

Magasan automatizált és autonóm járművek tesztelésének módszertana a tesztpálya és az ahhoz kapcsolódó szimulációs technológiák szempontjából

Tézisfüzet

Szerző:
Tóth Bálint

Témavezető:
Dr. Szalay Zsolt

Vállalati szakértő:
Finszter Ferenc



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kandó Kálmán Doktori Iskola
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Gépjárműtechnológia Tanszék

2025

1. Bevezetés

Az 2010-es évek második felétől kezdve egészen napjainkig – az elmúlt közel 10 évben – jelentős változások zajlottak és zajlanak jelenleg is az autópárhban, amelyek hatása a társadalomra nézve is megkérdőjelezhetetlen. Az elektromos járművek és az azokba is integrálható okos eszközök terjedése mellett számos új fontos vezetéstámogató rendszer jelent meg és vált kötelezővé jelentősen növelve a közlekedésbiztonságot, illetve az önvezető járművek jelentősebb térnyerése is várható, köszönhetően annak, hogy már küszöbön vannak az ilyen járművek jóváhagyását és forgalomba helyezését elősegítő előírások, rendeletek, törvények és nemzetközi szabályozások. Habár jelentős előrelépések történtek ez utóbbi területen, de alapvetően kimondható, hogy az önvezető járművek számára, a működési feltételeik bonyolultságából kifolyólag, még mindig nincsenek egységes tesztelési és jóváhagyási eljárások, amelyek elősegítenék a nagyobb számban történő elterjedésüket, különösen Európában.

A kutatásommal és a dolgozatom megírásával, melynek címe a „*Magasan automatizált és autonóm járművek tesztelésének módszertana a tesztpálya és az ahhoz kapcsolódó szimulációs technológiák szempontjából*” ehhez a területhez szeretnék hozzájárulni, bízva abban, hogy az általam kifejlesztett módszerek és eljárások segítséget nyújthatnak a jövő járműveinek vizsgálati és jóváhagyási folyamataiban.

Jelen munka a doktori disszertációhoz kapcsolódó tézisfüzet, amelyben röviden bemutatom a kutatás kapcsolódó háttérét, az általam kidolgozott téziseket, továbbá a jövőbeni kutatási terveimet.

1.1. Témaválasztás

2016-ban kormánydöntés született egy magyar járműipari tesztpálya létrehozásáról, amelynek helyszínéül végül Zalaegerszegre esett a választás. Mivel Zalaegerszeg vonzáskörzetéből származom, ezért számomra kiemelt jelentőséggel bírt, hogy a már induló projekt korai szakaszában bekapcsolódhattam a ZalaZONE létrehozását célzó munkába. Így 2017-től kezdve lehetőségem volt számos tesztpályával összefüggő kutatás-fejlesztési projektben történő részvételre is, melyeknek köszönhetően közelebbről megismerkedhettem az fejlett vezetéstámogató rendszerek (Advanced Driver Assistance Systems – ADAS), valamint az automatizált vezetési rendszerek (Automated Driving System – ADS), azaz az önvezető járművek tesztelésével kapcsolatban megjelenő kihívásokkal. A tesztpályán alkalmazott szimulációs szoftverek segítségével elkezdhettem vizsgálni a különböző tesztelési eljárásokat, továbbá a Scenario-in-the-Loop

(SciL) koncepció megalkotásában is szerepet vállalhattam [P1]. Ez ösztönzött arra, hogy mérnöki feladataimat 2019-től tudományos vonalon is folytassam, így kezdtem el kutatni a címben megfogalmazott témát a doktori képzés keretein belül.

A teszt pályán végzett munkámat 2020 májusa óta a TÜV Rheinland-KTI Kft-nél folytattam, ahol elsődleges feladatomban a ZalaZONE-on létesített telephely kiépítése és az ott zajló projektek koordinációja volt. Ezen feladatok elvégzése során közelebről is megismerkedhettem a járművek engedélyezési és jóváhagyási folyamataival, és meggyőződhettem arról, hogy a kutatási témám ipari szempontból is releváns lehet. Erre kitűnő lehetőséget nyújtott a Kooperatív Doktori Program (KDP-2021)¹, melynek keretén belül a vállalat és az egyetem együttműködésében a kutatási munkám összehangolhattam a mindennapi feladataimmal, abból a célból, hogy a kutatások eredményeit közvetlenül a munkám során is felhasználhassam. Legtöbb esetben ugyanis az új előírások és tesztelési eljárások megalkotása is tudományos kutatások, mérési sorozatok eredményeire épül, továbbá külön munkacsoportok foglalkoznak ezzel pl. az ENSZ-en vagy az EU-n belül is.

Ennek eredményeképp a kutatásom fókuszja áthelyeződött a járművek típusjóváhagyási és egyéb független szervezetek által bonyolított tesztelési eljárásaira, amelynek során több fontos nyitott kérdést is azonosítottam. Különösen a tekintetben, hogy a különböző ADAS és ADS funkciók tesztelése rendkívül bonyolult és költséges, ezért érdemes lehet olyan eljárásokat fejleszteni, amelyekkel akár szimulációs módszereket is segítségül hívva, különösen a hivatalos jóváhagyási vizsgálatokat megelőző funkcionális validációt célzó tesztek effektívebbé tehető. Továbbá, ahogy a bevezetésben már említettem, az önvezető járművek számára továbbra sincsenek még nemzetközileg egységes tesztelési és jóváhagyási eljárások, így ezek megkönnyítésére is érdemes lehet további, egységesebb módszereket kidolgozni.

Ezek fényében végeztem a kutatásom és készítettem el a disszertációm, melyben próbáltam ötvözni mind az egyetemen megszerzett tudományos ismereteket mind pedig az ezzel párhuzamosan végzett mindennapi ipari munkámból nyert tapasztalatokat.

¹ Ez a doktori kutatás a C1781139 azonosítójú pályázathoz kapcsolódóan a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

1.2. Célkitűzések

Az önvezető járművek egységes tesztelési és jóváhagyási eljárásainak hiánya megnehezíti az ilyen járművek forgalomba helyezését. Habár léteznek olyan országok, ahol rugalmasabb szabályozások érhetők el (pl. USA, Kína), de már ezen országok esetén is megfigyelhető a szabályok folyamatos szigorítása. Az Európai Unióban (EU) jellemzően a típusjóváhagyás (angolul: type approval) gyakorlatát követik, amely egy olyan eljárás, melynek során a közlekedési hatóság igazolja, hogy egy jármű, rendszer, alkatrész vagy önálló műszaki egység megfelel a vonatkozó jogi szabályozások eljárási szabályainak és műszaki követelményeinek. Vele megegyező fogalom a homologizáció (angolul: homologation). Azon országok közül, ahol tehát ez az eljárás jellemző (EU tagjain kívül, pl. Japán, Ausztrália stb.), néhány országban már van lehetőség az önvezető járművek forgalomba helyezésére (pl. Németország [1]), de ezek a szabályozások is jellemzően elég bonyolultak és nehéz eljutni általuk a forgalomba helyezésig. A legtöbb európai országban (pl. hazánkban is) inkább jobban elterjedt, hogy közúti tesztelésre lehet engedélyt szerezni. Magyarországon jelenleg ezt az úgynevezett KöHÉM rendeletek szabályozzák, amelyeket 2017-2018 időszakban egészítették ki ennek lehetőségével [2][3].

A legtöbb esetben sem az üzemeltetési sem pedig a tesztelési célú közúti használatot megelőzően nincsenek egységes eljárások, amelyek segítségével egy járművet nagy biztonsággal ki lehetne engedni a közúti forgalomban. A feltételek EU tagországoként esetről-esetre változhatnak. Így az egyik célom az volt, hogy olyan tesztpályán végezhető tesztelési eljárást dolgozzak ki az önvezető járművek forgalomba helyezését megkönnyítendő, amely az iparban elfogadott és kipróbált tesztesetekre épít, de mégis rugalmasan illeszkedhet a különböző érettségű önvezető funkciókhoz.

További célom volt az ADAS funkciókkal összefüggő típusjóváhagyási vizsgálatok sikerességének elősegítése az azokat megelőző funkcionális validációs módszerek kidolgozásával. A legtöbbször ugyanis a hivatalos eljárás során derülnek ki olyan hibák vagy hiányosságok, amelyek miatt a jármű nem kaphatja meg a jóváhagyást az adott funkcióra. Így az újabb fejlesztési majd jóváhagyási ismétlő tesztek jelentős költségeket és idővesztéseket generálhatnak. Ezzel összefüggésben olyan komplex tesztszenáriók megalkotása volt a célom, amelyek segítségével megkönnyíthetem a fejlett vezetéstámogató rendszerek típusjóváhagyását megelőző funkcionális validációs vizsgálatokat, elősegítve, hogy a gyártók és beszállítók a hivatalos vizsgálatok előtt egyszerűsített tesztelési eljárások segítségével kapjanak átfogóbb képet az általuk fejlesztett funkciók érettségéről.

Célkitűzéseim között szerepelt azt is, hogy megvizsgáljam, milyen módon lenne felhasználható a SciL koncepció a járművek típusjóváahagyási vizsgálataiban. Mivel alapvetően a virtuális módszerek használata jelenleg korlátozottan lehetséges a jóváahagyási gyakorlatban, ezért olyan alkalmazási módszert dolgoztam ki, amelynek segítségével úgy használhatók fel a szimulációs eredmények a jóváahagyásban, hogy azok esetében a virtuális módszerek jelenlegi limitációitól el lehet tekinteni. Ezen célkitűzéseim mentén alkottam meg a téziseimet.

1.3. A kutatás háttere

A különböző magasan automatizált és autonóm járműfunkciókat a Society of Automotive Engineers (SAE) J3016 szabványa [4] szerinti szintekbe lehet sorolni, amelyeket a **1. táblázat** részletesen be is mutat. Ezek alapján elmondható, hogy jellemzően a ADAS funkciók a 0, 1 és 2 szintekbe sorolhatók (fehér háttérrel jelölve), ezeket a szabvány is vezetés támogató funkcióként definiálja, míg a 3-5 szintűeket automatizált funkciónak nevezi (szürke háttérrel jelölve). A dolgozatomban a legtöbb esetben az ADAS és ADS rövidítésekkel azonosítom ezeket.

1. táblázat: Az automatizáltság szintjei a SE J3016 szabvány szerint [4]

SAE Szint	Mit kell tennie az embernek a vezetőülésben?	Mit csinálnak ezek a funkciók?	Példafunkciók
0.	A járművezető vezet, amikor ezek a vezetéstámogató funkciók aktívak – még akkor is, ha nem használja a pedálokat vagy nem kormányoz. Folyamatosan felügyelnie kell ezeket a funkciókat; szükség esetén kormányoznia, fékeznie vagy gyorsítania kell a biztonság érdekében.	Csak figyelmeztetéseket és pillanatnyi segítséget nyújtanak.	Automatikus vészfékezés, holtterfigyelő, sáv-tartásra figyelmeztetés
1.	A járművezető vezet, amikor ezek a vezetéstámogató funkciók aktívak – még akkor is, ha nem használja a pedálokat vagy nem kormányoz. Folyamatosan felügyelnie kell ezeket a funkciókat; szükség esetén kormányoznia, fékeznie vagy gyorsítania kell a biztonság érdekében.	Kormányzási vagy fékezési/gyorsítási támogatást nyújtanak.	Sáv-tartás vagy adaptív tempomat
2.		Kormányzási és fékezési/gyorsítási támogatást nyújtanak.	Sáv-tartás és adaptív tempomat egyszerre
3.	Nem Ön vezet, amikor ezek az automatizált funkciók aktívak – még ha a vezetőülésben ül is. Ha a rendszer kéri, át kell vennie a vezetést.	A járművet korlátozott körülmények között vezetik, és csak akkor működnek, ha minden feltétel teljesül.	Közlekedési „dugóban” vezető asszisztens
4.	Nem kell átvennie a vezetést.	Ugyanaz, mint a 3. szint, de nem igényel emberi beavatkozást.	Helyi sofőr nélküli taxi (a pedálok/kormánykerék lehet, hogy nincs is beszerelve)
5.	Nincs szükség emberi vezetőre.	A jármű minden körülmény között képes önállóan vezetni.	Ugyanaz, mint a 4. szint, de mindenhol működik

Az ADAS funkciók tekintetében az elmúlt években jelentős átalakuláson ment keresztül az európai típusjóváahagyási rendszer, amelynek egyik legfontosabb katalizátora a 2019 novemberében elfogadott 2019/2144 számú EU rendelet volt, amelyet a „szakmában” általában új általános biztonsági előírásnéven (General Safety Regulation – GSR) említenek [5]. A rendelet több lépcsőben írta elő az ADAS funkciók kötelező bevezetését, először az új járműtípusok

esetében, majd 2024 nyaratól a legtöbb újonnan forgalomba helyezett járműnél. Ennek következtében vált kötelezővé számos ismert funkció – mint például az automatikus vészfék, vagy a sávtartó –, amelyek teljes listája a rendelet szövegében [5] található. Az ezekhez kapcsolódó előírások tartalmazzák az összes jóváhagyási szempontból szükséges tesztelési eljárást is.

Az ADAS funkciók szempontjából a tesztelésben elterjedtek és meghatározók még az úgynevezett European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) protokolljai, amelyek a járművek független értékelésében játszanak szerepet. Jellemzően a EuroNCAP régebben a töreszteszteknel adható 5 csillagról volt ismert, de manapság már az aktív biztonsági rendszereket is beleszámítják a csillagok odaítélésénél.

Fontos még egyszer kihangsúlyozni azonban, hogy a legtöbb felsorolt teszten minden új jármű típusnak át kell esnie ahhoz, hogy a forgalomba helyezéshez szükséges jóváhagyásokat, valamint a megfelelő értékelést megkaphassák, így bármilyen ebben a stádiumban felfedezett hiba jelentős többletköltséget és idővesztést okoz, hiszen jellemzően ezek a tesztek is igen költségesek és általában hetekig is eltarthatnak.

Az ADS fejlődése az elmúlt években jelentős lendületet vett, és egyre inkább a közlekedés jövőjének kulcselemévé válik. A technológiai előrelépések nemcsak a mobilitás növelését és a környezeti terhelés csökkentését ígérik, hanem a balesetmentes közlekedés vízióját is megfogalmazzák. Ezzel párhuzamosan a társadalmi érdeklődés és elvárások is egyre hangsúlyosabb szerepet kapnak, mivel a közlekedés biztonsága, hatékonysága és fenntarthatósága közvetlen hatással van az emberek mindennapi életére. A fejlett automatizált rendszerek bevezetését megelőzően elengedhetetlen azok viselkedési kompetenciáinak meghatározása és értékelése. Mind a fejlesztéshez, közlekedésben való alkalmazhatóságukhoz és mind pedig a megfelelő tesztelési eljárásokhoz kapcsolódóan találhatunk releváns szakirodalmakat [6]-[16][P4].

Az önvezető járművek vizsgálatához és jóváhagyásához kapcsolódóan az egyik kulcsdokumentum az ENSZ által kiadott úgynevezett „Új értékelési és tesztelési módszer autonóm vezetéshez” (New Assessment/Test Method for Automated Driving – NATM) [17], amely hat pillér mentén írja le a tesztelési és értékelési folyamatokat. Ezek a pillérek a szcenáriógyűjtemény létrehozása, szimulációs és virtuális tesztelés, tesztpályás vizsgálatok, közúti tesztelés, auditálás és értékelés, valamint a jármű működés közbeni monitorozás. Ez a megközelítés számottevő részben a Pegasus projektben kidolgozott módszertanra épül, amely szerint a tesztszcenáriók különböző absztrakciós szinteken (funkcionális, logikai, konkrét) jelenhetnek meg a fejlesztési folyamat során [18]. A koncepcionális fázisban magas szintű, természetes nyelvű leírások készülnek, míg a részletes technikai fejlesztés során paraméterter-alapú definíciókra van

szükség, a végrehajtás során pedig pontosan definiált, egységes adatformátumban rögzített teszteseteket kell használni.

Az Európai Unió jogszabályai közül kiemelendő a 2022/1426 (EU) számú végrehajtási rendelet [19], amely elsőként fogalmaz meg kifejezetten az autonóm járművek jóváhagyására és vizsgálatára vonatkozó irányelveket és ajánlásokat, hangsúlyozva, hogy a teszteseteket az adott jármű előre definiált tervezett működési tartományához (Operational Design Domain – ODD) kell igazítani. A NATM és a fenti EU-rendeletek elemzése során egyértelművé vált, hogy bár számos alapvető forgatókönyvet definiáltak, az önvezető járművek sokfélesége és az előforduló közlekedési szituációk elméletileg végtelen száma miatt lehetetlen minden eshetőségre konkrét tesztesetet készíteni. Ezért a szabályozások inkább tesztesetcsoportokat definiálnak, amelyek lefedik a jármű tervezett ODD-jét, és amennyiben a jármű képes biztonságosan teljesíteni ezeket, az nagy valószínűséggel garanciát jelent a biztonságos üzemeltetésre az adott környezetben. **Tehát általánosságban elmondható, hogy az önvezető járművek jóváhagyására még nem jöttek létre egységes, nemzetközileg is elfogadott tesztesetgyűjtemények és jóváhagyási eljárások.**

Annak érdekében, hogy mégis megfelelő tesztelési szituációkat lehessen definiálni, a tesztszenárió generálás területén számos további tudományos módszert és technológiát fejlesztettek ki [20]-[27].

Ahogy az előbbieken már említésre került, a megfelelő tesztesetek kiválasztásánál fontos hangsúlyt kell fektetni a megfelelő ODD definiálására, illetve optimálisabb esetben a különböző objektumok és események észlelésére és a rájuk adott válasz (Object and Event Detection and Response – OEDR) meghatározására is. Az ODD megfelelő leírására jelenleg már léteznek standardizált megközelítések, mint például SAE vagy a BSI szabványok, de még ezen a területen sem találunk feltétlenül egységes terminológiát az ODD elemekre és az azzal kapcsolatos fogalmakra nézve [28][29]. Az ODD definiálása ugyanis jellemzően egy iteratív folyamat, amelyet célszerű az autonóm funkció tervezésének viszonylag kezdeti szakaszában megtenni, azonban akár a tesztelési folyamat során is vissza kell nyúlni és finomítani kell az egyes attribútumokat, vagy akár addig nem várt újabb jellemzőket definiálni [30].

Az áttekintett anyagok alapján látható, hogy ugyan mind a tesztesetek létrehozására, mind az ODD megfelelő definiálására több, jól felhasználható megközelítés is létezik, de egyik sem foglalkozik igazán azzal, hogy hogyan lehet viszonylag kevés számú, az ipari gyakorlatban már elfogadott tesztszenárió kiválasztásával és kombinálásával olyan adott autonóm funkcióra vagy járműre szabott teszteset gyűjteményt összeállítani, amellyel

nagy bizonyossággal állapítható meg a jármű kritikus esetben mérhető biztonsági szintje, amely elősegíthetné a tesztcélú forgalomba helyezést megelőző ellenőrző vizsgálatok hatékonyságát.

Az elmúlt évek során a szimuláción alapuló tesztelési megközelítések jelentősége folyamatosan növekedett az automatizált járműrendszerek fejlesztésében és validációjában. Ezek a módszerek lehetőséget kínálnak arra, hogy a legkritikusabb közlekedési szituációkat biztonságos, kontrollált környezetben azonosítsuk és elemezzük. A szimulációk révén nemcsak a potenciálisan veszélyes helyzetek gyorsabb felismerése és kiértékelése válik lehetővé, hanem a tesztelési folyamat is lényegesen effektívebbé és költséghatékonyabbá tehető [31].

A modern szimulációs környezeteknek azonban nem csupán a tesztesetek újrarájátszására kell alkalmasnak lenniük. Fontos, hogy ezek a rendszerek támogassák a különféle algoritmusok fejlesztését és finomhangolását is – legyen szó a járművek mozgásának irányításáról, a közlekedés többi résztvevőjének (pl. gyalogosok, kerékpárosok) modellezéséről, vagy az infrastruktúra elemeinek (pl. jelzőlámpák, szenzorhálózatok) szimulációjáról. Ezáltal a fejlesztők valós idejű visszajelzéseket kaphatnak a rendszer viselkedéséről, és gyorsabban azonosíthatják az esetleges hibákat vagy hiányosságokat [32].

A szimuláció tehát nem csupán egy tesztelési eszköz, hanem egy komplex fejlesztési platform is, amely lehetővé teszi az automatizált rendszerek különböző komponenseinek integrált vizsgálatát. Ez különösen fontos a jövőbeni, magas szintű automatizáltságot igénylő közlekedési rendszerek esetében, ahol a valós környezetben történő tesztelés nemcsak költséges, hanem gyakran kockázatos is lehet [33].

A szimulációk alkalmazása megoldást kínálhatna a tesztelési eljárások felgyorsítására, valamint a valóságban nem megvalósítható nagyon szélsőséges helyzetek reprodukálására, azonban mind a NATM [17] mind pedig a EU 2022/1426 [19] rendeletében leírtak alapján **a szimulációknak még számos korlátja van a típusjóvá hagyásban történő felhasználáshoz.**

A fentiek alapján a téziseim fókusza és a hozzájuk kapcsolódó elvégzett munka tehát főként az alábbiakban összegezhető:

- Teszteset gyűjtemények létrehozására iparban már elfogadott tesztesetek alapján, amelyhez egy előzetes kérdőívet is létrehoztam.
- Speciális tesztelési eljárások létrehozása a jóváhagyási és egyéb értékelési vizsgálatokat megelőző funkcionális validációs teszteléshez.
- Szimulációs eljárások felhasználása (különösen a SciL alapján) a típusjóvá hagyásban.

2. Új tudományos eredmények

Jelen fejezetben az általam létrehozott téziseket és tömören azok megalkotásának módját foglaltam össze.

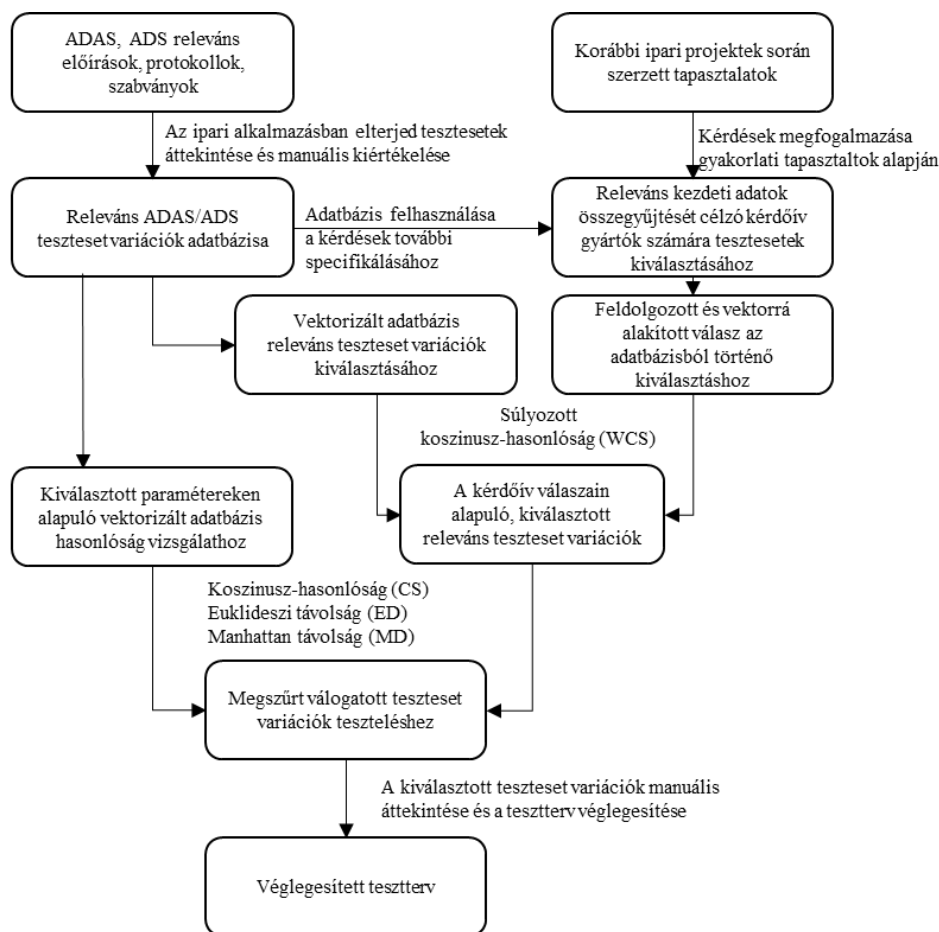
2.1. I. Tézis

Kidolgoztam egy módszertant, amely lehetővé teszi egy magasan automatizált vagy önvezető jármű tervezett működési tartományát lefedő, iparban már alkalmazott teszteset variációk adatbázisból történő azonosítását, amelyek elvégzésével nagy megbízhatósággal megállapítható, hogy az adott jármű képes-e biztonságosan üzemelni a tervezett működési környezetben.

A disszertációm ezen téziséhez kapcsolódó fejezetben egy olyan módszert mutatok be, amely segítségével önvezető járművek számára definiálhatunk és választhatunk ki olyan teszteseteket, amelyekkel a biztonság kritikus szituációk tesztelhetők tesztpálya környezetben. A tesztesetek definiálásakor a már létező és a járművek értékelésében (pl. EuroNCAP) vagy a típusjóváhagyásban elfogadott teszteljárások felhasználásával definiálok olyan teszteseteket, amelyek elvégzésével nagy bizonyossággal lefedhető és vizsgálható egy önvezető jármű viselkedése a biztonság kritikus szituációkban. [P9] Habár jelenleg kevés kifejezetten önvezető járművekre szabott, szabványosított vagy jóváhagyási célú teszteset áll rendelkezésre, kijelenthető, hogy számos ADAS funkció technológiai és tesztelési szempontból is jelentős átfedést mutat az automatizált vezetési rendszerekkel. Ennek megfelelően munkám során kiindulási alapként főként az iparban már elfogadott ADAS teszteseteket használtam fel. Fontos kiemelni, hogy a módszertan kidolgozaskor kifejezetten nem volt cél új szcenáriók generálása, mivel ezek parametrizálása rendkívül idő- és erőforrásigényes lenne, valamint a tesztesetek száma is jelentősen megnövekedne, ami a folyamatot költségessé és nehezen kezelhetővé tenné.

Az általam kidolgozott munka lépéseit szemlélteti az **1. ábra**. Első lépésként a fenn említett előírásokból, protokollokból és szabványokból egy több mint 1000 teszteset variációt tartalmazó adatbázist képeztem, majd ezeket feldolgoztam a tesztelésben meghatározó szempontok alapján. Az így nyert tapasztalatokat, valamint korábbi ipari tapasztalataimat [P8] felhasználva egy olyan előzetes bemeneti paraméteregyüttest is definiáltam, amely lehetővé teszi az adott járműhöz leginkább illeszkedő tesztesetek kiválasztását a fent említett vizsgálatok elvégzéséhez. Ezeket a paramétereket egy szintén általam kidolgozott kérdőív válaszai alapján lehet meghatározni, amely előzetesen a potenciális ügyfél vagy gyártó által kerül kitöltésre. Az így

meghatározott hasonlósági paraméterek alapján mind a kérdőív válaszaiból, mind pedig az teszteset variációk minden sorából egy-egy 22 dimenziós vektort definiáltam.



1. ábra: Az általam kidolgozott módszertan folyamata

A kérdőív vektorát súlyozott koszinusz-hasonlóság (Weighted Cosine Similarity, WCS) [34] alkalmazásával összevettem az adatbázis minden sorával a járműhöz leginkább illeszkedő variációk kiválasztásához. Ezt követően a válaszok által kiválasztott teszteseteket körének további szűkítésére is kidolgoztam egy metódust Manhattan- és Euklideszi távolságok alkalmazásával, amely az esetleges redundáns variációk kiszűrését segíti [35]. Az eljárást létező járművek tulajdonságai és korábbi projektek tapasztalatai alapján ellenőriztem,

Véleményem szerint az így létrejött módszer különösen jól alkalmazható a közúti járművek forgalomba helyezése előtti biztonsági ellenőrzések során – akár üzemeltetési, akár tesztelési célból –, amelyre jelenleg sem a hatóságok, sem a műszaki szolgáltatók nem rendelkeznek harmonizált, hatékony megoldásokkal. Mivel az ilyen jellegű tesztelési tervek gyakran „ad hoc” módon, mérnöki intuíción és tapasztalatra támaszkodva készülnek, ezért további céloom egy rendszerezettebb, tudományosan megalapozott kiválasztási folyamat biztosítása is volt. E motiváció mentén dolgoztam ki a tézishez kapcsolódó módszertant.

2.2. II. Tézis

Kidolgoztam egy olyan módszert, amelynek segítségével teszteset variációk választhatók ki és kombinálhatók olyan komplex tesztszenáriók létrehozásához, amelyek felhasználásával megállapítható, hogy az adott fejlett vezetéstámogató rendszerekkel szerelt jármű meg fog-e felelni az ADAS releváns előírások által támasztott homologizációs előírásoknak vagy egyéb járműértékelési protokollok jelentette kihívásoknak, ezáltal biztos döntés hozható az időigényes és költséges tesztelési sorozat megkezdéséről.

A jelen tézishoz kapcsolódóan bemutatott, úgynevezett komplex tesztszenáriók létrehozását célzó általam kidolgozott eljárás, nagyban támaszkodik az **I. Tézishez** kapcsolódóan ismertetett módszertanra és a létrehozott teszteset variációk adatbázisára [P9]. A kutatás célja az volt, hogy olyan tesztelési eljárást dolgozzak ki, amelynek segítségével felgyorsítható a járművek típusjövahagyását megelőző funkcionális validációs vizsgálata oly módon, hogy továbbra is megbízható és átfogó képet kapjunk arról, hogy a jármű hogyan fog szerepleni a típusjövahagyási teszteken.

A folyamat során a több mint 1000 teszteset variációt újra áttekintettem és azokat különböző további különböző szempontok alapján vizsgáltam és értékeltem. Először is azt vizsgáltam meg, hogy az adott teszteset variáció inkább a jármű szenzor rétegét vagy a beavatkozó réteget, azaz az aktuátorokat teszi-e inkább próbára. Ezt követően azt is meghatároztam, hogy mekkora kihívást jelent az egyes variáció a szenzorok vagy az aktuátorok számára, továbbá mennyire bonyolult egy adott teszteset variáció kivitelezése a gyakorlatban. Az értékelési rendszert a korábbi projektjeim során szerzett mérési eredményekre és tesztelési tapasztalatokra támaszkodva objektív kritériumok alapján alakítottam ki, minden esetben egy 1-től 4-ig terjedő skálán.

A megfelelő teszteset variációk szűréséhez első lépésként kiválasztottam a GSR-hoz kapcsolódó előírásokat. Így jelen esetben minden nem releváns előírás, mind a EuroNCAP protokollok, mind pedig az egyéb szabványok kirostálásra kerültek. A megmaradt teszteset variációkból először azokat választottam ki, amelyek a legegyszerűbb eseteket tartalmazó, úgynevezett „minimum komplex tesztszenárió” felépítéséhez lehet használni. Olyan teszteset variációkat azonosítottam, amelyek érzékelési vagy pedig beavatkozási szempontból 1-es értékűek. Ezek mellé további szűrési feltétel volt, hogy 1-es bonyolultságú teszteset variációk legyenek. Az így kapott esetek közül várhatóan több nagyon hasonló volt. Így a variációk további csökkentése érdekében a nagyon hasonló esetek kiszűrésére az Euklideszi távolságot (ED) használtam. Ugyanezt a módszert alkalmaztam a legbonyolultabb eseteket tartalmazó, úgynevezett

„maximum komplex tesztszenárió” alkotóelemeinek kiszűréséhez is. Ebben az esetben azonban minden szűrési feltételnél (érzékelés, beavatkozás, szenárió bonyolultság) igyekeztem a meghatározott legmagasabb értéket választani, habár érzékelés esetén a 4-ből a 3-as értéket is meg kellett engednem, illetve a 2-es bonyolultságú variációkat is vizsgáltam, hiszen ezekből a szempontokból legbonyolultabb esetek főként a EuroNCAP protokollokban találhatók.

A teszteset variációk kiválasztása után a kiválasztott teszteseteket egy teszteset kivitelezés szempontjából logikus sorrendbe fűztem fel a komplex tesztszenáriók létrehozásához. Ehhez ipari tapasztalatim alapján a különböző szempontokat érdemes figyelembe venni, amelyek magukba foglalják a megfelelő pályaelemek, mérés technika választását, illetve hasonló jellegű szenáriók felfűzését egy sorozatba, a tesztelés ciklikusságnak megtartása mellett.

A kidolgozott minimum és maximum tesztszenáriókat összevettem a hagyományos típusjóváahagyási eljárással és idő-, valamint költségkalkulációt is végeztem a kidolgozott szenáriók előnyeit igazolandó. A kidolgozott tesztszenáriók részben már valós projektek során is bizonyítottak.

2.3. III. Tézis

A Scenario-in-the-Loop architektúrájára épülve, egy általam létrehozott ko-szimulációs fejlesztési környezet segítségével olyan módszert dolgoztam ki, amely újfajta megközelítést kínál a járművek bizonyos típusjóváahagyási vizsgálatainak hatékonyabbá tételére oly módon, hogy a virtuális homologizáció limitációitól eltekinthetünk.

A járműiparban alkalmazott legkorszerűbb módszereknek még jelenleg is számos korlátja van, különösen az egész járművet vizsgáló, illetve próbapályás alkalmazások területén, továbbá a típusjóváahagyásban történő felhasználhatóságuk sem terjedt még el [36]. Bizonyos ilyen korlátok áthidalása érdekében jött létre a Scenario-in-the-Loop (SciL) nevű keretrendszer, amely egy új típusú, tesztpálya alapú, szimulációval támogatott vizsgálati megközelítést képvisel [P1][37]. A valós és virtuális tesztkörnyezetek közötti valós idejű kapcsolat révén a rendszer képes elmosni a fizikai és digitális tér közötti határt [P2][P3][P5][P7]. Ugyanakkor a keretrendszer működésének pontosabb megértéséhez és továbbfejlesztéséhez elengedhetetlen a valós környezetből származó bemeneti adatok használata, illetve azok hiányában szimulációs eszközökkel történő előállítás.

A tézishez kapcsoló munkám célja az volt, hogy a SciL koncepciót a Simcenter Prescan© szimulációs környezetbe integráljam és létrehozzak az IPG CarMaker® és a Simcenter Prescan© együttes alkalmazásával egy ko-szimulációs környezetet. A fejlesztés során három fontos hiányosságot azonosítottam, amelyekre megoldást nyújthat a módszerem:

- Noha számos különböző szimulációs eszköz áll rendelkezésre járműteszteléshez, mindegyik más-más előnyökkel bír. A ko-szimuláció lehetővé teszi ezen előnyök kombinálását, ugyanakkor a szimulációs eszközök összekapcsolása, valós idejű működtetése mindig jelentős kihívást jelent. A két vizsgált szoftver összekapcsolására kidolgozott megoldásom remélhetőleg más kutatók számára is hasznos lehet hasonló célú alkalmazások során.
- A szimulációt hagyományosan a valós tesztelés előtt alkalmazzák, én azonban a valós mérésekből származó adatokat használtam fel a szimulációs keretrendszer felépítéséhez. Ezáltal biztosítható a szimuláció és a valós tesztelés kompatibilitása, valamint rugalmasabbá válik a szimulációs környezet, amely így a későbbi fázisokban könnyebben összekapcsolható valós teszteszközökkel is.
- A szimulációk típusjövahagyásban történő felhasználásának még vannak korlátai, azonban az SciL architektúráján alapuló, általam kidolgozott szimulációs keretrendszer segítségével a tesztelési eljárások bizonyos lépései hatékonyabbá tehetőbbek, amelynek eredményeképp jelentős tesztpálya költségcsökkentés érhető el.

A munkámhoz kapcsolódóan bemutatom a szimulációk alkalmazásának lehetőségeit a járműtesztelésben, és ezt követően röviden a SciL keretrendszer alapelveit is, majd részletesen ismertetem a Simcenter Prescan© szimulációs szoftverben történő integrációját, amely így a SciL egyik központi komponensévé vált. A módszerem lényeges eleme, hogy a szimulációs modellkörnyezet felépítésének első két lépése a valós tesztadatok beszerzése és azok betöltése a szimulációs szoftverbe. Ezt követően bemutatok egy tesztcélokra szolgáló vezérlési algoritmust, amelyet az EuroNCAP AEB protokoll alapján készítettem el [38]. Ennek részeként egy speciális ko-szimulációs környezetet hoztam létre az IPG CarMaker® és a Simcenter Prescan© szoftverek MATLAB Simulink® [39] alapú összekapcsolásával, amelyben a Prescan© szolgált a vezérlési algoritmus futtatásának platformjaként, míg a CarMaker® biztosította a tesztelt jármű mozgásának szimulált jeleit [P6]. A módszer így egy reprodukálható fejlesztési környezetet biztosít a fejlett és magas szintű automatizálási funkciók vizsgálatához, jelentősen csökkentve a valós tesztpályás vizsgálatok idő- és költségigényét. Ennek előnyeit a típusjövahagyásban is fel lehet használni, amelyre jelen kutatásban szintén bemutatok egy esettanulmányt.

2.4. Összefoglalás és továbbfejlesztési lehetőségek

A mindennapi munkámból is kifolyólag a disszertációmban bemutatott kutatás és tézisek kiemelt fókuszja, hogy megkönnyítse a járművek típusjóváahagyási folyamatait. Az általam javasolt és kifejlesztett módszereknél és eljárásoknál mindig fontos szempont volt az eredmények minél jobb integrálhatósága a TÜV Rheinlandnál végzett ipari munkámba, amely a fontos szempontja, sőt elvárása volt a 2021-es ösztöndíj programnak is. Az általam azonosított problémákra igyekeztem tudományos alapokon nyugvó gyakorlat orientált megoldásokat kidolgozni. Ezek a problémák és az azokra adott válasz az alábbi módon összegezhető röviden:

- Teszteset gyűjtemények létrehozására iparban már elfogadott tesztesetek alapján, megkönnyítendő az önvezető járművek előzetes tesztelését, forgalomba engedését, amelyre még mindig nincsenek egységes, harmonizált eljárások.
- Speciális tesztelési eljárások létrehozása a jóváahagyási és egyéb értékelési vizsgálatokat megelőző funkcionális validációs teszteléshez, annak érdekében, hogy egy hatékonyabb, de mégis megbízható eljárást dolgozzak ki, amellyel jelentős idő- és költségcsökkentés érhető el.
- Szimulációs eljárások felhasználása (különösen a SciL alapján) a típusjóváahagyásban, oly módon, hogy a virtuális módszerek limitáció elkerülhetővé váljanak, és ebben az esetben is tesztelési idő és költségcsökkentést tudunk elérni.

A disszertációban bemutatott módszerek – a teszteset variációk adatbázisán alapuló strukturált kérdőív-alapú scenárióválasztás és komplex scenárió kidolgozás, valamint a SciL-alapú ko-szimulációs környezet – lehetőséget biztosítanak arra, hogy a tesztelési folyamatokat célzottabban és költséghatékonyabban lehessen végrehajtani. A teszteset kiválasztási algoritmus (WCS, Manhattan és Euclidean metrikák kombinációja) elősegíti, hogy a jármű funkcionális képességeihez leginkább illeszkedő scenáriók kerüljenek kiválasztásra, így a tesztelés már a fejlesztési fázisban is releváns visszajelzéseket adhat a gyártók számára.

A strukturált scenárióválasztás és a komplex tesztszenáriók kialakítása lehetővé teszi, hogy a járművek már a fejlesztési fázisban olyan teszteken essenek át, amelyek előrevetítik a típusjóváahagyási tesztek eredményét. Ezáltal a gyártók időben azonosíthatják a kritikus funkciókat, és célzott fejlesztésekkel javíthatják a megfelelőséget.

A SciL (Scenario-in-the-Loop) módszertan gyakorlati alkalmazása – különösen a BSIS funkció tesztelése során – demonstrálta, hogy a szimulációs környezetbe integrált valós trajektóriaadatok alapján előre meghatározhatók a kritikus aktiválási pontok, így a tesztelési idő és

költség akár 40%-kal is csökkenthető. Ez különösen fontos olyan esetekben, ahol a típusjóvá-hagyási tesztek szűk tűréshatárokat és komplex célobjektum-szinkronizációt igényelnek. A módszerek tehát nem csupán elméleti keretet biztosítanak, hanem gyakorlati eszköztárként is alkalmazhatók a járműipari validációs és jóváhagyási folyamatokban.

A disszertációban bemutatott módszerek számos további jövőbeni kutatási lehetőséget nyit meg, például.:

- A jövőbeli fejlesztések során érdemes lehet bővíteni a teszteset variációk adatbázisát újabb szabványok, a közeljövőben hatályba lépő UNECE/EU előírások és EuroNCAP protokollok integrálásával (akár évenkénti frissítéssel). Ezzel a módszertan tovább finomítható, hogy még átfogóbb és pontosabb tesztszenárió-válto-gatást tegyen lehetővé.
- A teszteset variációk adatbázisa jelenleg nem feltétlenül tartalmazza a ritka, szél-sőséges eseteket vagy extrém környezeti feltételeket (például kedvezőtlen időjá-rás, rossz látási viszonyok). Ezek az úgynevezett „long-tail” scenáriók kritikusak a robusztus biztonságértékeléshez. Az adatbázis bővítése ezekkel a változókkal, valamint a valós üzemeltetés során gyűjtött teljesítmény- és incidensadatok integ-rálásával tovább javíthatná a lefedettséget és relevanciát.
- A mesterséges intelligencia alkalmazása a teszteset variációk adatbázisán további potenciális összefüggésekre segíthet rávilágítani, illetve növelheti a kidolgozott módszerek hatékonyságát, például a megfelelő adaptív scenárió kiválasztási módszerek kidolgozásával, amellyel még jobban az adott tesztjárműhöz illesz-kező teszteseteket választhatjuk ki, hozhatjuk létre.
- A következő években várhatóan jelentősen bővülnek az EuroNCAP által vizsgált funkciók és scenáriók (már 2026-tól). A jelenleg kidolgozott teszteset variációk adatbázisa és komplex scenárió generálás módszere adaptálható az új protokol-lokhoz, így lehetőség nyílik azok előzetes validációjára egy idő- és költséghaté-konyabb módon.
- A ko-szimulációs környezet továbbfejlesztése és integrálása a típusjóváahagyási eljárásokba – különösen az olyan funkciók esetében, mint az ISA, AEB vagy akár a komplex tesztszenáriók – lehetőséget biztosít a tesztelési folyamatok digitali-zálására és jobb automatizálására, amellyel felgyorsítja és várhatóan ol-csóbbá teheti az ilyen eljárásokat.

Összességében úgy gondolom, hogy a disszertációban bemutatott módszerek nemcsak a jelenlegi tesztelési és jóváhagyási gyakorlatot támogatják, hanem alapot szolgáltatnak a jövőbeni fejlesztésekhez is. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak ahhoz, hogy az autonóm járművek biztonságosabbá, megbízhatóbbá és gyorsabban jóváhagyhatóvá váljanak, miközben a tesztelési költségek és időigények is csökkennek. Bízom benne, hogy az általam kidolgozott módszerek és eljárások mások számára is hasznosnak bizonyulnak és megkönnyíthetik a járművek típusjóváhagyási folyamatait. A kidolgozott módszereket a mindennapi munkámba is integrálok, és aktívan használni szándékozom a jövőbeni projektek során. Az így nyert tapasztalatok remélhetőleg még jobban igazolják a módszerek helyességét, valamint az így kapott adatokat fel kívánom használni ezek további fejlesztésére, esetleges hibáik feltárására és kijavítására, továbbá újabb eljárások kidolgozására is.

Saját publikációk

- [P1] H. Németh, A. Hány, Z. Szalay, V. Tihanyi, and B. Tóth, “Proving Ground Test Scenarios in Mixed Virtual and Real Environment for Highly Automated Driving,” in *Mobilität in Zeiten der Veränderung : Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, H. Proff, Ed., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019, pp. 199–210. doi: [10.1007/978-3-658-26107-8_15](https://doi.org/10.1007/978-3-658-26107-8_15)
- [P2] Z. Szalay, M. Szalai, B. Toth, T. Tettamanti, and V. Tihanyi, “Proof of concept for Scenario-in-the-Loop (SciL) testing for autonomous vehicle technology,” in *2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, Nov. 2019, pp. 1–5. doi: [10.1109/ICCVE45908.2019.8965086](https://doi.org/10.1109/ICCVE45908.2019.8965086).
- [P3] K. Gangel, Z. Hamar, A. Hány, A. Horváth, G. Jandó, B. Könyves, D. Panker, K. Pintér, M. Pataki, M. Szalai, Z. Szalay, T. Tettamanti, V. Tihanyi, B. Toth, B. Varga, Z. J. Viharos, “Modelling the ZalaZONE Proving Ground: a benchmark of State-of-the-art Automotive Simulators PreScan, IPG CarMaker, and VTD Vires,” *Acta Technica Jaurinensis*, vol. 14, no. 4, Art. no. 4, Nov. 2021, doi: [10.14513/actatechjaur.00606](https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00606)
- [P4] B. Toth, J. Toth, A. Lakatos, and K. Turoń, “Innovative complex-system-based cooperation between demand responsive transport services, shared mobility and autonomous bus services,” in *2022 IEEE 1st International Conference on Cognitive Mobility (CogMob)*, Oct. 2022, pp. 000127–000134. doi: [10.1109/CogMob55547.2022.10118307](https://doi.org/10.1109/CogMob55547.2022.10118307)
- [P5] B. Toth and Z. Szalay, “The role of the virtual environment fidelity in proving ground related vehicle simulations,” presented at the 38th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry, Visegrád, Hungary, May 24-26, 2023.
- [P6] B. Toth and Z. Szalay, “Development and Functional Validation Method of the Scenario-in-the-Loop Simulation Control Model Using Co-Simulation Techniques,” *Machines*, vol. 11, no. 11, Art. no. 11, Nov. 2023, doi: [10.3390/machines11111028](https://doi.org/10.3390/machines11111028).
- [P7] Tóth B. and Szalay Z., “Virtuális módszerekkel támogatott kontrolált tesztkörnyezet kialakítása teszt pályán fejlett vezetési funkciók vizsgálatára,” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 6, no. 1., pp. 87–99, Mar. 2024. Elérhető online: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/436>
- [P8] J. Reckenzaun, R. Rott, O. Nikolic, P. Innerwinkler, M. Kirchengast, D. J. Ritter, S. Solmaz, S. Ladstatter, P. Luley, B. Toth, A. M. Hee, L. Hörmann, A. Pötsch, M. Rothacher, A. Rövid, Z. Vincze, M. Csontho, “Transnational Testing, Operation and Certification of Automated Driving Systems – Building bricks for the NATM multi-pillar framework,” in *2024 IEEE International Automated Vehicle Validation Conference (IAVVC)*, Oct. 2024, pp. 1–7. doi: [10.1109/IAVVC63304.2024.10786414](https://doi.org/10.1109/IAVVC63304.2024.10786414).
- [P9] B. Toth and Z. Szalay, “Minimum Critical Test Scenario Set Selection for Autonomous Vehicles Prior to First Deployment and Public Road Testing,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 13, Art. no. 13, Jun. 2025, doi: [10.3390/app15137031](https://doi.org/10.3390/app15137031).

Felhasznált irodalom

- [1] KBA: Autonome-Fahrzeuge-Genehmigungs-Und Betriebs-Verordnung (AFGBV). 2022. Elérhető online: <https://www.gesetze-im-internet.de/afgbv/> (letöltve: 2025.07.14)
- [2] 5/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet a közúti járművek műszaki megvizsgálásáról. Elérhető online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=99000005.koh> (letöltve: 2025.07.14)
- [3] 6/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet a közúti járművek forgalomba helyezésének és forgalomban tartásának műszaki feltételeiről. Elérhető online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=99000006.koh> (letöltve: 2025.07.14.)
- [4] SAE J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles v_202104, Április 2024. Elérhető online: https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/ (letöltve: 2025.07.02)
- [5] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2019/2144 RENDELETE, November 2019. Elérhető online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R2144> (letöltve: 2025.07.03).
- [6] C. Nowakowski, S. E. Shladover, and C.-Y. Chan, “Determining the Readiness of Automated Driving Systems for Public Operation: Development of Behavioral Competency Requirements,” *Transportation Research Record*, vol. 2559, no. 1, pp. 65–72, Jan. 2016, doi: [10.3141/2559-08](https://doi.org/10.3141/2559-08).
- [7] W. Wang *et al.*, “An Evaluation Method for Automated Vehicles Combining Subjective and Objective Factors,” *Machines*, vol. 11, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2023, doi: [10.3390/machines11060597](https://doi.org/10.3390/machines11060597).
- [8] D. Zhao, X. Huang, H. Peng, H. Lam, and D. J. LeBlanc, “Accelerated Evaluation of Automated Vehicles in Car-Following Maneuvers,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 733–744, Mar. 2018, doi: [10.1109/TITS.2017.2701846](https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2701846).
- [9] D. Zhao *et al.*, “Accelerated Evaluation of Automated Vehicles Safety in Lane-Change Scenarios Based on Importance Sampling Techniques,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 595–607, Mar. 2017, doi: [10.1109/TITS.2016.2582208](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2582208).
- [10] L. Chen *et al.*, “Milestones in Autonomous Driving and Intelligent Vehicles: Survey of Surveys,” *IEEE Trans. Intell. Veh.*, vol. 8, no. 2, pp. 1046–1056, Feb. 2023, doi: [10.1109/TIV.2022.3223131](https://doi.org/10.1109/TIV.2022.3223131).
- [11] M. D. Vaio, P. Falcone, R. Hult, A. Petrillo, A. Salvi, and S. Santini, “Design and Experimental Validation of a Distributed Interaction Protocol for Connected Autonomous Vehicles at a Road Intersection,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 9451–9465, Oct. 2019, doi: [10.1109/TVT.2019.2933690](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2933690).
- [12] P. Koopman and M. Wagner, “Challenges in Autonomous Vehicle Testing and Validation,” *SAE Int. J. Trans. Safety*, vol. 4, no. 1, pp. 15–24, Apr. 2016, doi: [10.4271/2016-01-0128](https://doi.org/10.4271/2016-01-0128).
- [13] S. Vass *et al.*, “Are Low-Speed Automated Vehicles Ready for Deployment? Implications on Safety and Urban Traffic,” Mar. 15, 2024, Preprint, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 4760713. doi: [10.2139/ssrn.4760713](https://doi.org/10.2139/ssrn.4760713).

- [14] A. Alessandrini, R. Alfonsi, P. D. Site, and D. Stam, “Users’ Preferences towards Automated Road Public Transport: Results from European Surveys,” *Transportation Research Procedia*, vol. 3, pp. 139–144, Jan. 2014, doi: [10.1016/j.trpro.2014.10.099](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.099).
- [15] Z. Cao and A. (Avi) Ceder, “Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 102, pp. 370–395, May 2019, doi: [10.1016/j.trc.2019.03.018](https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.018).
- [16] K. Mouratidis and V. Cobeña Serrano, “Autonomous buses: Intentions to use, passenger experiences, and suggestions for improvement,” *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 76, pp. 321–335, Jan. 2021, doi: [10.1016/j.trf.2020.12.007](https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.12.007).
- [17] UNECE: New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) Guidelines for Validating Automated Driving System (ADS). 2022. Elérhető online: <https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE-TRANS-WP.29-2022-58.pdf> (letöltve 2025.03.25.).
- [18] PEGASUS Projekt: Scenario Description. 2019. Elérhető online: https://www.pegasusprojekt.de/files/tmpl/PDF-Symposium/04_Scenario-Description.pdf (letöltve: 2025.03.25.).
- [19] Commission Implementing Regulation (EU) 2022/1426 of 5 August 2022 Laying down Rules for the Application of Regulation (EU) 2019/2144 of the European Parliament and of the Council as Regards Uniform Procedures and Technical Specifications for the Type-Approval of the Automated Driving System (ADS) of Fully Automated Vehicles (Text with EEA Relevance). Elérhető online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R1426> (letöltve: 2025.03.25.).
- [20] S. Feng, Y. Feng, H. Sun, Y. Zhang, and H. X. Liu, “Testing Scenario Library Generation for Connected and Automated Vehicles: An Adaptive Framework,” *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 1213–1222, Feb. 2022, doi: [10.1109/TITS.2020.3023668](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3023668).
- [21] S. Feng, Y. Feng, C. Yu, Y. Zhang, and H. X. Liu, “Testing Scenario Library Generation for Connected and Automated Vehicles, Part I: Methodology,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1573–1582, Mar. 2021, doi: [10.1109/TITS.2020.2972211](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2972211).
- [22] S. Feng, Y. Feng, H. Sun, S. Bao, Y. Zhang, and H. X. Liu, “Testing Scenario Library Generation for Connected and Automated Vehicles, Part II: Case Studies,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 9, pp. 5635–5647, Sep. 2021, doi: [10.1109/TITS.2020.2988309](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2988309).
- [23] Z. Wang, J. Ma, and E. M.-K. Lai, “A Survey of Scenario Generation for Automated Vehicle Testing and Validation,” *Future Internet*, vol. 16, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2024, doi: [10.3390/fi16120480](https://doi.org/10.3390/fi16120480).
- [24] S. Li, W. Li, P. Li, P. Ma, and M. Yang, “Novel Test Scenario Generation Technology for Performance Evaluation of Automated Vehicle,” *Int.J Automot. Technol.*, vol. 23, no. 5, pp. 1295–1312, Oct. 2022, doi: [10.1007/s12239-022-0113-z](https://doi.org/10.1007/s12239-022-0113-z).
- [25] T.-H. Nguyen *et al.*, “Generating Critical Scenarios for Testing Automated Driving Systems,” Dec. 03, 2024, *arXiv*: arXiv:2412.02574. doi: [10.48550/arXiv.2412.02574](https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.02574).
- [26] X. Wu *et al.*, “LAMBDA: Covering the Multimodal Critical Scenarios for Automated Driving Systems by Search Space Quantization,” Nov. 30, 2024, *arXiv*: arXiv:2412.00517. doi: [10.48550/arXiv.2412.00517](https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.00517).

- [27] Z. Zhong, Y. Tang, Y. Zhou, V. de O. Neves, Y. Liu, and B. Ray, “A Survey on Scenario-Based Testing for Automated Driving Systems in High-Fidelity Simulation,” Dec. 02, 2021, *arXiv*: arXiv:2112.00964. doi: [10.48550/arXiv.2112.00964](https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.00964).
- [28] A. Shakeri, “Formalization of Operational Domain and Operational Design Domain for Automated Vehicles,” in *2024 IEEE 24th International Conference on Software Quality, Reliability, and Security Companion (QRS-C)*, Jul. 2024, pp. 990–997. doi: [10.1109/QRS-C63300.2024.00131](https://doi.org/10.1109/QRS-C63300.2024.00131).
- [29] P. Koopman and F. Fratrick, “How Many Operational Design Domains, Objects, and Events?,” presented at the SafeAI@AAAI, 2019. Elérhető online: <https://www.semanticscholar.org/paper/How-Many-Operational-Design-Domains%2C-Objects%2C-and-Koopman-Fratrick/a6ef2061fa37d48c28685c9ca009b2fe66c27781> (letöltve: 2025.02.15.)
- [30] F. Eichenseer, S. Sarkar, and A. Shakeri, “A Systematic Methodology for Specifying the Operational Design Domain of Automated Vehicles,” in *2024 IEEE 35th International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, Oct. 2024, pp. 13–18. doi: [10.1109/ISSREW63542.2024.00040](https://doi.org/10.1109/ISSREW63542.2024.00040).
- [31] P. Weissensteiner, G. Stettinger, J. Rumetshofer, and D. Watzenig, “Virtual Validation of an Automated Lane-Keeping System with an Extended Operational Design Domain,” *Electronics*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2022, doi: [10.3390/electronics11010072](https://doi.org/10.3390/electronics11010072).
- [32] A. Coppola, L. D. Costanzo, L. Pariota, S. Santini, and G. N. Bifulco, “An Integrated Simulation Environment to test the effectiveness of GLOSA services under different working conditions,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 134, p. 103455, Jan. 2022, doi: [10.1016/j.trc.2021.103455](https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103455).
- [33] H. Altamimi, I. Varga, and T. Tettamanti, “Urban Platooning Combined with Dynamic Traffic Lights,” *Machines*, vol. 11, no. 9, Art. no. 9, Sep. 2023, doi: [10.3390/machines11090920](https://doi.org/10.3390/machines11090920).
- [34] D. Wang, H. Lu, and C. Bo, “Visual Tracking via Weighted Local Cosine Similarity,” *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 45, no. 9, pp. 1838–1850, Sep. 2015, doi: [10.1109/TCYB.2014.2360924](https://doi.org/10.1109/TCYB.2014.2360924).
- [35] S. Boyd and L. Vandenberghe, “Introduction to Applied Linear Algebra: Vectors, Matrices, and Least Squares,” Higher Education from Cambridge University Press. Elérhető online: <https://www.cambridge.org/highereducation/books/introduction-to-applied-linear-algebra/4D69AF22E38303FE20FFEEFDCE0E7F96> (letöltve: 2025.05.05.)
- [36] R. Donà and B. Ciuffo, “Virtual Testing of Automated Driving Systems. A Survey on Validation Methods,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 24349–24367, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3153722](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3153722).
- [37] Z. Szalay, “Next Generation X-in-the-Loop Validation Methodology for Automated Vehicle Systems,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35616–35632, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3061732](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061732).
- [38] EuroNCAP TEST PROTOCOL–AEB/LSS VRU Systems, Version 4.4. 2023. Elérhető online: <https://cdn.euroncap.com/media/77299/euro-ncap-aeb-lss-vru-test-protocol-v44.pdf> (letöltve: 2025.07.10.)
- [39] MATLAB Help Center: ZalaZONE Automotive Proving Ground Smart City. Elérhető online: https://ch.mathworks.com/help/driving/ref/zalazoneautomotiveproving-groundsmartcity.html?searchHighlight=ZalaZONE&s_tid=srchtitle_support_results_2_ZalaZONE (letöltve 2025.07.07).