2I) a gyalogosokkal közvetlenül vagy a gyalogosok mobil eszközeivel közvetetten állapotukat kommunikáló ingajáratokig terjednek (V2P) (Owens et. al, 2018; Shladover, 2018). Ezen kívül a felhasználóknak lehetőséget kell biztosítani arra, hogy helyzetüknek megfelelően zökkenőmentes legyen a mobilitásuk az indulástól az érkezésig (Boban et. al, 2017). Az 1. táblázat áttekintést nyújt a különböző csatlakozási típusokról és azok lehetséges alkalmazásairól. Ennek előfeltétele a megbízható, stabil, és ami a legfontosabb, rendkívül hatékony és gyors információ- és adatmegosztás a kommunikációs technológiák, érzékelők és hálózati kapcsolatok alapján (Maracke, 2017). Az iparág különbséget tesz a hosszú és rövid késleltetési idők között. Míg az utóbbiak elsősorban az ütközési figyelmeztetésekre, a sebességkorlátozásokra vagy a parkolási és útdíjfizetési elektronikus fizetésekre vonatkoznak, addig az előbbiek főként a hosszú utakon nyújtott infotainment és közlekedési információs szolgáltatásokhoz kapcsolódnak. Ezen adatok megosztására különböző vezeték nélküli kommunikációs technológiák használhatók (Shladover, 2018).

Jelenleg még teljesen bizonytalan, hogy az automatizált vezetési rendszerekkel összefüggésben melyik kommunikációs technológia fog érvényesülni: míg az Európai Bizottság a hibrid kommunikációs technológiák alkalmazásával a kiegészítő kommunikációs kombináció gondolatát követi, az USA-ban a National Highway Traffic Safety Administration az ITS-G5 szabványra vonatkozó jogszabálytervezetben egyetlen (kis hatótávolságú) kommunikációs technológiát részesít előnyben (Sänn et al., 2017). A járművek összeköttetésének növekvő fontossága miatt a biztonság és az adatvédelem követelményei is egyre magasabbak (Lemmer, 2015). Minden csatlakoztatott jármű jelentős mennyiségű, gyakran érzékeny adatot és információt gyűjt a mozgásmintákról, a személyes utazási szokásokról vagy a pénzügyi tranzakciókról, amelyeket nemcsak tárolni, hanem elemezni és biztosítani is kell. Biztonsági szabványok nélkül minél automatizáltabbá válnak a CAV-ok, annál sebezhetőbbek lesznek a külső támadásokkal és a meghibásodásokkal szemben (Seider– Schmitz, 2017). A jármű és a jármű közötti, illetve a jármű és a gyártó szerverei közötti kommunikációt illetően ezért biztosítani kell a hackertámadások elleni megfelelő védelmet és garantálni kell az adatok sértetlenségét. Ezen kívül elengedhetetlen, hogy a rendszereket ne lehessen egyszerűen leállítani szolgáltatásmegtagadó támadásokkal (Ritz, 2018). Végső soron a kapcsolat tárgya – különösen a felhasználói elfogadottság fényében – szorosan kapcsolódik az adatvédelem és a kibertámadások elleni védelem biztosításához (Seider– Schmitz, 2017).

Az összekapcsolt autonóm járművek funkcionális összetevői

Gaber és szerzőtársai (2021) alapján a CAV négy funkcionális összetevőből áll. Minden funkciónak több bemenete van különböző érzékelőkből. A funkcionális algoritmus a kapcsolódó érzékelőktől veszi a bemenetet, elvégzi az érzékelőfűzítést, és több kimenetet biztosít a kapcsolódó funkcionális blokkok számára. A 3. ábra egy CAV működési diagramját mutatja be a kapcsolódó bemenetekkel. A következőkben az egyes szakaszokat fogjuk részletesen bemutatni (Gaber et al., 2021):

1. **Lokalizáció:** a feladat a tényleges helyzet ismerete bármely vezetési állapotban. Ezen funkció elvégzéséhez a CAV a fedélzeti globális helymeghatározó rendszeréből veszi a bemenetet, a telematikai szolgáltatásból (térkép), a jármű-infrastruktúra (V2I) és a jármű-jármű (V2V) kapcsolatból számítja ki az aktuális helyzetét. A 3. ábra egy CAV lokalizációs folyamatát mutatja be. Számos fejlett lokalizációs algoritmus olvasható a szakirodalomban. Ezeket szimultán lokalizációnak és leképezésnek (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) nevezik.
2. **Érzékelés:** a felismerés, az osztályozás és a virtuális 3D-s képalkotás kombinált feladata. Ebben a szakaszban a CAV-ot számos fedélzeti érzékelő, például elosztott kamerák, RADAR, LIDAR, LASER, SONAR stb. segíti. Ezen kívül a lokalizáció kimenete is felhasználásra kerül ebben a szakaszban.
3. **Útvonaltervezési funkció:** három különálló funkcióból áll: küldetéstervezés, viselkedéstervezés és mozgástervezés. Az egyes funkciók tipikus feladata a következőképpen körvonalazódik:
 - A küldetéstervező (vagy útvonaltervező): magas szintű döntés, mint például a felvételi célpontok és az utak kiválasztása a célfeladat elérése érdekében.
 - A viselkedéstervező (vagy döntéshozó): dinamikus ad-hoc döntések, például sávváltás, kereszteződésekbe való behajtás, előzés stb.
 - A mozgástervező (vagy helyi tervezés): ütközésselkerülés, akadályelkerülés, riasztás stb.
4. **Ellenőrzés:** A CAV vezérlési funkciói összetettek. Ebben a szakaszban jelen vannak a lokalizációs, észlelési és útvonaltervezési folyamatból származó bemenetek mellett az útviszonyokat, az utasok és a járművezető viselkedését és kényelmét figyelő érzékelők bemenetei is, járműdinamika, energiagazdálkodási rendszerek stb. Az információ ezen forrásokból lehetővé teszi a pálya generálását és követését, az útvonalkövetést, sebességszabályozást, kooperatív irányítást a szakaszoláshoz stb.



3. ábra A CAV-ok funkcionális összetevői

Forrás: Gaber et al. (2021) alapján saját szerkesztés

Összegzés

Az összekapcsolt autonóm járművek jelentőségének megértése a közlekedési ágazatban alapvető fontosságú. Ha nem tisztázzuk pontosan, hogy mit értünk az „összekapcsolt autonóm járművek” kifejezés alatt, akkor nehéz lesz megérteni a technológiai megoldások és a fejlesztések jelentőségét és hatásait. Emellett, ha nem értjük a technológiai alapokat és a lehetséges alkalmazásokat, akkor nehezen tudunk megfelelően felkészülni az összekapcsolt autonóm járművek által felvetett kihívásokra és lehetőségekre. Ezért vállalkoztunk arra, hogy tanulmányunkban körüljárjuk a „connected and autonomous vehicle” fogalmakat, hogy a lehető legteljesebb képet kapjunk ezen technológia mibenlétéről, várható hatásairól és lehetőségeiről a közlekedési ágazatban.

Egy másik fontos aspektusa a fogalmak megértésének, hogy a technológiai megoldások és fejlesztések szabályozása és biztonsági kérdései is fontosak. Az autonóm járművek és azok összekapcsolódása nagy mennyiségű adatot igényel a járművek és az infrastruktúra közötti kommunikációhoz, és ennek adatainak megfelelő kezelése és védelme kritikus jelentőségű a közlekedés biztonsága szempontjából. Emellett szabályozói keretrendszerre van szükség a közlekedési rendszerben történő bevezetéséhez és alkalmazásához.

Az összekapcsolt önvezető járművek fogalmának megértése az innovációs folyamatokban való részvételre is ösztönözhet bennünket, és lehetővé teheti, hogy előrejelzéseket és tervek készítsünk az ágazat jövőjéről. Az összekapcsolt autonóm járművek megjelenése és terjedése a közlekedési ágazatban nagy lehetőségeket tartogat, beleértve az energiahatékonyság növelését, a közlekedési dugók csökkentését, az úthálózat és az infrastruktúra optimalizálását és a közlekedés biztonságának javítását. A technológiai innovációk azonban mindig kérdéseket és kihívásokat is felvetnek, és ezekre a kérdésekre és kihívásokra csak akkor tudunk hatékony válaszokat adni, ha tisztában vagyunk az összekapcsolt önvezető járművek mibenlétével.

Felhasznált irodalom

- Bimraw, Keshav (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. In Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO, ISBN 978-989-758-122-9; ISSN 2184-2809, SciTePress, pages 191-198. DOI: 10.5220/0005540501910198
- Boban, Mate et al. (2017): Use Cases, Requirements, and Design Considerations for 5G V2X. Ithaca, NY. <https://arxiv.org/pdf/1712.01754> (utolsó hozzáférés: 2023.02.20)
- Chehri, Abdellah – Mouftah, Hussein T. (2021): Localization for Vehicular Ad Hoc Network and Autonomous Vehicles, Are We Done Yet?, in: Mouftah, Hussein T. – Erol-Kantarci, Melike – Sorour, Sameh (Eds.). (2020). Connected and Autonomous Vehicles in Smart Cities (1st ed.), CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429329401> (utolsó hozzáférés: 2023.02.16)
- Cohen, Tom et al. (2020): A constructive role for social science in the development of automated vehicles. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100133.
- Csizmadia Zoltán – Rechnitzer János (2021) (szerk.): Az önvezető járművek világa. Társadalmi hatások és kihívások. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- EC (2018): Europe on the Move. Sustainable Mobility for Europe: safe, connected, and clean. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission, Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal>. (utolsó hozzáférés: 2023.02.20)
- Gaber, Hossam – Othman, Ahmed M. – Fahad, Abul Hasan (2021): Future of connected autonomous vehicles in smart cities. Solving Urban Infrastructure Problems Using Smart City Technologies, pp. 599-611, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816816-5.00027-9> (utolsó hozzáférés: 2023.02.16)
- Guanetti, Jacopo – Kim, Yeojun – Borrelli, Francesco (2018): Control of connected and automated vehicles: state of the art and future challenges. *Annual reviews in control*, 45, 18-40. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.011> (utolsó hozzáférés: 2023.02.16)
- ITF (2015): Automated and Autonomous Driving: Regulation under Uncertainty. International Transport Forum Policy Papers, No. 7. OECD Publishing, Párizs. <https://doi.org/10.1787/5jlwzdfk640> (utolsó hozzáférés: 2023.02.19)
- Ivus, Maryna – Kirk, Barrie – Taillon, Peter J. (2020): Advances in connected & autonomous vehicles. Information and Communications Technology Council and CAVCOE, Canada.
- Jiang, Like – Chen, Haibo – Chen, Zhiyang (2022): City readiness for connected and autonomous vehicles: A multi-stakeholder and multi-criteria analysis through analytic hierarchy process. *Transport policy*, 128, 13-24.
- Kagermann, Henning (2017): Die Mobilitätswende: Die Zukunft der Mobilität ist elektrisch, vernetzt und automatisiert, in: Hildebrandt, Alexandra – Landhäußer, Werner (eds.): CSR und Digitalisierung: der digitale Wandel als Chance und Herausforderung für Wirtschaft und Gesellschaft, 357-371.
- Kovács Dávid (2018): Az Önvezető autók fejlődése - Konceptiótól az aszfaltig. IGN Hungary, Budapest. Az önvezető autók fejlődése (ign.com) (utolsó hozzáférés: 2023.02.18.)
- Lee, Dasom – Hess, David J. (2020): Regulations for on-road testing of connected and automated vehicles: Assessing the potential for global safety harmonization. *Transportation Research Part A*, 136, 85-98.
- Lemmer, Karsten (2015): Neue autoMobilität: Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft. Acatech, Munich.
- Lukovics Miklós et al. (2018): Az önvezető autók és a felelősségteljes innováció. *Közgazdasági Szemle*, 65(9), 949-974.
- Maracke, Catharina (2017): Autonomes Fahren – ein Einblick in die rechtlichen Rahmenbedingungen. *Wirtschaftsinformatik & Management*, 3/2017, 62-68.
- Miller, James (2020) „Futurama: An Immersive Experience of America's Automotive Future,” *Journal of Motorsport Culture & History*: Vol. 1: Iss. 1, Article 6. Available at: <https://scholars.unh.edu/jmotorsportculturehistory/vol1/iss1/>
- Mitteregger, Mathias et al. (2019): Shared, Automated, Electric: the Fiscal Effects of the “Holy Trinity”. Proceedings of the 24th REAL CORP, International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society, Karlsruhe.
- Mitteregger, Mathias et al. (2022): Avenue 21. Connected and Automated driving: prospects for urban Europe. Springer, Berlin.
- Nikitas, Alexandros – Parkinson, Simon – Vallati, Mauro (2022): The deceitful Connected and Autonomous Vehicle: Defining the concept, contextualising its dimensions and proposing mitigation policies. *Transport Policy*, 122, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.04.011> (utolsó hozzáférés: 2023.02.16.)
- Niroumand, Ramin et al. (2020): Joint optimization of vehicle-group trajectory and signal timing: Introducing the white phase for mixed-autonomy traffic stream. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 116, 102659. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102659>
- Owens, Justin M. et al. (2018): “Reducing Conflict Between Vulnerable Road Users and Automated Vehicles”, in: Meyer, Gereon – Beiker, Sven (eds.): Road Vehicle Automation 4. Lecture Notes in Mobility. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60934-8_7 (utolsó hozzáférés: 2023.02.20.)
- Perret, Fabienne et al. (2017): Einsatz automatisierter Fahrzeuge im Alltag – Denkbare Anwendungen und Effekte in der Schweiz. EBP, Basler Fonds, Zurich.
- PSC (2017): Planning for Connected and Automated Vehicles. Public Sector Consultants and Center for Automotive Research, Lansing, USA.
- Rios-Torres, Jacqueline – Malikopoulos, Andreas A. (2016): A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(5), 1066-1077. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2600504> (utolsó hozzáférés: 2023.02.16.)
- Ritz, Johannes (2018): Mobilitätswende – autonome Autos erobern unsere Straßen. Ressourcenverbrauch, Ökonomie und Sicherheit. Springer, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-20953-7-> (utolsó hozzáférés: 2023.02.20.)

- Rebalski, Ella et al. (2022): Too much pressure? Driving and restraining forces and pressures relating to the state of connected and autonomous vehicles in cities. *Transportation research interdisciplinary perspectives*, 13, 100507.
- Sänn, Alexander – Richter, Stefan – Fraunholz, Christian K. (2017): Car-to-X als Basis organisationaler Transformation und neuer Mobilitätsdienstleistungen. *Wirtschaftsinformatik & Management*, 5/2017, 60–71.
- Seider, Christian – Schmitz, Peter (2017): Security-Prognosen 2018: Cyber-Sicherheit für das vernetzte Auto. www.security-insider.de/cyber-sicherheit-fuer-das-vernetzte-auto-a-671961 (utolsó hozzáférés:2023.02.18.)
- Shepard, Erika et al. (2022): Opportunities and Challenges for Deploying Connected and Automated Vehicles to Address Transportation Disparities in Urban Areas. *JL & Mobility*, 1.
- Shladover, Steven E. (2018): Practical Challenges to Deploying Highly Automated Vehicles. Presentation at Drive Sweden. Göteborg.
- Sjafrie, Hanky (2019): *Introduction to self-driving vehicle technology*. Chapman&Hall, London.
- TWT (2021): *History of Autonomous Cars. - The noteworthy evolution of self-driving cars. Tomorrow's World Today*, New York.
- Vaidya, Binod – Mouftah, Hussein T. (2021): Deploying Wireless Charging Systems for Connected and Autonomous Electric Vehicles, in: Mouftah, Hussein T. – Erol-Kantarci, Melike – Sorour, Sameh (Eds.), (2020). *Connected and Autonomous Vehicles in Smart Cities*, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429329401> (utolsó hozzáférés: 2023.02.16.)

Esettanulmány Izraelből: drónok ellenőrzött légtérben

Beküldve: 2022.12.21.
Elfogadva: 2023.03.24.
Online közzététel: 2023.12.18.



 **HORVÁTH GÁBOR** (MSc), főtiszt, Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztály, horvath.gabor3@hm.gov.hu

Kivonat: Az Izraeli Polgári Légiközlekedési Hatóság által a Hermes 900 Starliner pilóta nélküli légi jármű rendszer (UAS) számára kiadott típusalkalmassági tanúsítvány birtokában a világon elsőként Izrael légtérben közlekedhet térben és időben egy ellenőrzött légtérben belül hagyományos légi jármű és drón. Jelen tanulmányban az idáig vezető folyamatok bemutatására és elemzésére kerül sor azzal a céllal, hogy érdemben elősegítse a pilóta nélküli állami légi járművek magyar légtérbe történő integrációjával összefüggő neuralgikus pontok beazonosítását, valamint az azok felszámolásához szükséges javaslatok előkészítését.

Kulcsszavak: drón, légtérintegráció, drónszabályozás, Izrael, Elbit

Case study from Israel: drones in controlled airspace

Abstract: For the first time ever, the Civil Aviation Authority of the State of Israel has issued a type certification for Hermes 900 Starliner, an Unmanned Aircraft System (UAS) approving it to fly in a controlled airspace without any drone-specific restriction. This study aims to present and analyze the events leading to this milestone in order to identify the neuralgic points related to the integration of state UAS into Hungarian airspace structure with the intention of articulating substantive proposals.

Keywords: drone, airspace integration, drone regulation, Israel, Elbit

„I saw two clear technical developments relating to [...] unmanned aerial devices that changed my worldview: accuracy and cost.”

Iftach Spector (Loud and Clear, 2009)

Motiváció

A tanulmány elkészítésének motivációja több forrásból ered. Elsősorban azt kell hangsúlyoznom, hogy a Közel-Kelet legforróbb régiója már régóta a szakmai érdeklődésem fókuszpontjában van, mivel a modernkori Izrael gyakorlatilag folyamatosan – vagyis már több, mint hét évtizede – háborúban áll vagy háborúra készül, és így katonai értelemben számtalan hasznos információval gazdagodhat az, aki figyelmesen kutat. Ennek eredményeként került látóterembe egy 2022. évben napvilágot látott hír, amely szerint az Izraeli Polgári Légiközlekedési Hatóság (CAAI – Civil Aviation Authority of Israel) típusalkalmassági tanúsítványt állított ki a Hermes 900 Starliner pilóta nélküli légi jármű rendszer (UAS – Unmanned Aviation System) számára és ezzel lényegében integrált egy UAS-t az izraeli légtérstruktúrába, egyben a világon elsőként lehetővé tette egy drón ellenőrzött légtérben (CA – Controlled Airspace) történő szabályozott repülését (Ahronheim, 2022).

Ezzel párhuzamban szintén meg kell említenem, hogy a védelmi infrastruktúra fejlesztésében érintett döntéshozók 2022. évi nyilatkozata alapján (Huszák, 2022; Bányász, 2022) Magyarország katonai drónképessége megújulás előtt áll és a tárgykörben hamarosan megjelenhet egy átfogó stratégiai elképzelés is. Jelen sorok írásakor ennek a tartalmára vonatkozóan csak találgathatok, de a médiában közzétett információk alapján (László, 2022) – a Magyar Honvédség kötelékében jelenleg legfejlettebb UAS-nak tekinthető SkylarkTM 3 mellett – jelentős képességnövekedést eredményező MALE (Medium-Altitude, Long-Endurance – közepes magasságú és hosszú időtartamban végzett műveletekre képes) kategóriájú drónok rendszerbe állítása is prognosztizálható. Helytálló prognózis esetén – az infrastrukturális beruházások és az operatív állomány képzése mellett – elengedhetlenné válik az aktuális jogszabályi környezet bizonyos mértékű reformja is annak érdekében, hogy a MALE képességgel rendelkező pilóta nélküli légi jármű-rendszerek alkalmazásában rejlő potenciál akár különleges jogrend bevezetése nélkül is

kihasználható legyen. Ez az izraeli esettanulmány azonban hibás prognózis esetén is gyakorlatban hasznosítható információkat szolgáltat, amellyel kapcsolatban elég csak a Magyarországgal katonai szövetséget ápoló államok MALE / HALE (High-Altitude, Long-Endurance – nagy magasságú és időtartamban végzett műveletekre képes) UAS eszközeinek hazai légtérigénybevételére gondolnunk, mivel az ezekre a repülésekre vonatkozó rugalmasabb feltételek magyar MALE képesség nélkül is javíthatják hazánk védelmét.

A kutatásaimat mintegy megsegítve 2022 nyarán alkalmam nyílt egy izraeli tanulmányúton részt venni, amelynek során megismertem a helyi légtér szerkezet felépítését és a régióra jellemző légiforgalom sajátosságait, valamint a CAAI kollégáinak köszönhetően megismerhettem a pilóta nélküli légijármű-rendszerek ottani típusalkalmassági eljárásait. Jelen tanulmányban a teljes rendszerszemlélet kialakítása érdekében először felvázolom az izraeli légiközlekedés aktuális helyzetét, ezt követően drónspecifikus szempontból ismertetem az iparági perspektívákat, majd az összefoglalást megelőzően párhuzamot vonok a relevánsnak ítélt magyar vonatkozásokkal.

Az izraeli légiközlekedés

Az izraeli légiközlekedésből három kulcsszereplőt kell kiemelni: a már említett CAAI-t, az Izraeli Repülőtéri Hatóságot (IAA – Israel Airports Authority) és az Izraeli Légierőt (IAF – Israeli Air Force)¹. A polgári hatóságok felügyeletét a közlekedési miniszter, a légierő felügyeletét a védelmi miniszter látja el, és ennek megfelelően a kulcsszereplők feladatrendszerei között csak minimális átfedések jelentkeznek. A CAAI felelős az ICAO (International Civil Aviation Organization – Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) előírásoknak megfelelő polgári légiközlekedés nemzeti szabályozásáért, ezen belül is a légialkalmasság tárgyköréért. Ezen túlmenően az IAA hatáskörébe tartozik a polgári repülőterek, valamint a katonai repülőtereken nyújtott polgári szolgáltatások felügyelete, ezzel együtt a polgári légiforgalmi szolgáltatások nemzetközi megfelelőségét is ez a hatóság garantálja. Mindezek mellett az izraeli légiközlekedés legszámottevőbb szereplője, egyben az ország véderejének egyik legfontosabb pillére, a légtér szuverenitását garantáló IAF, amely kiterjedt feladatrendszerének eredményeként egyszerre tekinthető légtérfelhasználónak, valamint légiforgalmi, léginavigációs és repülőtéri szolgáltatónak.

Jogszabályi áttekintés

Általános értelemben kijelenthető, hogy a polgári légiközlekedési tárgykörök vonatkozásában Izrael az angolszász jogrendszer pragmatikus alapjaira építkezik, és ennek megfelelően nem csak az ICAO, de az Amerikai Egyesült Államok Szövetségi Légügyi Hivatala (FAA – Federal Aviation Administration) által kiadott ajánlásokat is részben vagy egészben implementálja. Utóbbi partnerség szabályozásban tetten érhető központi szerepét támasztja alá az a tény is, hogy az izraeli légiközlekedési iparág egyik legjelentősebb szereplőjének számító Israel Aerospace Industries (IAI) 1950-1985 között teljes egészében az FAA által alkalmazott tanúsítási eljárások alapján folytatta légijármű-tervezési és -gyártási tevékenységét. Az ezt követő időszakban megkezdődött az a napjainkig tartó folyamat, amelynek keretében megreformálták az izraeli légiközlekedés jogi keretrendszerét. Ennek egyik mérföldköve a 2011-ben napvilágot látott új légiközlekedésről szóló törvény, ami – számos egyéb érdeme mellett – megteremtette az Izrael feletti légtér korábbinál rugalmasabb átrepülésének lehetőségét².

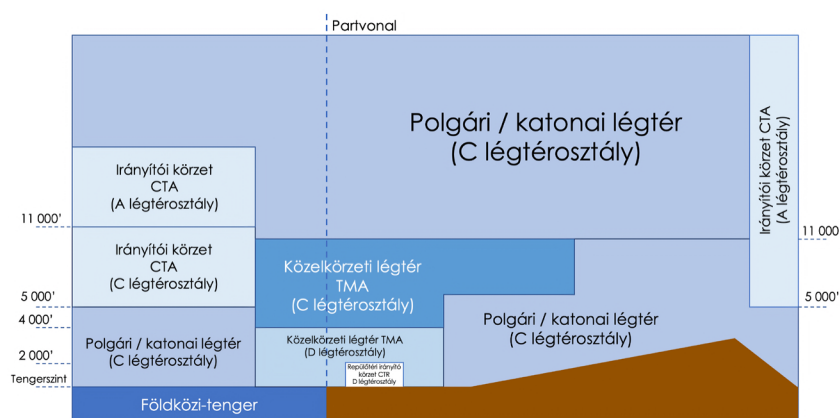
További előrelépésként értékelhető, hogy Izrael és az Európai Unió 2020-ban aláírta a Nyitott Égbolt Egyezményt (Ahren, 2020), ami közvetve hozzájárult a nemzetközi versenyhelyzet érdemi javulásához, és így számos légitársaság izraeli desztinációjának létesítéséhez. Az egyezmény aláírásának további fontos hozadéka, hogy Izrael évente kiadja az európai légiközlekedési harmonizációs folyamatokat keretrendszerbe foglaló és közlő Local Single Sky Implementation Plan (LSSIP) dokumentumot és ezáltal korábban nem, vagy csak nehezen hozzáférhető információkat tesz közzé az izraeli légiközlekedésről, ami egyértelmű szimbóluma a régióban zajló normalizációs folyamatoknak.

¹ Local Single Sky Implementation Plan Israel (2021) – Implementation Overview

² Aviation Law (Israel), 5771-2011.

Légiforgalmi áttekintés

Öt szomszédos ország légiforgalmi tájékoztató körzete (FIR – Flight Information Region) található Tel-Aviv FIR körül, amelyen belül az 1. ábrán látható felosztás szerint – ICAO előírásoknak megfelelő – A, C, D osztályú ellenőrzött és egyetlen, kisméretű G osztályú nem ellenőrzött légtérsztály került kijelölésre³.



1. ábra Tel-Aviv FIR-ben kijelölt légtérsztályok

Forrás: LSSIP Israel (2022)

Ezen belül Izrael legfontosabb légikikötője – az állami tulajdonban levő – Tel-avivi Ben Gurion Nemzetközi Repülőtér (ICAO kód: LLBG), amely egyben az El Al, az Arkia és az Isair nemzeti légitársaságok bázisrepülőtere is. Ennél a bekezdésnél érdemes hangsúlyozni, hogy Izrael legnagyobb léginavigációs szolgáltatója az IAF, de ezalól kivételt képez LLBG, amelynek esetében az IAA felügyelete alá tartozó polgári légiforgalmi irányítók – két elkülönített közelkörzeti szektorban – nyújtanak szolgáltatást. Ezen a két légtéren kívül a Tel-avivi körzeti irányító központból (ACC – Area Control Center) menedzselte további négy, nagy magasságban található szektorban biztosítják a polgári légiforgalmi irányítók a légi járművek biztonságos, gyors és hatékony áramlását.

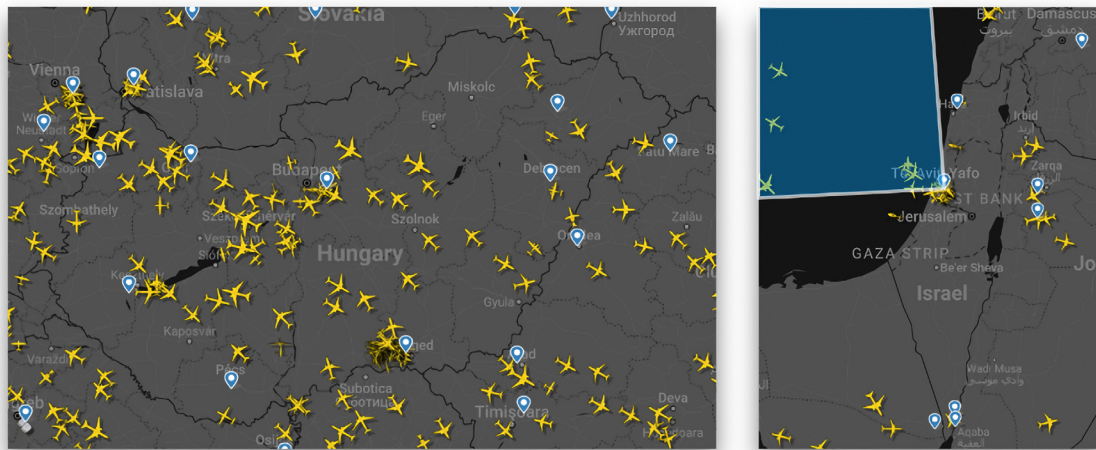
Politikai áttekintés

Önmagában a jogszabályi és a légiforgalmi áttekintés akár arra is engedhet következtetni, hogy Izrael inkább hasonlít az európai vagy az Észak-amerikai légiközlekedési sajátosságokhoz, minthogy eltérjen azoktól. Egy ilyen következtetés bizonyos mértékben helytálló, mivel a regionális légiközlekedés konszolidációja valóban elindult, de ennek a folyamatnak az érdemi értékeléséhez elengedhetetlen – a történelmi hagyatékra építkező – (aktuál) politikai áttekintés.

Az Egyesült Nemzetek Szervezetének Közgyűlése által kiadott 181. számú határozattal létrejött a modern kori Izrael állama és ezzel elindult a napjainkig tartó arab-izraeli konfliktusok lavinája, amelynek keretében összesen eddig hat háborúra került sor. A felek közötti ellenségeskedés elkerülhetetlenül nyomot hagyott az Izrael felett elhelyezkedő légtér struktúrájában is, ami a közelmúltig alapvetően csak zsákutcának volt tekinthető, mivel az országgal határos, illetve számos további arab állam⁴ általában nem, vagy csak időszakosan és elenyésző mértékben bonyolítja le a térségben GAT (General Air Traffic – általános légiforgalom) szabályoknak megfelelő repülést. Ezt a légi-zsákutca helyzetet hivatott vizualizálni a 2. ábra, amelyen – jobb oldalt – jól látható, ahogy a polgári légiforgalom alapvetően Tel-Aviv régiójában koncentrálódva Nyugatról, illetve onnan vissza Nyugatra áramlik. A sok szempontból abszurd politikai helyzet légiközlekedésben tetten érhető lenyomatának párhuzamba állítása érdekében ugyan ezen az ábrán – bal oldalt – prezentálom a hazánk felett található free route airspace, vagyis a szabad útvonalú légtér eredményeként kialakult, Magyarországot szinte minden irányból keresztező Közép-európai légiforgalmi szituációt.

³ Aeronautical Information Publication of Israel

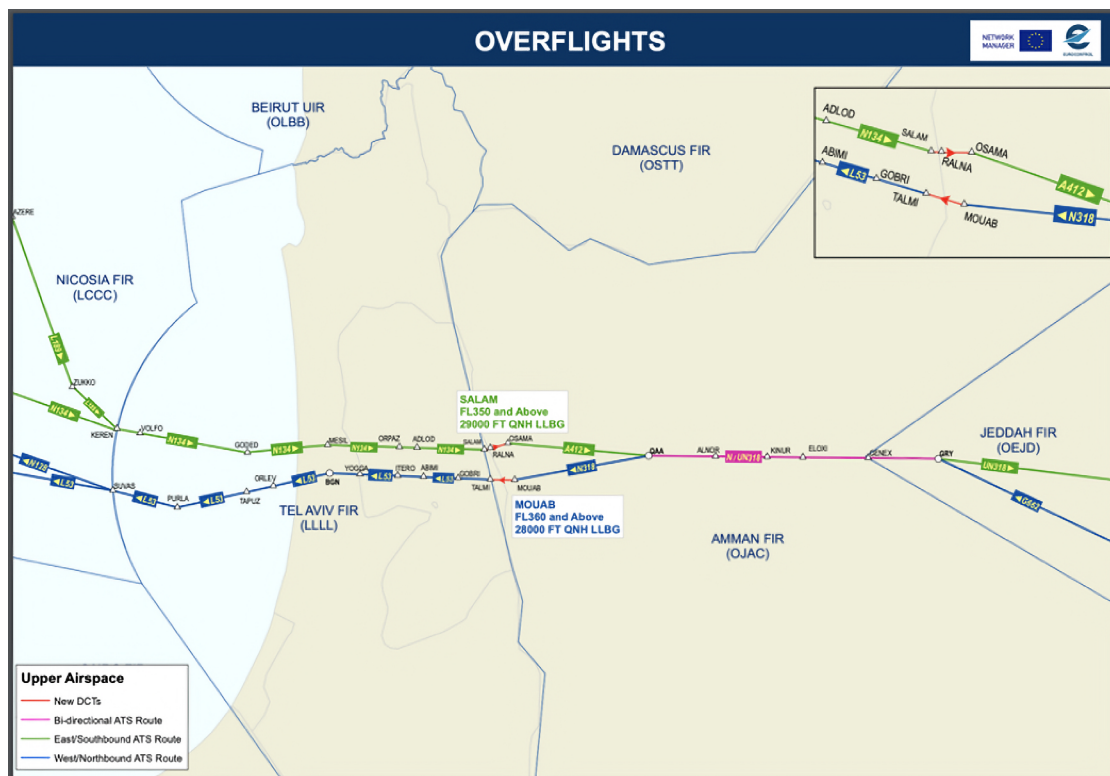
⁴ Jelen tanulmány közzétételkor a következő országok tiltják részben vagy egészben az Izraelbe áramló és / vagy az Izrael légtérét keresztező légiforgalmat: Afganisztán, Algéria, Bahrein, Banglades, Brunei, Egyesült Arab Emírségek, Irán, Irak, Kuwait, Libanon, Líbia, Malajzia, Marokkó, Omán, Pakisztán, Katar, Szomália, Saúd-Arábia, Szudán, Szíria, Tunézia és Jemen.



2. ábra A magyar free route és az izraeli légi-zsákutca

Forrás: FlightRadar24 (2022) alapján saját szerkesztés

Az említett közelmúltbeli változás egyértelműen visszavezethető az Ábrahám-egyezmény előkészítése kapcsán revitalizált arab-izraeli diplomáciai kapcsolatokra, hiszen – bár magát az egyezményt nem írta alá, de – Szaúd-Arábia egy külön szerződés keretében hozzájárult az Izrael légterét keresztező légitörlekedéshez (Siegal, 2022) és így létrejött a 3. ábrán látható Tel-Aviv FIR-t Amman FIR-rel összekötő korridor, amelynek köszönhetően egyes Európában, Közel-Keleten és Ázsiában található desztinációkkal operáló járatok repülési ideje szignifikánsan csökkent.



3. ábra Tel-Aviv FIR – Amman FIR korridor

Forrás: EUROCONTROL (2022)

Mindettől függetlenül az Izrael légterébe történő berepülés rakétatámadások közvetlen, valamint a gázai és a szíriai célpontok feletti IAF műveletek közvetett formájában számos – Nyugat-Európában és Észak-Amerikában ismeretlen – kockázatot jelent a légtérhasználók számára.

Izraeli drónstratégia

Az izraeli drónstratégia alapvetően két fő pillérre épül: a technológia polgári és állami alkalmazására. Ebben az esetben az utóbbi, vagyis az állami alkalmazás pillére nem csak nagyobb múltra tekinthet vissza, de a jelenét és a jövőjét tekintve is jelentőségtelegebbnek tűnik, ami elsősorban a drónok harcászati és hadászati célú felhasználásának eredménye. Ez azonban nem árnyékolja be a drónok polgári alkalmazása előtt álló perspektívákat sem, ami nagyban köszönhető az izraeli start-up kultúra által serkentett UTM (Unmanned Traffic Management) fejlesztéseknek.

Polgári alkalmazás pillére

Ahogy arra a korábbi fejezetekben foglaltak alapján következtetni lehet, az izraeli légtérben zajló légiforgalom szigorú keretek közé szorul és a kereskedelmi, valamint rekreációs célú repülések igényét egyértelműen felülírják az IAF szükségletei. Ettől függetlenül – a CAAI szakmai támogatása és számottevő állami dotáció mellett – számos iparági ötletet vontak az Izraeli Nemzeti Drón Kezdeményezés (INDK) ernyője alá. Jelen sorok írásakor az INDK második hullámának előkészítése zajlik, amelynek keretében összesen 60 millió sékelt fektetnek a feltörekvő piac ösztönzésébe és az arra érdemesnek talált hazai vállalkozások támogatásába (Stonor, 2022). Ezen túlmenően a CAAI a sűrű izraeli légtérben kívánja megteremteni azt a támogató jogszabályi környezetet, ami eleget tesz a légiközlekedés biztonságával és védelmével összefüggő szigorú elvárásoknak.

Az INDK első hullámából érdemes kiemelni az Urban Mobility in the Aerial Dimension projektet, amelynek során az Ayalon Highways Ltd. drón-specifikus szempontból felmérte, elemezte, majd tesztelte Izrael légterének egyes városok körüli szegmenseit. A tesztidőszak során Hadera városa felett 5 különböző cég által fejlesztett UAS mintegy 300 – leginkább logisztikai feladatokra fókuszáló – drónműveletét kezelte naponta az Ayalon Highways által fejlesztett UTM rendszer (Goldstein, 2021). A projekt technológiai szempontból működőképesnek tekinthető, mivel a megvalósíthatósággal összefüggő demonstrációs követelményeknek sikerült eleget tenni, de a költségmutatók további optimalizálásáig a kereskedelmi célú alkalmazás még várni fog magára.

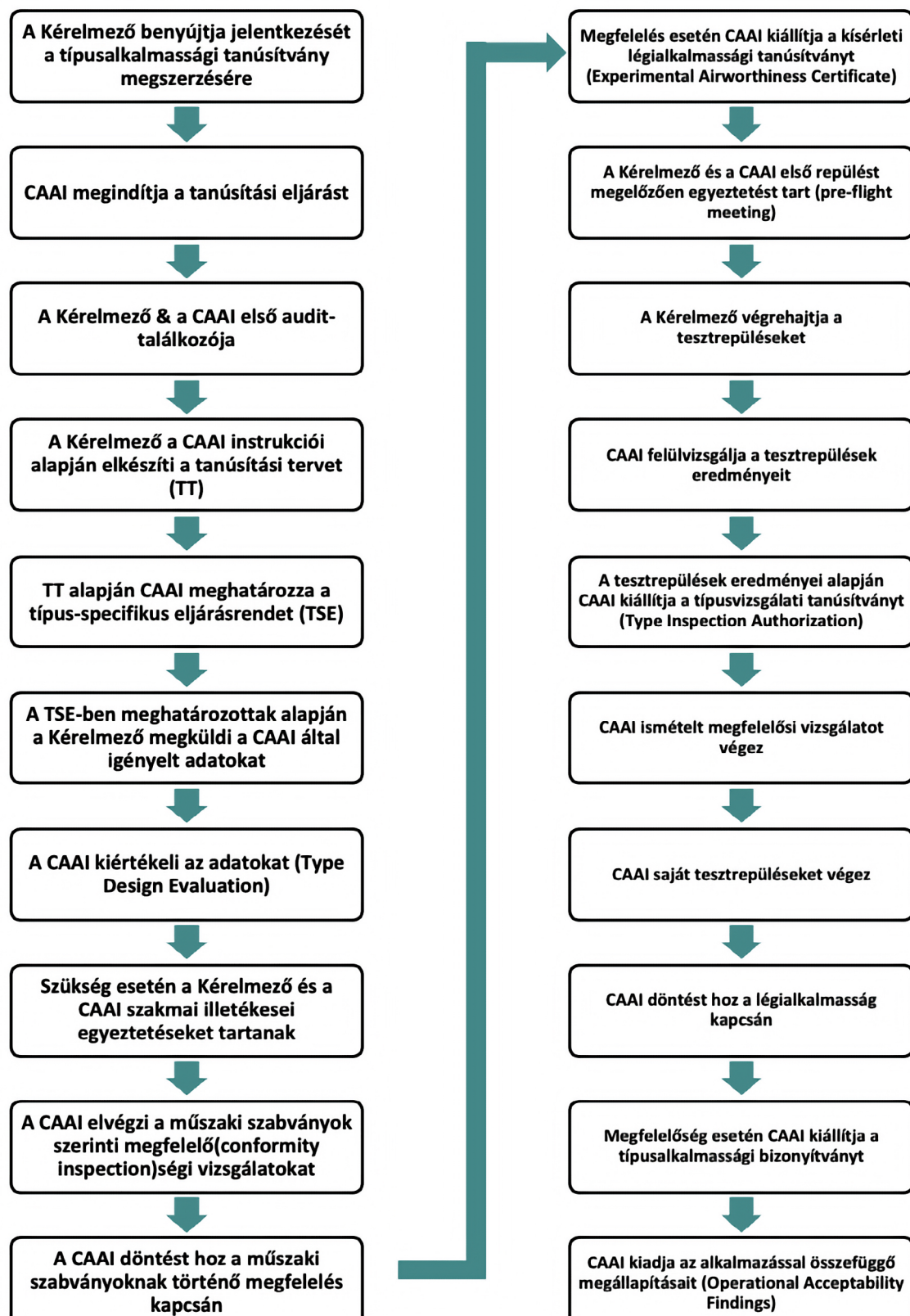
Állami alkalmazás pillére

Jelenleg az UAS technológia állami – még inkább katonai – célú alkalmazása kapcsán Izrael a világ egyik legmeghatározóbb szereplője, ami elsősorban annak a védelmi célú fejlesztésfilozófiai elvnek köszönhető, amely szerint a kiképzett katona értéke messze meghaladja a pótolható eszközökét. Ennek az elvnek az egyik korai megtestesülését láthatjuk például a Merkava harckocsi esetében is, ahol – szinte egyedülálló módon – a motor a küzdőtér előtt kapott helyett, hogy ezzel a szekunder (páncél)védelemmel is növeljék a kezelőszemélyzet túlélőképességét. A Merkava sikere láttán az Izraeli Légierő művelettervezői is újdonsült erővel kezdték kutatni az erők megóvásának innovatív lehetőségeit. Ennek eredményeként az ötödik arab-izraeli háborúban IAI Scout drónok derítették fel – majd izraeli repülőszázadok semmisítették meg – a Bekaa-völgyben telepített libanoni rejtett légvédelmi ütegeket (Grant, 2002). Ez a siker egyértelműen hozzájárult ahhoz, hogy az Amerikai Egyesült Államok idejekorán felismerte a drónok alkalmazásában rejlő katonai potenciált.

A napjainkra kiforrott UAS technológia állami-katonai alkalmazásának pillére alapvetően a hírszerzéssel, a megfigyeléssel, valamint a felderítéssel összefüggő feladatokra koncentrál és ebből a célból Izrael elsősorban a hazai fejlesztésű és gyártású Hermes 450, Searcher Mk II és Heron drónok képességeire támaszkodik (Sadot, 2016). Az izraeli drónflotta hazai fejlesztése és gyártása kapcsán több, nemzetközi piacon is sikeresnek számító céget lehet megemlíteni, de az exportmutatók alapján az IAI, valamint az Elbit Systems jelenléte a leghangsúlyosabb.

Típusalkalmassági eljárás

Ahogy azt a bevezetőben már említettem – a széles körben és hosszú ideje alkalmazott Hermes 450 alapjaira építkező – Hermes 900 Starliner pilóta nélküli légi jármű-rendszer a világon elsőként kapott a polgári hatóság eljárását követően típusalkalmassági tanúsítványt. Ennek az eseménynek a repüléstörténeti jelentősége abban rejlik, hogy a tanúsítvány birtokában a Hermes 900 UAS egy ellenőrzött légtéren belül közlekedhet hagyományos légi járművekkel. A nevezett eszköz kapcsán lefolytatott – és a bevezetőben említett tanulmány során ismertetett – tanúsítási eljárás főbb lépéseit a 4. ábra foglalja össze.



4. ábra CAAI típusalkalmassági tanúsítás eljárásrendje

Forrás: készítette a szerző CAAI (2022) beszámoló alapján

Az izraeli szakértőkkel folytatott személyes beszámolómban elhangzott, hogy a CAAI és az Elbit Systems kooperációjában elvégzett úttörőnek mondható tanúsítási eljárás összesen 6 évet vett igénybe. A befektetett idő és energia azonban megtérülni látszik, mivel a 17 m szárnyfesztávolsággal és az 1600 kg maximális felszálló tömeggel rendelkező Hermes 900 Starliner iránt komoly nemzetközi kereslet mutatkozik, a jelenlegi alkalmazók között találhatjuk – többek között – Svájcot, Kanadát és a Fülöp-szigeteket.

Magyarországi drónstratégia

A magyar drónstratégia – az izraelihez hasonlóan – két pillére támaszkodik: a technológia polgári és állami alkalmazására. Az utóbbi, vagyis az állami célú alkalmazás hazánk esetében is nagyobb múltra tekinthet vissza, illetve a bevezetésben hivatkozott nyilatkozatok alapján a közeljövő perspektívája is egészen kecsegtető. Emellett a polgári alkalmazás – allegorikus értelemben – a közelmúltban szintén szárnyakat kapott, amiben nagy szerepe van annak, hogy Magyarország is felismerte az UTM-fejlesztésekben rejlő lehetőségeket.

Polgári alkalmazás pillére

Az egykori Innovációs és Technológiai Minisztérium, a Széchenyi István Egyetem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, valamint a HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. (HC Zrt.) kezdeményezésére – több mint hatvan alapító szervezet közreműködésével – 2021-ben megalakult a Nemzeti Drón Stratégiát szakmai inputokkal ellátó Magyarországi Drón Koalíció (MDK). Ez a szervezet – az INDK által meghatározott célkitűzésekhez hasonlóan – közös szakmai platformot teremtett a jogalkotó, a kutatói szféra, a piaci szereplők, valamint a felhasználók között. Az MDK eddigi legfontosabb eredményei között található egy iparági átfogó akcióterv elkészítése, a támogató keretrendszer felvázolása, valamint a versenyképesség növekedési potenciál beazonosítása (Rohács, 2022). Ezen belül érdemes kiemelni, hogy a HC Zrt. jelenleg a hazai – és potenciálisan az európai – UTM alkalmazására vonatkozó működési koncepciót dolgozza ki annak érdekében, hogy lefedtesse a piaci igényeket kielégítő modern drónszolgáltatások alapjait.

Az MDK eredményei mellett meg kell említeni a világszinten egyedi DroneMotive kezdeményezést is, amelynek keretében egy drón kompetenciaközpont épül ki az autonóm közúti közlekedés tárgykörének kutatásában jeleskedő zalaegerszegi ZalaZONE tesztpálya szomszédságában (Justin, 2022). Ez a központ – többek között – lehetővé teszi az autonóm járművek közötti szinergiák beazonosítását, valamint az átfedésben levő problémák (p.: kommunikáció, navigáció, felderítés, konfliktus kezelés) megoldását célzó tapasztalatcserét. Ezeknek a céloknak a támogatása érdekében dedikált drón repülőterre fejlesztik Zalaegerszeg-Andráshida repülőteret, valamint az ahhoz kapcsolódó légtérstruktúrát is a feladathoz igazítják. Az itt zajló munka eredményeként a közelmúltban speciális kategóriájú drónművelési engedélyt kapott a hazai fejlesztésű, tervezésű és gyártású meteorológiai mérési feladatokat ellátó kísérleti UAS (Bottyán et al., 2022).

Állami alkalmazás pillére

Ezt a pontot célszerű egy rövid történelmi kitekintéssel kezdeni. A magyar drónok története egészen az 1960-as évekig nyúlik vissza és alapvetően céleszközök fejlesztésére koncentrálódik (Méhes, 2014). A viszonylag sikeresnek mondható program – kisebb-nagyobb megszakításokkal – napjainkban is folyik, amelynek egyik legsikeresebb produktuma a Meteor célgép-család. A Meteor program tapasztalataira építkezve a Magyar Honvédség, a Rotors & Cams Zrt. és a Genevation Aircraft Kft. égisze alatt zajlik a ProTAR légvédelmi célrepülő rendszer fejlesztése, amit méretei és képességei alapján is ambiciózus koncepciónak tekinthetünk, sikere komoly előrelépést jelenthet a hazai drónfejlesztések vonatkozásában (Farkas et al., 2022).

Az állami alkalmazás pillére kapcsán mindenféleképpen meg kell említeni, hogy Magyarországon a Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program (HHP) keretében jelenleg egy átfogó modernizációs folyamat zajlik, amelynek az a célja, hogy a Magyar Honvédség az ország függetlenségének, területi épségének, lakosságának, valamint anyagi javainak védelmére mindenkor képes, modern hadsereggé váljon. Ennek a folyamatnak újabb lendületet adott az orosz-ukrán konfliktus legfrissebb felvonása, ami megismertette az európai polgárokat a Bayraktar TB2 és a Sahíd-136 drónok nevével és pusztítóképeségével, így a laikusok számára is egyértelművé vált, hogy nincs modern haderő drónok nélkül. Ezeknek az eseményeknek a fényében vélhetően nem fog nagy meglepetést okozni, ha a Magyar Honvédség drónképesége is ugrásszerűen növekedne, mivel a védelmi célú alkalmazással összefüggő igények egyértelműen túlmutatnak a hazánkban is rendszeresített – harcászati megfigyelésre és felderítésre optimalizált – Skylark 3TM képességein.

Előrelépési lehetőségek

A pilóta nélküli légi járművekre vonatkozó hazai jogszabályok napjainkig tartó fejlődését elemezve megállapítható, hogy egyre inkább elkülönülnek a polgári és az állami célú használatra vonatkozó előírások. Ettől függetlenül jelenleg mindkét esetben megkerülhetetlennek tűnik az eseti légtér intézménye és az utóbbi, vagyis az állami célú alkalmazás vonatkozásában ez akár műveleti képességet korlátozó tényezőt is jelenthet, mivel jelen sorok írásakor egy 25 kg maximális felszálló tömeget meghaladó pilóta nélküli állami légi jármű repüléséhez mindenképpen eseti légtérrel kell kijelölni⁵. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy ha a Magyar Légierő a Hermes 900 Starliner – vagy azzal egyenértékű kategóriába eső UAS – rendszeresítése mellett döntene, akkor annak repüléséhez nem csak a polgári, de az állami repülések céljára kijelölt légtereken belül is eseti légtereket kellene kijelölni és annak folyamatos adminisztrációjáról⁶ gondoskodni. Ennek következtében egy katonai repülőtéren telepített – hazai, vagy szövetséges erők kötelékét erősítő – C, D, E kategóriába⁷ tartozó UAS repülését a polgári drónokhoz nagyon hasonló keretek közé szorítjuk, bár ezek méretüket, képességüket és céljukat tekintve nehezen összemérhetők. Mindezek alapján úgy gondolom, hogy a 25 kg maximális felszálló tömeget meghaladó pilóta nélküli állami légi járművekre vonatkozó eseti légtérigénylés kötelezettségének felülvizsgálata és érdemi újragondolása nagyságrendekkel növelheti Magyarország védelmi potenciálját, miközben a kidolgozott működési koncepció iránymutató lehet az európai légtérintegrációs kérdések vonatkozásában.

Az eseti légtérigénylés és menedzselés azonban a polgári alkalmazásban rejlő potenciált is csökkentheti, mivel a közlekedési, a logisztikai, a mezőgazdasági, a szórakoztatóipari vagy éppen a rekreációs célú drónműveletek száma évről-évre növekszik, és ezek különböző módokon támogatják a nemzetgazdaságot növelő folyamatokat. Az igények növekedésével párhuzamosan egyre nagyobb gyakorisággal lapolhatnak át egymással az egyes eseti légterek, amelyek közül egy időszakra csak egyet jelölhet ki az eljáró hatóság. Optimális esetben az ezt korlátozó tényezőt is felszámolhatja a HC Zrt. által fejlesztett, magasan automatizált UTM rendszer.

Összefoglalás

Izrael sok szempontból kitűnő példája annak, hogy miként lehet egy ország sajátos helyzetéből származó hátrányokat előnyre fordítani. Ezzel kapcsolatban érdemes megemlíteni, hogy a modern kori Izrael területe nagyjából megegyezik a Dél-Alföldi régió területével, így méretét, továbbá hosszú, keskeny alakját tekintve az izraeli légtér – magyar perspektívából vizsgálva – sok szempontból előnytelennek tekinthető. Ezt a megállapítást támasztja alá, hogy a 2019-es légiforgalmi statisztikák alapján Izrael légtérben mindössze ötöd akkora – műszeres repülési szabályoknak megfelelő – polgári forgalmat kezeltek, mint hazánk légtérében. Ennek, valamint a politikai kitérésben ismertett konfliktusok sorozatából fakadó kényszernek köszönhetően Izrael a légiközlekedés esetében is a védelmi célú fejlesztésekre helyezte a fő hangsúlyt, és így nagyon hamar felismerte a drónok alkalmazásában rejlő lehetőségeket. Az UAS technológia alkalmazására fektetett hangsúly eredményeként az izraeli légtér ma már szinte el sem lehet képzelni drónok nélkül, és az alig tíz milliós lakossággal rendelkező ország az iparág egyik vezető nagyhatalmának számít. Az elmúlt négy évtized számos repülőtörténeti jelentőséggel bíró mérföldköve közül ki kell emelnem a Hermes 900 Starliner típusalkalmassági eljárását, amelynek eredményeként nagyon komoly lépést tettünk a drónok polgári és állami célú proliferációjának irányába.

Mindezek alapján ki merem jelenteni, hogy a magyar katonai drónképesség fejlesztésének eredményei csak az illetékes jogszabályalkotók – CAAI példájára építkező – támogató szellemű jogszabályalkotásával maximálhatók, ami közvetve tovább szilárdíthatja a polgári alkalmazás pillérét is.

⁵ A magyar légtér igénybevételéről szóló 4/1998. (I. 16.) Korm. rendelet 1. § (3a) (f) alapján.

⁶ Az adminisztrációs teher számottevő, mivel az igénylés mellett minden illetékes légiforgalmi szolgáltatónak és repülőter üzemeltetőnek a véleményét ki kell kérni, továbbá a művelettel összefüggő, illetve az előírásoknak megfelelő biztonsági felmérést kell készíteni, majd ezt követően az eseti légtér maximum 7 napra jelölhető ki, így az eljárást – az igény fennálltaig – 7 naponta meg kell ismételni.

⁷ A pilóta nélküli állami légi járművek repüléséről szóló 38/2021. (II. 2.) Korm. rendelet 5-7. alapján.

Felhasznált irodalom

- Ahren Rafael (2020): EU okays landmark Israel 'Open Skies' aviation deal, despite annexation tensions. <https://www.timesofisrael.com/eu-okays-landmark-israel-open-skies-aviation-deal-despite-annexation-tensions/> (2022. november 19.)
- Ahronheim Anna (2022): Elbit's Hermes Starliner UAS certified to fly in civilian airspace. <https://www.jpost.com/business-and-innovation/tech-and-start-ups/article-696026> (2022. november 18.)
- Bányász Eszter (2022): A magyar légerő aktuális kérdései. <https://honvedelem.hu/hirek/a-magyar-legiero-aktualis-kerdesei.html> (2022. december 10.)
- Bottján Zsolt – Fekete Csaba – Gyöngyösi András Zénó – Kardos Péter – Tuba Zoltán – Vas Tímea (2022): Rutinszerű légköri vertikális profilmérések végrehajtására alkalmas drón mérőhálózat kialakítása, Közlekedés és Mobilitás 1.1. <https://doi.org/10.55348/KM.16>
- EUROCONTROL (2022): RNDSC Airspace Improvements Synopsis. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-11/eurocontrol-rais-11.20-special-israel-jordan-wef-19nov2020.pdf> (2022. december 05.)
- Farkas Csaba – Nagy Attila – Csák Attila (2022): A ProTAR légvédelmi célrepülőgép fejlesztése Magyarországon I. rész, Haditechnika, 56:3.
- Goldstein Zvika (2021): The NAAMA project – towards creating a national drone network for commercial delivery. <https://itradegov.il/poland/2021/05/04/the-naama-project-towards-creating-a-national-drone-network-for-commercial-delivery/> (2022. november 19.)
- Grant Rebecca (2022): The Bekaa Valley War. <https://www.airandspaceforces.com/article/0602bekaa/> (2022. december 05.)
- Huszák Dániel (2022): Új fejezet nyílik a magyar haderő fejlesztésében – Mire készül a kormány az ukrajnai háború árnyékában? <https://www.portfolio.hu/global/20220802/uj-fejezet-nyilik-a-magyar-hadero-fejleszteseben-mire-keszul-a-kormany-az-ukrajnai-haboru-arnyekaban-559127> (2022. december 04.)
- Izraeli Polgári Légiközlekedési Hatóság tanulmányút során megtartott előadása (2022). https://uninkeh.hu-my.sharepoint.com/:b/g/personal/horvath_gabor_uni-nke_hu/ERc5XfIdXhxBqT7ZJLWNuskBprAUTTbq7mxly-ynBMPJqA?e=6tGOJV (2022. december 19., jelszó: yFmdtT)
- Justin Viktor (2022): Drónkutató központ létesül Zalaegerszegen, a magyar jövővárosban. <https://www.agroinform.hu/gepeszet/dronkutato-kozpont-letesul-zalaegerszegen-a-magyar-jovovarosban-55585-001> (2022. december 07.)
- László Dávid (2021): Torók harci drónok mutatkoztak be Pápán. <https://magyararmzet.hu/kulfold/2021/11/torok-harci-dronok-mutatkoztak-be-papan> (2022. november 10.)
- Local Single Sky Implementation Israel (2021): Implementation Overview. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-04/eurocontrol-issip-2021-israel.pdf> (2022. november 05.)
- Méhes Lénárd (2014): A magyar fejlesztésű Meteor pilótanélküli repülőgép-család II. rész, Haditechnika, 48:4.
- Rohács Dániel (2022): Drón ökoszisztémát támogató elképzelések: Magyarországi Drón Koalíció és DroneMotive kezdeményezések. https://www.hte.hu/documents/10180/4750155/kg_y_2_220526_RohacsDaniel_MDK_DroneMotive_final.pdf (2022. december 07.)
- Sadot Uri (2016): A Perspective on Israel, Proliferated Drones, Washington (elektronikus kiadvány) <https://drones.cnas.org/wp-content/uploads/2016/05/A-Perspective-on-Israel-Proliferated-Drones.pdf> (2022. december 05.)
- Siegal Tobias (2022): In first, Israeli plane flies over Saudi airspace to non-Gulf destination. <https://www.timesofisrael.com/in-first-israeli-plane-flies-over-saudi-airspace-to-non-gulf-destination/> (2022. november 19.)
- Stonor Chris (2022): Israel: National Drone Initiative invests IL\$60 million in 10 companies for series of major trials. <https://evtolinsights.com/2022/11/israel-national-drone-initiative-invests-ils60-million-in-10-companies-for-series-of-major-trials/> (2022. november 18.)

Jelen mű

„a Kulturális és Innovációs Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

Közlekedés és a mobilkommunikáció kapcsolata

Beküldve: 2021.11.28.
Elfogadva: 2023.07.28.
Online közzététel: 2023.12.18.



- ID KÚN GERGELY OTTÓ** Tanúsítási szakértő, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Tanúsítási igazgatóság CCS Iroda, kun.gergely@kti.hu, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Híradástechnika Tanszék
- ID DR. WÜHRL TIBOR** Tanúsítási szakértő, Tudományos főmunkatárs, KTI Magyar Közlekedéstudományi és Logisztikai Intézet, Tanúsítási igazgatóság CCS Iroda, wuhrl.tibor@kti.hu, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Híradástechnika Tanszék

Kivonat: A közlekedés és a mobilkommunikáció napjainkban már elválaszthatatlan fogalmak. A két tudományterület összefonódása már több évtizeddel ezelőtt elkezdődött. A gyors információáramlás nagymértékben javíthatja a közlekedésbiztonságot, ugyanakkor az információhiány egyre nagyobb veszélyeket rejt. A közlekedés és a mobilhálózati kommunikáció professzionális összekapcsolása a második generációs mobilhálózatok korában kezdődött. Bebizonyosodott, hogy a közlekedésbiztonság növelése érdekében alkalmazott mobilrendszereknek szigorú minőségi elvárásoknak kell megfelelniük. Napjainkban és a közeljövőben a közlekedés és a mobilkommunikáció egymásba fonódása az ötödik generációs rendszerekben csúcsonyul ki.

Kulcsszavak: mobil hálózatok; közlekedés; 2G; GSM-R; 5G; KPI; Key Performance Indicators, fő minőségi mutatók

Relationship between mobile communication and transport

Abstract: Transportation and mobile communication are nowadays inseparable concepts. Merging of the two disciplines began more decades ago. The fast transmissions of information can greatly improve traffic safety, but the lack of information can cause dangerous situations. The professional interconnection of transportation and mobile network communication began in the age of 2G mobile networks. It has been proved that application of mobile systems in transportation – in order to increase the safety – requires very high levels of key performance indicators to the bearer network. Today and in the near future, the intertwining of transportation and mobile communication will be much stronger in context of 5G systems.

Keywords: mobile networks; transport; 2G; GSM-R; 5G; KPI; Key Performance Indicators

Bevezetés

Az 5G (5. generációs) mobilhálózatok rendszertechnikája és kialakítási lehetőségei sokrétű felhasználási lehetőségeket biztosíthat, de fontos kiemelni azt, hogy az 5G önmagában nem kész megoldásokat jelent, hanem lehetőségek sokaságát. A közlekedéssel való együttműködés már a második generációs (2G) hálózatokban is megjelent (GSM-R – Global System for Mobile Communications – Railways) (ETSI, 2010), ami a kötöttpályás közlekedés támogatását valósítja meg.

Információs társadalomban élünk, a világ felgyorsult, és ezzel együtt a közlekedés is. A vasúti szerelvények biztonságos, ugyanakkor nagy sebességű és pontos közlekedésének feltétele a gyors információcsere. Az Európai Vonatbefolyásoló Rendszer (European Train Control System - ETCS) (Jahnsen et al., 1997) ezt a célt igyekszik elérni, amely L2 (Layer 2) szinten kommunikációs infrastruktúraként a GSM-R rendszert használja. A GSM-R rendszer második generációs mobilhálózati szabványokon alapul, amely néhány vasútspecifikus elvárással került kiegészítésre. Az információcsere során az üzenetek általában rövidek, kis adatmennyiséget jelentenek, ugyanakkor a késleltetési időre vonatkozó követelmények szigorúak, és a fejlődéssel egyre szigorúbbakká válnak.

A mobilhálózatok fejlődése és generációváltásai (2G-4G) során a tendencia az egyre nagyobb adatátviteli sebesség elérése volt, de a technikai megoldások – és elsősorban a csomagkapcsolási elvek használata – a késleltetési idő (transfer delay) növekedését eredményezte. A végpont-végpont között kialakuló, eredő késleltetési idő több késleltetés összegéből adódik. Az egyes megoldások (például átviteltechnika) ugyan költséghatékonyak, de a minőségi mutatók tekintetében jelentős romlást okoznak.

A közcélú felhasználásban ez a késleltetési idő-emelkedés inkább csak kényelmetlenséget okoz, viszont közlekedésbiztonsági szolgáltatások szempontjából kritikus lehet. Áttörést jelenthet az ötödik generációs (5G) mobilhálózati szabványok megvalósítása, amelyekben az egyik fókuszban lévő feladat a késleltetési idők extrém alacsony szinten tartása.

A 3GPP (3rd Generation Partnership Project) által kiadott szabványok közül már a 4G LTE (Long Term Evolution) Release 13-ban, majd a Release 14-ben (2017) megjelentek a közlekedést támogató újabb generációs kommunikációs lehetőségek (V2X – Vehicle to everything) (3GPP, 2020a).

Az 5G projekt fő kiadásának a Release 16-ot tekintjük (3GPP, 2020a). A szabványcsomag egyes elemeinek kibocsátása 2020. év folyamán folyamatos volt, amelyekből a legfontosabbak a következők: Multimédia Priority Service, LAN (Local Area Network) támogatás az 5G-ben, vezetékes és vezeték nélküli technikák konvergálása az 5G-ben, terminálpozíció meghatározása, 5G műholdas hozzáférés, titkosítás, streaming szolgáltatások továbbfejlesztése, IoT alkalmazások bővítése, Vehicle-to-everything alkalmazási réteg szolgáltatásainak kialakítása és a meglévők migrálása az 5G rendszerébe.

A Release 17 (3GPP, 2020a) kiadása 2021. évben zajlott és zajlik, ami elsősorban a megvalósított alkalmazások és szolgáltatások finomításait és továbbfejlesztéseit tartalmazza:

- NR-light (New Radio Light), kis mennyiségű adat átvitel optimalizálás,
- az NR (New Radio) 52,6 GHz feletti frekvenciák használata, beleértve a licence mentes 60GHz sávot is,
- Multi SIM (Subscriber Identity Module),
- NR multicast, broadcast,
- teljesítmény optimalizálás,
- pozíciómeghatározás tökéletesítése.

5G rádiós rendszere

Az 5G RAN áttekintése

Az 5G rádiós hozzáférési hálózatának (5G RAN – Radio Access Network) főbb technológiai szabványelemei a 3GPP által kiadott Release 15-ben jelentek meg még 2019-ben (3GPP, 2020a). Ez a szabványcsomag az 5G SA (StandAlone) megoldásait tartalmazza, míg a korábbi kiadások a 4G és az 5G integrációs megoldásait, együttműködési kérdéseit tárgyalták. (NSA – Non-StandAlone).

A Release 15 az 5G számára két frekvenciatartományt (FR – Frequency Range) különböztet meg:

- FR1: 450 MHz – 7125 MHz és
- FR2: 24250 MHz – 52600 MHz.

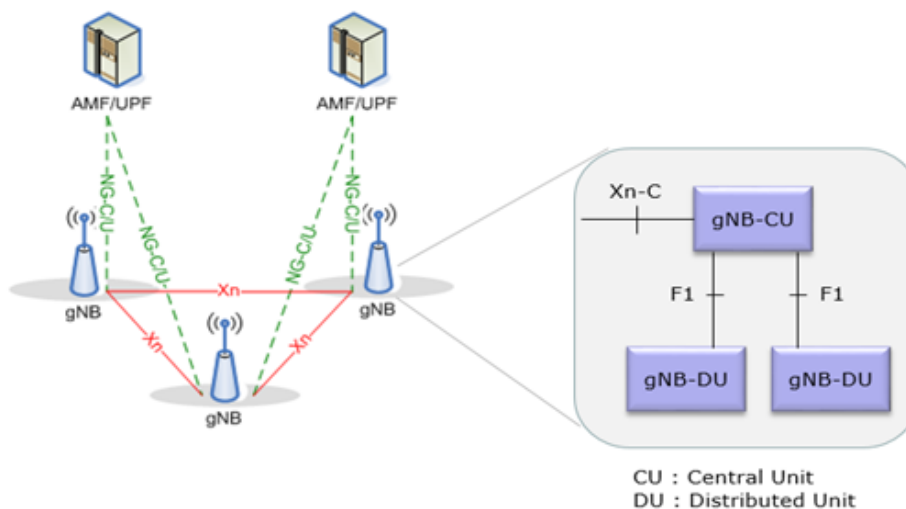
FR1-ben mind a 4G LTE, mind az 5G NR működhet Non-StandAlone módban, míg az FR2-ben csak az 5G NR lehet jelen (StandAlone).

Az FR1 sávban, főként annak alacsonyabb frekvenciájú tartományában, elsősorban nagyobb területeket lefedő makrocellák alakíthatók ki. Az ilyen cellák antenna rendszere – még 5G esetén is – elsősorban szektorsugárzókból állhatnak, bár városi környezetben még makrocellák esetén is előnyös lehet a MIMO elvet (Multiple-In Multiple-Out) kihasználó többantennás megoldások alkalmazása.

FR2 esetén milliméter nagyságrendű hullámhosszok esetén a terjedési jellemzők miatt kisméretű cellák alakíthatók ki. Ebben a tartományban működő cellákban az 5G egyedül működhet, és jellemzően MIMO alapú többantennás megoldások kerülnek implementálásra.

Architektúra változások az 5G-ben

A 3GPP az 5G RAN felépítését az 1. ábra szerint értelmezi:



1. ábra A 3GPP 5G architektúrája

Forrás: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_RAN_Architecture.html (2022.03.31)

Az 5G maghálózata az NG interfészekon keresztül csatlakozik a bázisállomásokhoz (ng-eNB – next generation evolved NodeB, gNB - next generation NodeB). Az adatátvitel a bázisállomások között közvetlenül valósul meg az Xn interfészekon. A bázisállomások közül a gNB felépítése látható az 1. ábra jobb oldalán. A 3GPP ajánlása szerint a bázisállomások két részre osztottak: elosztott, „Distributed Unit” (DU) és központi, „Centralized Unit” (CU) egységekre. A DU-k a felhasználókhöz közelebb esnek, míg a CU-k a maghálózati oldalon találhatóak, a maghálózathoz közelebb. Ezen túlmenően még Control plane – User plane funkcionális felosztás is definiált, ami alapvetően a vezérlést és a felhasználói funkciókat különíti el. Az egyes blokkok között, a szabvány értelmében, szintén definiált interfészek találhatóak, melyek az ábra alapján az F1 (F1-U és F1-C) és az E1 (RF Wireless World, 2021).

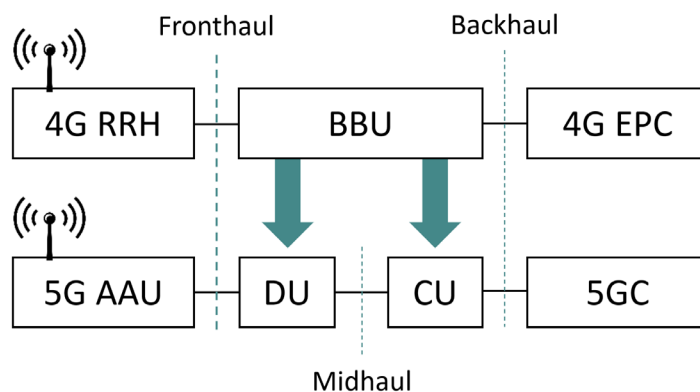
Hálózati operátorok hatására az 5G RAN struktúra határozottan a nyitottság felé halad. A „nyitottságot” elsősorban a hálózat operátorok támogatják, de egyes gyártók is részben vagy egészben kiállnak ezen irányvonal mellett. Az openRAN model (RCR Wireless News, 2020) értelmében az összekapcsolt eszközök és hálózat építő elemek - gyártótól függetlenül - kompatibilisek egymással. Ez úgy lehetséges, hogy a 3GPP által definiált interfészekon túl további interfészek szabványosítása is megtörténik.

5G RAN split

Az 5G-hez ajánlott architektúrák között az openRAN modell (RCR Wireless News, 2020) egyre népszerűbb.

A 2. ábra felső részén a „klasszikus” 4G hozzáférési hálózati megvalósítás látható. A 4G-s RRH (Radio Remote Head) és a BBU (BaseBand Unit) között található összeköttetést megvalósító hálózatrészt Fronthaulnak hívjuk. A BBU és a maghálózat közötti hálózati kapcsolatot pedig Backhaulnak.

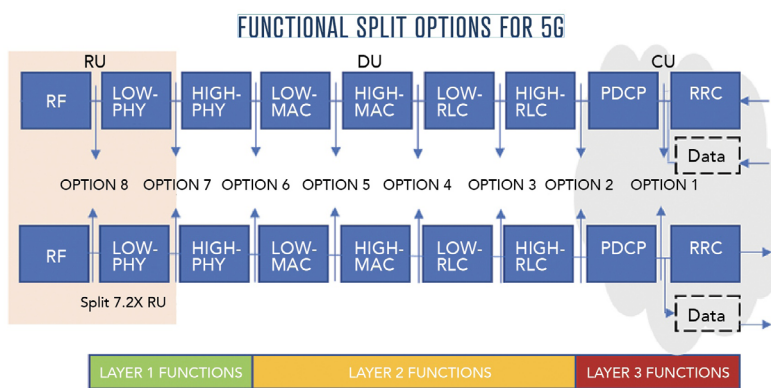
A 2. ábra alsó részén az 5G RAN struktúrákban a BBU két részre osztott, a DU (Distributed Unit) és CU (Central Unit) alkotóelemekre. Ezen alkotóelemeket az úgynevezett Midhaul hálózatrész kapcsolja össze. A Fronthaul az 5G AAU-val (Active Antenna Unit), míg a Backhaul a CU és az 5G CORE (maghálózat) között létesít kapcsolatot.



2. ábra 5G BBU felosztása DU és CU egységekre

Forrás: Saját szerkesztés

A BBU szétbontás funkcionálisan több helyen történhet meg, amelyek hatással vannak a hálózat jellemzőire (átviteli késleltetés, késleltetés ingadozás (jitter) stb.) és a minőségi mutatókra (KPI – Key Performance Indicators). A 3. ábra a RAN split funkcionális lehetőségeit szemlélteti:

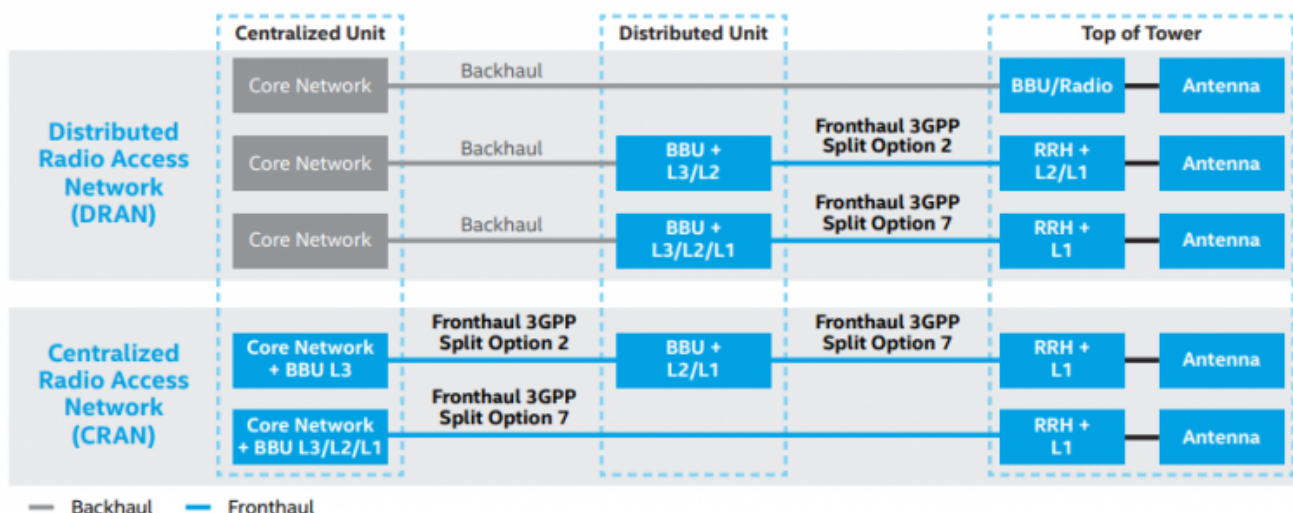


3. ábra 5G BBU funkcionális felosztási lehetőségei

Forrás: (Andersson, 2021)

A RAN split helyét az elvárt felhasználási mód fogja megadni, vagyis a kettéosztás helye hatással van a RAN hálózat minőségi mutatóira (KPI).

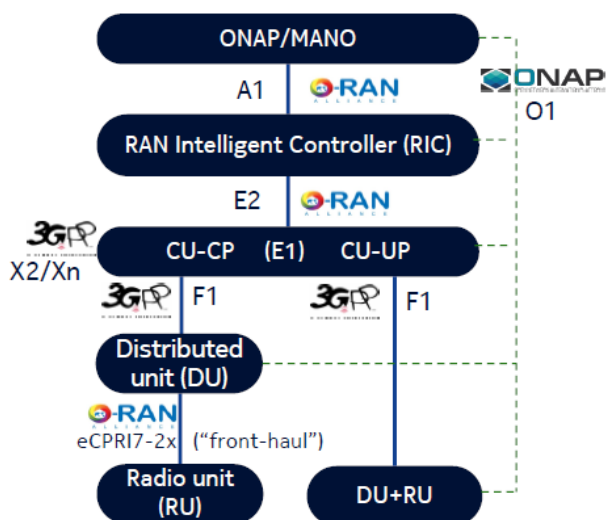
DRAN (Distributed Radio Access Network) és CRAN (Centralised Radio Access Network) esetén a 3GPP az Option2 és Option7 megoldást támogatja és szabványosította. Ennek megvalósítási lehetőségei láthatók a 4. ábrán.



4. ábra 5G BBU funkcionális felosztási lehetőségei

Forrás: (Moniem-Tech, 2021b)

Az openRAN szövetségek további interfész specifikációinak helyét az 5. ábra szemlélteti:



5. ábra Az openRAN szövetségek által definiált interfészek

Forrás: (Moniem-Tech., 2021a)

A Common Public Radio Interface (CPRI) lehetővé teszi a csomagkapcsolt adatok hatékony továbbítását és a RAN payloadok Ethernet formátumú továbbítását. Az eCPRI-t az Ericsson, Huawei, NEC és a Nokia szabványosította, de gyártói szabadságot enged meg (Nokia, 2021; Ericsson, 2021). Az eCPRI7-2x interfésszel az openRAN célja ezen eljárás teljesen nyitottá tétele.

Az O-RAN Alliance által definiált A1 interfész a hálózatmenedzsment funkciókat valósítja meg. Több protokollelem még kidolgozás alatt áll. A feladat itt a Non Real Time – RIC (RAN Intelligent Controller) és a Near-Real Time RIC összekapcsolása.

Az O-RAN Alliance E2 interfésze, mely az openRAN struktúrában biztosítja a RAN Intelligent Controller és az O-CU, O-DU és O-eNB kapcsolatát. Ezek együtt, egy úgynevezett E2-node-ot alkotnak. Az E2 interfészen kizárólag „control-plane” (vezérlő) protokollok kommunikációja zajlik. (RF Wireless World, 2021)

5G Fronthaul Timing

Az 5G hálózatok kialakításában kiemelt cél a késleltetési idő és annak ingadozásának alacsony szinten tartása. Ennek teljesülésének egyik feltétele a hálózat építőelemeinek pontos szinkronizálása. Az órajel frekvencia szinkronizálásán túl a fázishelyesség is elvárt. A szinkronizálást támogató protokollok az IEEE1588 Precision Time Protocol (PTP) és a Synchronous Ethernet (SyncE).

Berendezések szinkronizálása 5G hálózatokban

A csomagkapcsolási elv miatt a hálózat berendezéseinek nem feltétlenül kellene szinkronizáltan működni, hiszen egy hálózati építőelembe megérkező csomag a memóriában tárolást követően egy másik ütemezéssel továbbítható a szomszédos rendszerelemnek. Nagy adatmennyiséget kezelő eszközöknek a nagyméretű memóriakezelés okozhat gondot. A hálózatokban működő berendezések interfészei egyre magasabb adatátviteli sebességet tesznek lehetővé, de ez egyben azt is jelenti, hogy egységnyi idő alatt jelentős mennyiségű adat érkezik az eszközbe, amit belső memóriában tárolni kell. Az eltárolás és az onnan történő kiolvasás nagy feladatokat ró a berendezés beágyazott vezérlőjére. Egymással szinkronizálatlan eszközök esetén a belső memória kihasználása pulzáló, jitters lesz. A pillanatnyilag nagyméretűben feltöltött, esetleg túlcsoordult memória adatvesztést is eredményezhet.

A fenti negatív hatások a hálózati építőelemek precíz összeszinkronizálásával csökkenthetők. Csomagkapcsolt hálózati építő elemek hatékony szinkronizálására a Precision Time Protocol (PTP) szolgál. Az első verziójú PTP-t az IEEE 1588-2002 publikálta. A 2008 évben megjelenő második verzió nem biztosít kompatibilitást a 2002 verzióval. A 2019 évben megjelenő módosított időszinkron eljárás (IEEE 1588-2019) már felülről kompatibilis a 2008 évi verzióval (IEEE, 2019a).

Korunk hálózati elvárásait jobban kielégítő adaptáció az IEEE802.1AS szabványként (IEEE, 2019b) jelent meg, elsősorban az Audio, Video bridging és a Time-sensitive networking elvárások kielégítésére.

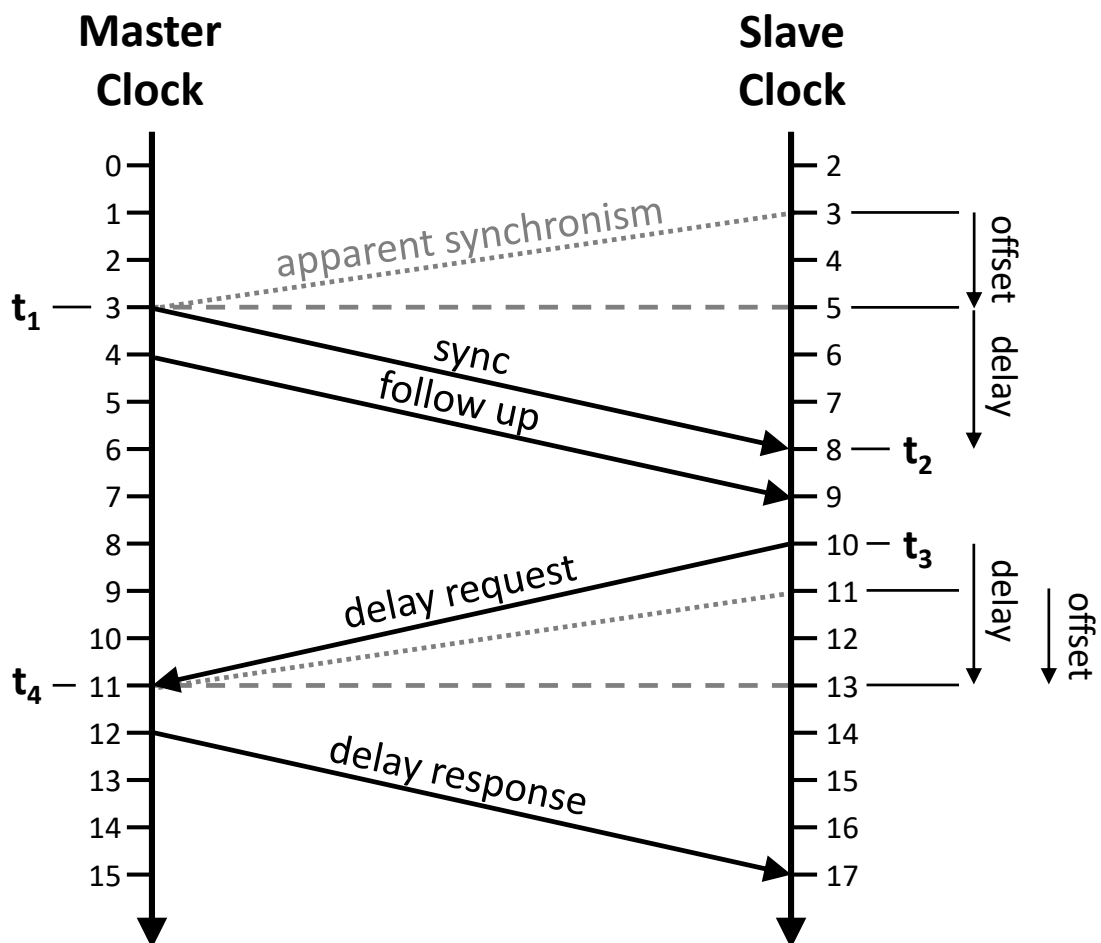
A PTP úgynevezett Master – Slave architektúrát követ, ahol a referenciát a „Grandmaster” (Root Timing Reference) adja. A szinkronizálás, és így a működés alap gondolata az, hogy a szinkronizáló üzenetekben található időbélyegek (time stamp) és az üzenet beérkezési időbélyegjei alapján az egyes eszközök órája (órajel frekvenciája, esetenként fázispontossága is) korrigálható, szinkronizálható. Az IEEE 1588v2 PTP fontosabb, szinkronizálást támogató protokoll elemei a következők:

- A Sync, Follow-up, Delay-Req, Delay-Resp üzenetekkel történik a szinkronizálás.
- A Pdelay-Req, Pdelay-Resp, Pdelay-Resp-Follow-Up a transzparens óra használja a kommunikációs médiumok késleltetésének lemérésében.

A megfelelő szinkronizált állapot eléréséhez több alapfeltételnek is teljesülnie kell, amelyek a következők:

- Feltételezzük, hogy az Ethernet interfész chip hardware támogatással pontosan tud időbélyeget (time stamp) generálni és beültetni az üzenetbe. Itt meg kell említeni, hogy az operációs rendszerekben kialakított szoftver alapú PTP is létező megoldás, de ezek kialakítását nem tárgyaljuk, mert hálózati szinkron megvalósításhoz nem biztosítanak megfelelő pontosságot.
- Feltételezzük, hogy a két összekapcsolt Ethernet alapú interfész adás és vétel átviteli ideje (transfer delay) közel azonos.
- Feltételezzük, hogy a szinkronizációs üzenetek váltásának ideje olyan kicsi, hogy ez alatt nincs lényegi órajel vándorlás.

A fenti feltételek bekövetkezése esetén a szinkronizálás folyamatát a 6. ábra szemlélteti:



6. ábra PTP szinkronizációs folyamat

Forrás: (IEEE, 2019a)

Az időtengely fentről lefelé mutatja az idő múlását. A baloldali tengely a szinkronizációt biztosító „master”, míg a jobboldali tengely a szinkronizálni kívánó „slave” eszköz óráját mutatja. A szinkronizáció során az a cél, hogy a „master” órajelhez húzzuk a „slave” eszköz órajelét. Ehhez meg kell határoznunk az órajel eltolódást, vagyis az offsetet. A szinkronizációs folyamat a „master” által küldött sync üzenet küldésével kezdődik, amely a „master” clock órája szerint a „t1” időpillanatban hagyja el az interfészt. Ezt a „t1” időt tartalmaznia kell magának a sync üzenetnek. Ez persze nem kis feladat, hiszen az interfészen kiküldendő üzenet összeállítás először az interfész memóriájában történik meg, így az időbélyeg beszúrás is, és majd ezt követően történhet a sync üzenettovábbítás.

Ezt a problémát, mint esetleges pontatlanságot a sync üzenet után küldött follow_up üzenetküldéssel van lehetőség korrigálni. A follow_up üzenet sokkal pontosabb „t1” időpillanatot tartalmazhat: a sync üzenet tényleges kiküldési idejét.

A sync üzenet a „slave” órája szerint a „t2” időpillanatban érkezik, a „master” órája szerinti „t1” pedig kiolvasható a sync follow_up időbélyegből. Nem sokkal ezt követően a „slave” órája szerinti „t3” időpillanatban a „slave” egy delay_request üzenetet küld a „master” eszköznek, ami a „master” órája szerint a „t4” időpillanatban érkezik meg. A „t3” időpillanatot a „slave” feljegyzi, de mint időbélyegnek nincs jelentősége a „master” számára, így nem áll fenn a sync üzenetnél továbbított időbélyeg probléma. A „t3” időpillanat a „master” számára nem releváns, így a delay_request üzenetet nem követi (még opcionálisan sem) follow_up.

A „master” órája szerint feljegyzett „t4” időpillanat viszont fontos a „slave” eszköz számára, ezért ezt az időt a delay_request-re adott delay_response üzenetben továbbítja a „master” a „slave”-nek.

A fenti szinkronizációs folyamat végén a „slave” számára rendelkezésre áll a „t1”, „t2”, „t3” és „t4” érték. Ezekből az időbélyegekből az (1) összefüggéssel számítható az átviteli késleltetési idő („delay”):

$$delay = \frac{(t2-t1)+(t4-t3)}{2} \quad (1)$$

A helyesen szinkronizált 5G hálózati építőelemek támogatást nyújthatnak a transfer delay és a transfer delay jitter minőségi mutató (KPI) teljesüléséhez.

MINŐSÉGI MUTATÓKKAL KAPCSOLATOS ELVÁRÁSOK

Elvárások a kötőpályás közlekedésben

A második generációs mobilhálózatok időosztásos elven működő, áramkörkapcsoláson (CS - circuit switched) alapuló rendszerek. Az adatátvitel (CSD - Circuit Switched Data) is áramkörkapcsolással valósul meg.

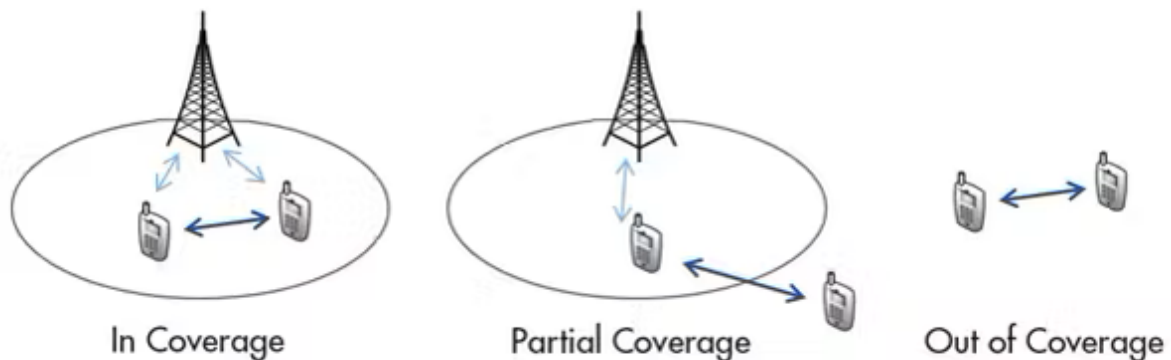
A 2G rendszer kiegészítéseként jelent meg a General Packet Radio Service (GPRS). A rádiós interfészen (2G Um) kialakított áramkörkapcsolási elv a CSD kommunikációban adatvesztést eredményez egy handover esemény során. A rövid ETCS üzenetek (tipikusan néhány száz byte méret) átvitelét támogató felsőbb rétegi protokollok gondoskodnak a hibamentes és stabil átvitelről. A szabványok kizárják a sűrű handover események, például „ping-pong handover” bekövetkezését, mivel ezek jelentősen megnövelnék az adatvesztés szintjét.

Nem kötőpályás közlekedés igénye a kommunikációs csatornával szemben

Kötőpályás közlekedés esetén az elvárás az, hogy a pályabiztosító berendezés állapotinformációi kis késleltetéssel és nagy megbízhatósággal eljussanak a jármű fedélzeti rendszerébe, valamint a jármű adatok a pályaszakaszt felügyelő számítógépbe (ETCS RBC). A hálózattal kapcsolatos minőségi mutatókat a SUBSET-093 (ERTMS, 2005) írja elő. Nem kötőpályás járművek esetében az elvárások lényegesen magasabb szintűek. A közlekedési utak eseményei rendkívül sokrétűek és nagy mennyiségben, gyorsan változóak. Ez a kommunikációs csatorna jóval kisebb késleltetését engedi meg, ami maximum 1-2 milliszekundum nagyságrendű lehet, de akár milliszekundum alatti idő is lehet az elvárás. A megbízhatónak tekinthető adatcsatorna adatátviteli sebessége is valószínűsíthetően magasabb, mint az ETCS L2 esetén megvalósuló 4800 bit/s, illetve 9600 bit/s.

A közlekedő járművek pontos helyadat információinak is rendelkezésre kell állniuk, hiszen így biztosítható egy adott jármű környezetében közlekedők számára a szükséges haladási információk halmaza. Ezeket az elvárásokat a 2G szabványelemeket megvalósító eszközök nem tudják biztosítani, viszont a 4G és főként az 5G maghálózati, valamint RAN szabványokban megvalósítható eszközök nagy valószínűséggel igen.

A 3GPP Release 12 szabványban jelent meg a sidelink fogalom (7. ábra). A szabvány támogatja az eszközök közvetlen kapcsolatát, teljesen lefedett, részben lefedett és lefedettség nélküli környezetben is: ennek megfelelően az egyes UE-k (User Equipment) adása hálózat által ütemezett módon (network directed) történhet, melyet TM1-nek nevezünk (Transmission Mode 1), míg lefedetlen esetben az UE adás véletlenszerűen indul, amelyet „Autonomously scheduled” módnak hívunk, ami a TM2 (Transmission Mode 2).



7. ábra UE-k sidelink kommunikációja

Forrás: (Barberis, 2018)

A hálózatvezérelt adás esetén (TM1) a Physical Sidelink Control Channel (PSCCH) segítségével valósulhat meg az erőforráskiosztás.

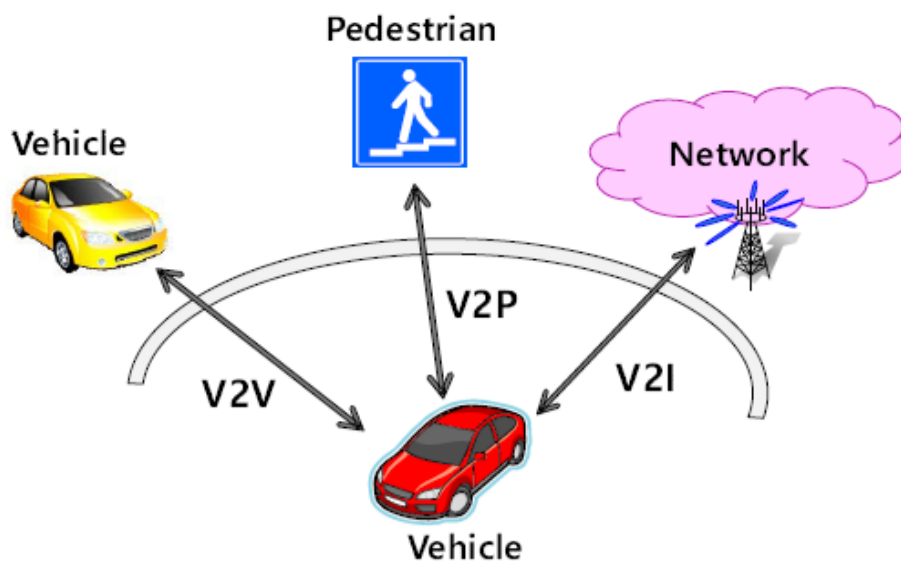
A fentiek szerint az UE-k hálózati támogatás nélkül is képesek a kommunikációra, de mivel ekkor nincs hálózati lefedés, és így hálózatvezérelt erőforrás kiosztás sincs, ezért az UE-k időben véletlenszerűen induló adásaik miatt előfordulhatnak ütközések.

V2X kommunikációs módok

Az 5G NR interfészen kialakított sidelink alapú V2X kommunikációt több csoportra bontjuk.

- V2V – Vehicle to Vehicle;
- V2I – Vehicle to Infrastructure;
- V2P – Vehicle to Pedestrian;
- V2N – Vehicle to Network.

A fenti felsorolást a 8. ábra szemlélteti:

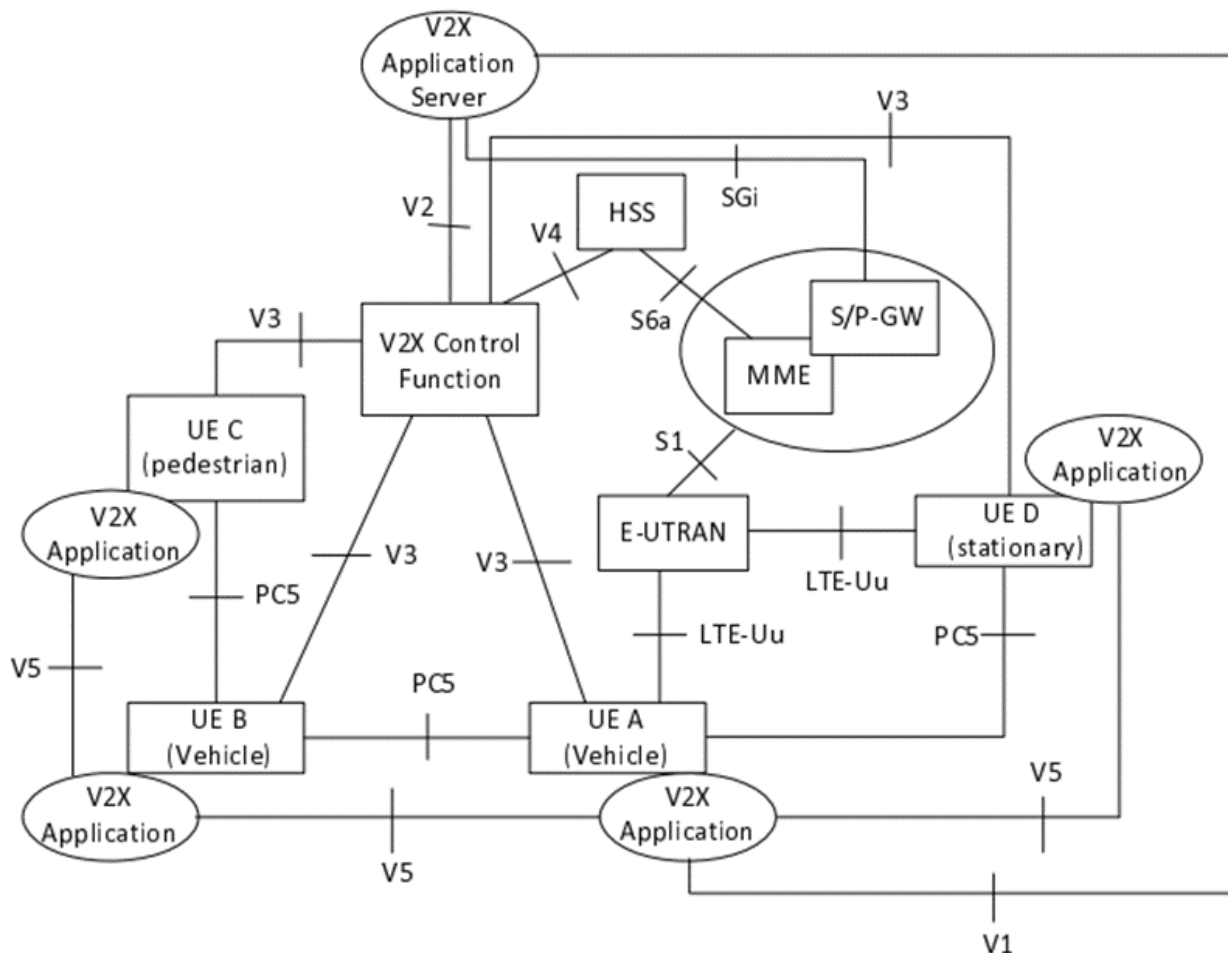


8. ábra V2X típusok (V2V, V2P és V2I)

Forrás: (ETSI, 2020)

A V2X kommunikáció rendszerét a 3GPP TR 26.985 ver 16.0.0 Release 16 szabványcsomag definiálja (3GPP, 2020b; ETSI, 2020). A kommunikációs kapcsolódást a 9. ábra szemlélteti.

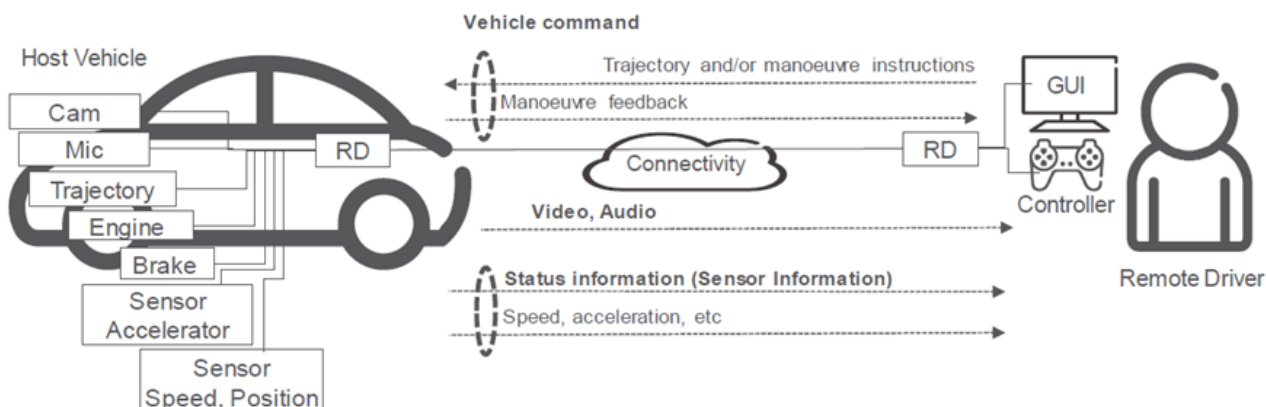
A közlekedés résztvevői a PC5 vagy az LTE-Uu interfészt használják kommunikációra. Az LTE-Uu konvencionális pont-pont vagy pont-multipont kapcsolatot képes biztosítani nagy adatátviteli sebességgel és jó QoS-sel (Quality of Service). A PC5 ugyan korlátozottabb áthidalható távolsággal, de pontosabb helymeghatározási információkkal, jelentősen kisebb késleltetési idővel és kisebb lefedettségi érzékenységgel biztosítja a kommunikációt.



9. ábra V2X kommunikáció kapcsolatainak szemléltetése

Forrás: (ETSI, 2020)

Az 5G V2X szolgáltatásai között első lépésben egy távvezetés (Remote Driving - RD) koncepció kidolgozása történt meg. Ennek a fontosabb elemeit a 10. ábra szemlélteti:



10. ábra RD koncepció

Forrás: (ETSI, 2020)

Az RD modell szerint a távvezetést végző személy a számára beérkező grafikus és audioalapú információk alapján hozza meg döntéseit és adja ki a jármű számára a manőverezési parancsokat. Már ebben a modellben is rendkívül jól látszik a késleltetési idő alacsony szinten tartásának követelménye. Az információvesztés is jelentősen korlátozott. A manőverező utasítások (fékezés, gyorsítás, fordulások – pályáiv stb.) kimaradása és információvesztése nem megengedett. Abban az esetben, ha a szállítási (OSI rétegmodell 4. rétegébe sorolt) protokoll TCP (Transmission Control Protocol), akkor a hibamentes átvitel implicit módon, újraküldéssel megvalósul, viszont UDP (User Datagram Protocol) esetén felsőbb rétegbeli protokoll szükséges ennek biztosítására. Látható, hogy a csomagvesztések és azok szükséges javítása a parancsok késleltetési időit megnövelik. Rádiós csatornán nincs ismert mód arra, hogy hibamentes átvitelt garantáljunk. Légköri zavarok, más eszközök által kiadott zavarjelek szimbólumhibát eredményezhetnek a fizikai kommunikációs csatornában. Rádiós csatornában a zavart okozó jelek jóval magasabb valószínűséggel fordulnak elő, mint a vezetett összeköttetések esetén.

A következő gondolat kísérletben egy fékezési információ (parancs) átvitelét vizsgáljuk:

A távvezető (remote driver) fékezés trigger információt kíván küldeni. A távvezérelt jármű szempontjából a letöltési irányú csatornán (downlink channel) a fékező parancs eljut a járműhöz. Ezt a parancsot nyugtázni kell a feltöltési irányú csatornán. UDP alkalmazása esetén felsőbb rétegbeli protokollal kell biztosítani az esetleges hibajavítást, TCP esetén a protokoll újraküldéssel biztosítja a hibajavítást. Adott esetben, ha a kommunikáció egyirányú késleltetésének maximális értéke 1 ms, akkor a hibamentes állapot esetén is az üzenetváltás minimum 2 ms időt igényel. Ehhez az időhöz adódik hozzá az üzenetfeldolgozási és kiértékelés idő is. Csomagvesztés esetén, a csomagvesztés ténye a vezérlő oldalon „timeout” elven történhet, vagy TCP esetén egy további üzenet küldés és annak visszaigazolás tényéből derülhet ki. Ebből látszik, és feltételezhető, hogy további néhány milliszekundum hátrányba kerülünk.

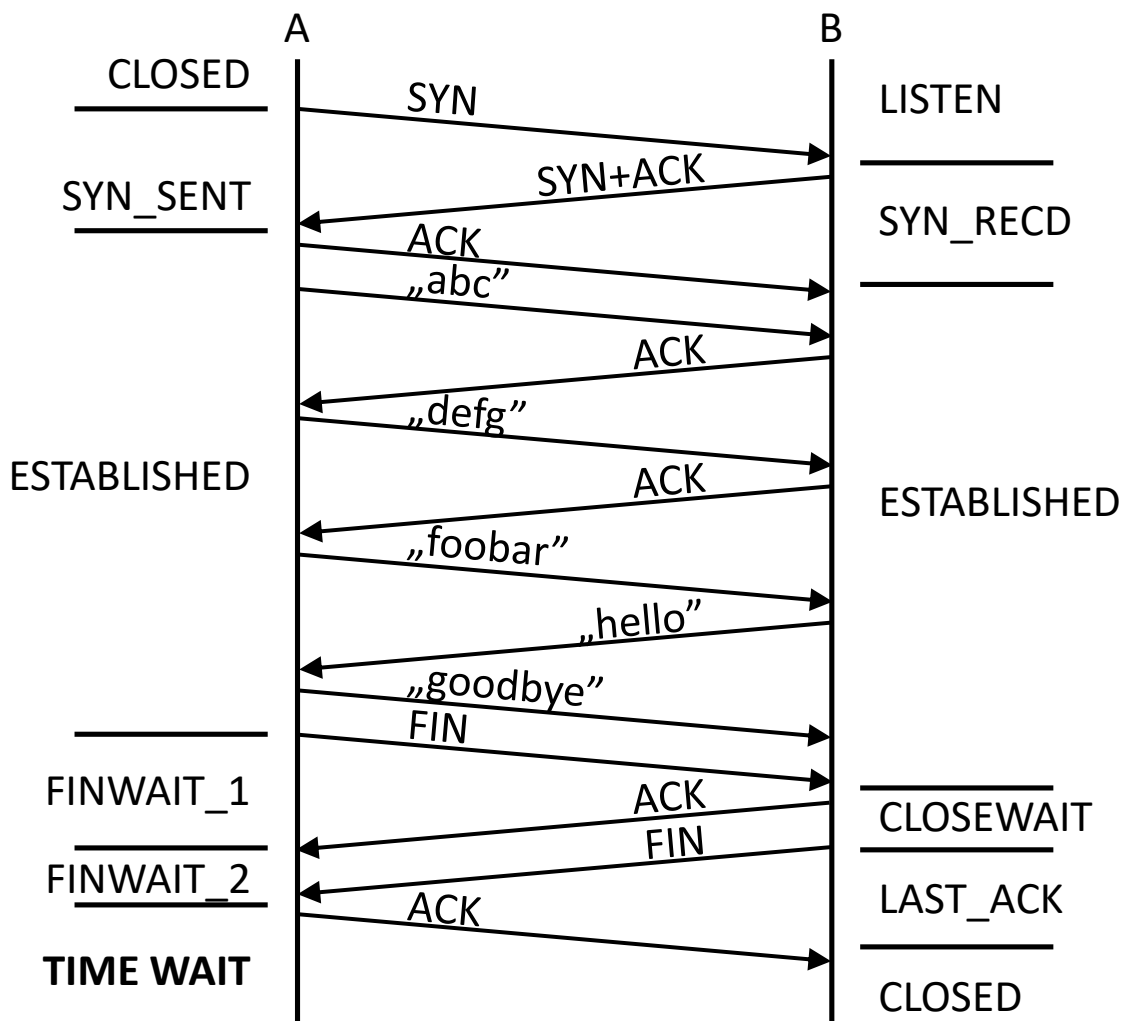
A fő kérdés az, hogy mennyi újraküldési lehetőséggel tervezhetjük a rendszert. Például 100ms maximális megengedett parancs késleltetés esetén a fenti késleltetésekkel körülbelül maximálisan 20 újraküldésünk lehetséges a hibajavításra. Ez jónak tűnik, de a hibát a rádiós interfészen valami zavar, interferencia okozhatta nagy valószínűséggel és elképzelhető, hogy ez még folyamatosan jelen is van. A csomósodó hibahelyek miatt látható, hogy nagy veszélyt rejt magában az információvesztés.

A korábbi 2G alapú közlekedésbiztonságot támogató rendszerek esetén (GSM-R alapú ETCS L2 és L3) is számoltunk kommunikációs csatorna kiesésekkel és hibacsomósodásokkal. Itt is az újraküldés és a rendkívül rövid üzenet hossz javított a kommunikáció megbízhatóságán. Teljes kommunikációs csatorna kiesés esetén definiáltak egy maximális kiesési időt (T_NVCONTACT), amely elteltével a száguldó vonatszerelvény automatikus vészfékezésbe kezd. Az ETCS vonatbefolyásoló rendszerek esetén a T_NVCONTACT értéke 30 másodperc, amely Magyarországon, szigorítva, 18 másodperc.

A távvezetés (RD) és önvezető járművek fontos érzékelői közé tartoznak a videokamerák, radarok, lidarok és audio események detektálására alkalmas mikrofonok. Ezen eszközök időben és halmazon folytonos analóg jelet biztosítanak, amelyek jelét időben és halmazon diszkréttevé digitális jelfolyammá alakítjuk azokat. A mintavételezésnél Shannon mintavételi tételét be kell tartanunk, ellenkező esetben a jel spektrum átlapolódásával, az úgynevezett aliasing jelenséggel szembesülhetünk. Az egyes mérési minták „n” bites számként ábrázolva alkotják a digitális jelfolyam egyes mintáit. Ezeket keretbe kell szervezni a küldés előtt. Az információátvitel késleltetését a hálózati késleltetési időn túl a mintavételi frekvencia és az egy keretben összefogott mintaszám fogja meghatározni. A kis késleltetési idő elvárás akkor teljesülhet, ha viszonylag kis mintaszám kerül továbbításra egy információegységben, vagyis egy csomagban. Ennek a hátránya az, hogy egy információegység hasznos információtartalma és ehhez viszonyított adatátviteli protokoll fejlécadat (overhead) hosszaránya rossz értéket fog mutatni. A helyes arány a tényleges felhasználási elvárások számadatai alapján kalkulálhatók.

A streamelt adatfolyamok esetén általában némi információvesztés elfogadott lehet, vagyis, ha néhány információegység kiesik, akkor azok hiánya digitális jelfeldolgozó algoritmusokkal pótolhatók.

A járművek több, a közlekedés során dinamikusan változó fizikai jellemzők mérésére szolgáló szenzorral is felszereltek. Tipikusan ilyen szenzorok a gyorsulásérzékelők, sebességmérők, pozíciómeghatározók stb. Ezen szenzoradatok is folyamatos jelfolyam kommunikációs adatok lehetnek. Az adatfolyam ekkor konstans bitstreamnek tekinthető, a hibajavítás többnyire nélkülözhetetlen. A konstans bitfolyam hatás miatt a kommunikációs csomagok ütemezetten közlekednek a kommunikációs hálózatban, így a visszairányú nyugtázás is ehhez szinkronizált lesz.



11. ábra TCP kapcsolat létrehozása, majd kommunikáció és bontás

Forrás: (Dordal, 2021)

Egy TCP viszony esetén (11. ábra) a hármas kézfogást (szinkronizációt) követően a nyugtázás (ACK) is egy jelnyelvnek tekinthető, így a kimaradt, vagy elveszett csomagok gyorsan detektálhatókká válnak, így az automatikus újraküldés is megtörténhet.

Láthatjuk, hogy a késve érkező információ és a meg nem érkezett információ úgynevezett információhiányt eredményez.

Fentiekből látszik, hogy a közlekedésbiztonság szavatolása rádiós összeköttetésen nem valósulhat meg teljeskörűen, ezért ezeket a rendszereket inkább közlekedésbiztonságot támogató rendszereknek kell tekintenünk. Ez azt jelenti, hogy a kommunikációs csatorna kiesést minden esetben egy „vérszorgatókönyv” szerint kezelni kell, vagyis nem maradhat elvarratlan szál.

Az 5G rendszerekben a csatornakiállításoknál már a fizikai közeg hozzáféréseinél is igyekszünk javítani a rendelkezésre állást.

Következtetések

Jelenleg a közlekedés és a mobilkommunikáció együttműködése mindennapivá vált. A jelenleg kialakuló 5G hálózatok számos ponton nyújtanak és fognak nyújtani közlekedéssel kapcsolatos szolgáltatásokat. Ezen alkalmazások tekintetében a hálózat által teljesített minőségi mutatóknak kiemelt szerepük van, a hálózat fejlesztésekor a paraméterek kívánt szintjeinek elérése alapvető fontosságú. A biztonságos közlekedést támogató alkalmazások kiszolgálására az 5G hálózatok képességei már jelenleg is alkalmasak, de a biztonságkritikus forgalmak továbbítása – a rádiós csatorna kiszámíthatatlanságai miatt – még jelentős kihívások elé állítja a fejlesztőket.

Felhasznált irodalom

- 3GPP (2020): The Mobile Broadband standard, 3GPP Releases, <https://www.3gpp.org/specifications/releases> (2022.03.31.)
- 3GPP (2020): TR-26.985, Vehicle-to-everything (V2X); Media handling and interaction, Technical report (TR), 6. o.
- O. Andersson (2021.05.17): Functional Splits: the foundation of an Open 5G RAN, Benetel, <https://www.5gtechnologyworld.com/functional-splits-the-foundation-of-an-open-5g-ran/> (2022.03.31.)
- M. Barberis (2018): Sidelink and V2X Modeling and Simulation with LTE Toolbox, MathWorks, 3. o.
- P. L. Dordal (2021): An Introduction to Computer Networks, TCP transport. pp 5. <http://intronetworks.cs.luc.edu/html/tcp.html> (2022.03.31.)
- Ericsson (2021): Mobile radio access networks and 5G evolution, 5-7. o.
- ERTMS (2005): GSM-R Interfaces; Class 1 Requirements, SUBSET-093
- ETSI (2010.06): Railways Telecommunications (RT); Global System for Mobile communications (GSM); Detailed requirements for GSM operation on Railways, Technical Specification, ETSI TS 102 281 V2.1.0. 5-6. o.
- ETSI (2020.11): TR 126 985 V16.0.0. 11-12. o.
- IEEE SA (2019): IEEE 1588-2019, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, ISBN:978-1-5044-6341-6
- IEEE SA (2019), P802.1AS-Rev, Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications, ISBN:978-1-5044-6430-7
- A. Janhsen – K. Lemmer – B. Ptok – E.Schnieder (1997): Formal Specifications of the European Train Control System, in IFAC Proceedings Volumes, 1139-1144. o.
- Moniem-Tech. (2021.03.14) : How does O-RAN Alliance Open Telecom Interfaces? <https://moniem-tech.com/2021/03/14/how-does-o-ran-alliance-open-telecom-interfaces/> (2022.03.31.)
- Moniem-Tech (2021.04.05): Functional Split Options for 5G Networks, <https://moniem-tech.com/2021/04/05/functional-split-options-for-5g-networks/> (2022.03.31.)
- Nokia (2021), NDAC network overview, Nokia Digital Automation Cloud, 10-12. o.
- RCR Wireless News (2020.07.08): Open RAN 101–RU, DU, CU, RCR Wireless News, https://www.rcrwireless.com/20200708/open_ran/open-ran-101-ru-du-cu-reader-forum (2022.03.31.)
- RF Wireless World (2021): 5G NR network interfaces-Xn,NG,E1,F1,F2 interface types in 5G, <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/5G-NR-network-interfaces.html> (2022.03.31.)