

**DEVELOPMENT OF A VIRTUAL  
TECHNIQUE AIDED, CONTROLLED TEST  
ENVIRONMENT ON PROVING GROUND  
FOR ASSESSMENT OF ADVANCED  
DRIVING FUNCTIONS**

**VIRTUÁLIS MÓDSZEREKKEL  
TÁMOGATOTT KONTROLÁLT  
TESZTKÖRNYEZET KIALAKÍTÁSA  
TESZTPÁLYÁN FEJLETT VEZETÉSI  
FUNKCIÓK VIZSGÁLATÁRA**

TÓTH Bálint<sup>1</sup> – SZALAY Zsolt<sup>2</sup>

**Abstract**

Testing advanced driving functions in a highly realistic and repeatable way is one of the biggest challenges of today's automotive research, development and validation process. Although the role of the computer simulations is increasing in the development phase, it is still necessary to test the vehicles on real proving grounds with physically existing target objects. Therefore, finding the balance between the virtual and real test methods is a key task. In this paper, we present the Scenario-in-the-Loop (SciL) concept which uses similar closed-loop testing methodology compared to the widely used SiL, HiL, or ViL approaches. The core component is the control software which controls virtual and real disturbances and adapt the scenario based on the continuously changing input parameters of the tested vehicle and the proving ground infrastructure in real-time.

**Keywords**

Scenario-in-the-Loop, proving ground, simulation, vehicle testing

**Absztrakt**

Napjaink egyik legnagyobb járműipari kutatás-fejlesztési és validációs kihívása a fejlett vezetési funkciók megismételhető, és realiztikus módon történő tesztelése. Habár a fejlesztési fázisban a számítógépes szimulációk szerepe megnövekedett, de továbbra is szükséges a járművek próbapályán történő tesztelése valós tesztobjektumok használatával. A valós és virtuális tesztelési módszerek közötti egyensúly megtalálása kulcsfeladat. Ebben a munkában bemutatásra kerül a Scenario-in-the-Loop (SciL) koncepció, amely a széleskörben használt SiL, HiL vagy ViL eljárásokhoz hasonló zárthurkú tesztelési módszer. A koncepció fő komponense az a vezérlőszoftver, amely a valós és virtuális zavarások vezérlését és a tesztszenárió adaptálását végzi a tesztelt járműből és az infrastruktúrából származó bementi paraméterek alapján valós időben.

**Kulcsszavak**

tesztpálya, szimuláció, járműtesztelés, Scenario-in-the-Loop

<sup>1</sup> tothb.0920@edu.bme.hu | ORCID: 0000-0003-1688-9089 | PhD student, Department of Automotive Technologies, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest University of Technology and Economics | PhD hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék

<sup>2</sup> szalay.zsolt@kjk.bme.hu | ORCID: 0000-0002-6172-5772 | Head of Department, Department of Automotive Technologies, Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering, Budapest University of Technology and Economics | Tanszékvezető, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék

## BEVEZETÉS

Reagálva a növekvő társadalmi igényekre a biztonságosabb és hatékonyabb közlekedés biztosítására az autóiipari fejlesztések is jelentős mértékben felgyorsultak az elmúlt évtizedben, amely egyúttal további kihívásokat generált a járművek jóváhagyási és tesztelési területén is. [1] A legújabb fejlesztések, mint például a fejlett vezetés támogató rendszerek, azaz az ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), vagy az autonóm járművek olyan további előnyöket is ígérnek, mint a zéró lokális emisszió, a szélesebb társadalmi rétegek számára elérhető mobilitás. Azonban az ilyen funkciókkal szerelt járműveknek, különösen az önvezető autóknak, sokkal komplexebb közúti szituációkban kell tudni helytállni, amely szituációk modellezéséhez új tesztelési eljárások kifejlesztésére van szükség. [2] Az autonóm járművek teszteléséhez nem használhatók teljes mértékben a jellemzően az ADAS funkciók tesztelésére kifejlesztett eljárások, ugyanis az ilyen típusú járművek viselkedése változhat a különböző forgalmi szituációk és körülmények függvényében, továbbá közel végtelen számú ilyen szituáció és tesztelés céljából levezetendő kilométer vizionálható, amelyeket természetesen szinte lehetetlen a hagyományos vizsgálati módszerekkel lefedni. [3][4] Ugyan az egyre szélesebb körben elterjedt közúti teszteléssel, jelentős mennyiségű hasznos adat gyűjthető, azonban az ilyen eljárásokkal nem biztosítható a megfelelő megismételhetőség, amely a jóváhagyási és homologációs eljárások egyik kulcs eleme, továbbá az ilyen módszerek biztonsági kockázatot is hordoznak magukban a közúti közlekedés más résztvevői számára. [5] Ebből kifolyólag a zárt tesztpályán történő tesztelés továbbra is fontos részét képezi a járművek validációs folyamatainak. [6]

Jelen munka az úgynevezett Scenario-in-the-Loop (SciL) koncepciót hivatott bemutatni, amely a széleskörben használt Software-in-the-Loop (SiL), Hardware-in-the-Loop (HiL) vagy Vehicle-in-the-Loop (ViL) eljárásokhoz hasonló zárthurkú tesztelési módszer. A következő, második fejezet egy áttekintést nyújt a járműipari fejlesztések céljairól, csoportjairól, valamint néhány jellemző példát mutat be a már alkalmazott fejlett tesztelési eljárásokról. Ezt követően a harmadik főfejezetben bemutatásra kerül maga a SciL koncepció, továbbá annak főbb előnyei is ismertetésre kerülnek a jelenleg használt eljárásokkal szemben a negyedik fejezetben.

## JÁRMŰTESZTELÉSI ELJÁRÁSOK

Az alábbi fejezetben elsőként bemutatásra kerülnek a járműiparban végzett tesztelési eljárások céljai azok főbb jellemzőinek ismertetésével, majd néhány olyan fejlett vizsgálati módszert mutatunk be, amelyek feltárt hiányosságainak orvoslására a SciL koncepció alkalmazása megfelelő alternatívát kínálhat.

### A járműipari tesztelés főbb céljai

A járműipari tesztelési eljárásokat céljuk szerint, követve a termékfejlesztés folyamatát, három főbb csoportba lehet sorolni. Ezek az alábbiak:

- Fejlesztési célú tesztelés
- Típusjóváahagyás, előírások által szabályozott tesztelés
- Fogyasztói tesztek

A fejlesztési célú tesztelés jellemzően a korábban a szoftverfejlesztésben már elterjedt V-modell szerint történik, amely során már a tervezés korai szakaszában elkezdődik a

tesztelés és validálás, ezzel kiszűrhetők olyan hibák, melyek a tervezés fázis során tovább gyűrűzve csak nagy költség ráfordítással lennének korrigálhatók. A V-modell alkalmazása során a tesztelés végig követi a termék fejlesztését. A modul teszteléstől az integráción keresztül egészen a komplett rendszerig szinte minden szinten tesztet végzünk biztosítva, hogy a végtermékbe kerülő eszköz a lehető legkevesebb hibát hordozza magában. Ez abból a szempontból is kedvező, hogy így nem kell minden módosítást a konkrét járművön kipróbálni, ezáltal megspórolhatók például a tesztpályákon folytatott vizsgálatok költségei is. [7]

A fejlesztési tesztek során továbbá nagy mértékben használhatók szimulációk szinte a fejlesztés minden szintjén, amelyekkel jelentős költség- és időmegtakarítás érhető el. A járműipari validáció tesztek során kiemelt szerepe van az úgynevezett hurokban történő tesztelésnek, vagy más néven az „in-the-loop” típusú szimulációs módszereknek, amelyek jellemzően nyílt és zárt hurkú tesztelési eljárásokra oszthatók. Előbbiek esetén a vizsgálat tárgyát képező elem adott bemeneti adatokra történő válaszát vizsgáljuk és nem foglalkozunk az adott elem egész szimulációs rendszerre gyakorolt hatásával, míg utóbbi esetén lényeges, a rendszer reakciója a tesztelt elem által adott válaszra, amely által a bementi adatok is megváltozhatnak ezzel újabb válaszokra készítve a tesztelt elemet. Ez az elem lehet egy egész alrendszer, de egy kisebb alegység, például egy elektronikai vezérlőegység, de akár egy szoftver vagy egy rendszer modell is, amelyekhez még nem tartozik később beépítésre kerülő konkrét hardver. Ezek alapján ilyen eljárások a teljesség igénye nélkül például az úgynevezett Model-in-the-Loop (MiL), a bevezetésben már említett SiL, és a már valós idejű tesztelés miatt nagyobb költségráfordítású HiL tesztelés. [8] Ilyen zárthurkú tesztelési eljárás a szintén említett ViL, amelynek során az egész jármű kerül a szimulációs hurokba tesztelés céljával, illetve ezen alapulva ide sorolható a jelen munkában ismertetett SciL koncepció is, amely a következő főfejezetben kerül részletesebb bemutatásra.

A típusjóváahagyás során jellemzően teljes járműveket, vagy nagyobb jármű alrendszereket, illetve bizonyos esetekben beépítésre kerülő alkatrészek megfelelőségét vizsgálják nemzetközi előírások alapján. Ezek általában konkrét megfelelési értékeket, úgynevezett „pass-fail” kritériumokat fogalmazznak meg, amelyek alapján egyértelműen eldönthető, hogy az adott jármű megfelel-e az adott előírásokban foglalt, főként műszaki követelményeknek. Emiatt az ilyen tesztek jellemzően nem nyújtanak teljekörű képet egy adott rendszer részletesebb teljesítményéről. A típusjóváahagyás során általában valós tesztek kerülnek elvégzésre, legtöbb esetben próbapályán. Az utóbbi időben azonban mind az EU, mind pedig az ENSZ munkacsoportjai elkezdtek vizsgálni a szimulációk, virtuális módszerek és fejlett tesztelési eljárások típusjóváahagyási folyamataiban történő alkalmazhatóságának lehetőségeit és elkezdődött az ehhez kapcsolódó feltétel rendszerek kidolgozása. [9][10] Ugyan már találunk olyan ENSZ előírást, amely során szimulációs mérések eredményei is felhasználhatók, de a nagyobb volumenben történő alkalmazásuk a következő évtizedben megszülető előírásoktól várható. [11]

A fogyasztói tesztek során a típusjóváahagyással ellentétben már jellemzően az adott jármű vagy funkció teljesítmény mutatóinak vizsgálatára fókuszálnak. Ilyen tesztek jellemzően az úgynevezett „New Car Assessment Program” azaz az NCAP tesztek keretében vizsgálják. Az egyik legismertebb és legrészletesebb protokollal rendelkező ilyen szervezet az Európában tevékenykedő EuroNCAP. A tesztek során az adott funkciókat sokkal több lépcsőben, mélyebb analízisnek vetik alá, majd az eredményeket a korábban törésteztekben ismert öt csillaggal jelölt skálán értékelik. Ma már az öt csillagból három kapható a

passzív biztonsági rendszerekre, viszont a fennmaradót kettőt a megfelelően teljesítő ADAS funkciókkal érdemelhetik ki a gyártók. [10]

### **Fejlett járműtesztelési eljárások**

Az elmúlt néhány évben egyre több olyan fejlett tesztelési megoldást dolgoztak ki, amelyek nagy mértékben támaszkodnak különböző szimulációs eljárásokra. Ezek nagy része a ViL metódust alkalmazza, amelynek során az egész jármű kerül tesztelésre. A ViL eljárásoknak azonban különböző implementációi léteznek. Az egyik fő jellemző, amely szerint szeparálni lehet ezeket, hogy a vizsgálat során a tesztobjektum statikus vagy mozgó jármű. Előbbi esetén gyakran úgynevezett Vehicle-Hardware-in-the-loop (VeHiL) módszerről is beszélhetünk, hiszen a jármű akár egy nagy komplex hardverként is értelmezhető. Ilyen eljárások során a járművet gyakran fékpadra, tesztkör és a szimuláció alapján a körülötte lévő objektumokból származó szimuláció által generált adatokat részben vagy egészben közvetlenül a jármű döntéshozó rétegében juttatják be megkerülve annak szenzorrétegét. [13] Bizonyos esetekben természetesen lehetőség van a szenzorok vizsgálatára is, például a kamerák számára kivetíthetők a különböző közlekedési szituációk, de még a radarok és a LiDAR (Light Detection and Ranging) szenzorok számára is létezik olyan célobjektum generáló megoldás, amely képes elnyelni a jármű ilyen szenzorai által kibocsátott hullámokat és a szimulációban történtek alapján a megfelelő reflexiókat biztosítani. [14]

A klasszikus ViL eljárás során a tesztelt jármű, azaz VUT-val (Vehicle Under Test) ténylegesen közlekedik a tesztelés közben. Ilyenkor jellemzően a VUT egy olyan biztonságos környezetben halad, ahol azon kívül nem található más olyan objektum, amellyel összeütközhet. [15] Ilyen környezetek jellemzően a járműipari próbapályák dinamikai felületeti. A teszt során a járműben található az szimulációs számítógép, amely a jármű szenzorainak adatokat szolgáltat a szimulációban zajló forgalmi szituációk alapján. A jármű valós mozgása a szimulációba általában valamilyen nagy pontosságú helymeghatározó és inerciamérő berendezés, az INS (Inertial Navigation System) által szolgáltatott adatokon alapul, így a szimulációban közlekedő digitális iker pontosan ugyanúgy viselkedik, mint a valós jármű. A jármű mozgása alapján a közlekedési szituációk szereplői reagálnak a tesztelt járműre, amely így a szimulációból érkező generált adatok alapján különböző beavatkozásokat, például vészfékmanővert végezhet úgy, hogy a jármű teljes dinamikai jellemzői vizsgálhatóak maradnak anélkül, hogy valós ütközésveszély állna fenn. Az ilyen klasszikusnak nevezhető ViL szimulációk alapvetően a járművezetők szokásainak és a vezetés támogató rendszerek együttműködésének kiértékelésére lettek kifejlesztve. [16] A jelen munkában bemutatott SciL koncepció architektúrája nagyban támaszkodik a klasszikus ViL eljárás modelljére.

A ViL eljárások azonban rendelkeznek bizonyos korlátokkal. Ilyen például, hogy sok esetben nem lehet a már említett összes szenzort tesztelni azok megkerülése nélkül, továbbá amennyiben a statikus ViL megoldások kerülnek alkalmazásra, akkor nem nyerhetünk megfelelő kinematikai és dinamikai információkat a járműből.

További fejlett eljárásoknak tekinthetők az úgynevezett „mixed reality” eljárások, amelyekben a virtuális és valós elemeket ötvözik akár valós időben is. Ilyen tesztelés során lehetőség van például térben szeparált szereplőket a virtuális térben közösen tesztelni. Például egy gyalogos mozoghat egy laborkörnyezetben, ahol a mozgását pontosan rögzítik, majd ez alapján, egy a tesztpályán közlekedő jármű számára juttatják el gyalogosról alkotott

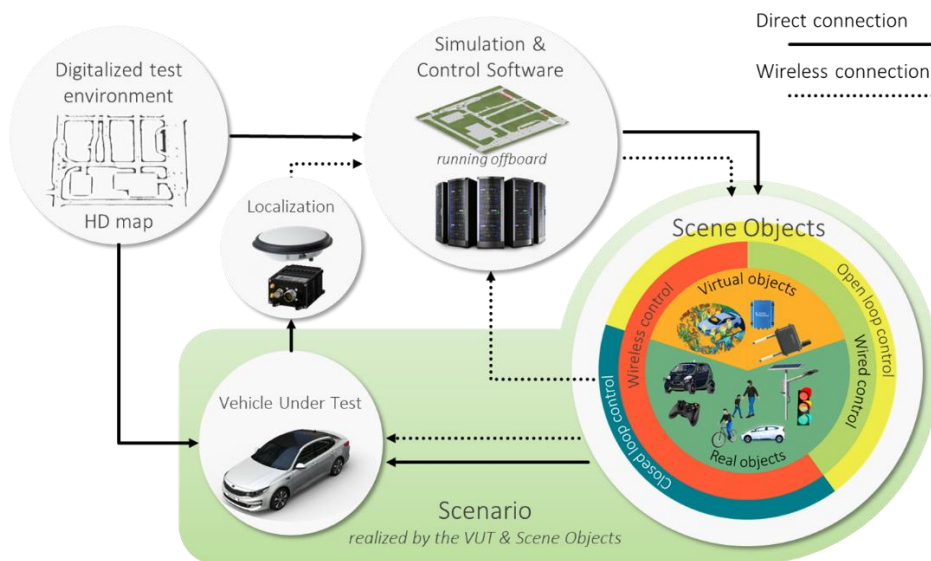
akár nyers szenzoradatot a digitális iker környezet alkalmazásával annak érdekében, hogy még realisztikusabb kihívás elé állítsák a járművet a valós ütközés veszélyének kizárásával.

## A SCENARIO-IN-THE-LOOP KONCEPCIÓ

A SciL koncepció a ViL szimuláción alapuló főként tesztpályákon alkalmazható zárt hurkú tesztelési eljárás, amely egyik fő célja az önvezető járművek biztonságos környezetben, megismételhető módon történő tesztelése. [18] Az alábbiakban bemutatásra kerül a SciL működési modellje, illetve a ki és bemeneti oldali elemei, valamint azok rendszerezési lehetőségei.

### A SciL működési modellje, architektúrája

Ahogy az már korábban említésre került, a SciL koncepció architektúrája nagyban támaszkodik az előző fejezetben bemutatott ViL működési modelljére, valamint sajátosságaira. Az 1. Ábra a SciL architektúráját szemlélteti. [19] A SciL esetén is a VUT nem statikus, hanem egy tesztkörnyezetben mozog, azonban ez a tesztkörnyezet már valóságghú kialakítású környezet kell legyen, például városi tesztkörnyezet, országút vagy autópálya. Ez a környezet a statikus elemeken kívül, – mint amilyen maga az úthálózat felfestésekkel, a szegélyek, járdák, járdaszigetek vagy utcai bútorok –, további objektumokat, például mozgó forgalmi szereplőket is tartalmazhat.



1. Ábra: A Scenario-in-the-Loop koncepció architektúrája, forrás: [19]

A rendszer központi eleme a szimulációs és kontrol szoftver (*Simulation & Control Software*), amelynek egyik bemeneti eleme a valós tesztkörnyezet pontos virtuális modellje (*Digitalized test environment*), hiszen fontos, hogy a szoftverben lezajló szimulációk összerendelhetők legyenek a valóságban megtalálható infrastruktúrával. Ez a virtuális modell ideális esetben a VUT navigációs rendszerébe is betöltésre kerül például valamilyen nagyfelbontású térkép (*HD map*) formájába, hogy az autó is ismerje az általa bejárható környezetet. A tesztelés során legoptimálisabb esetben a tesztelt járművet egy „black box” jellegű

elemnek tekinthetjük, amely belső jellemzőibe, – beleértve a benne működő vezérlési algoritmusokat is –, nem kell belelátunk, csupán csak a tesztpályán történő viselkedését kell független módszerekkel megfigyelni, regisztrálni. A jármű mozgása szintén egy bemeneti elemet jelent a központi szoftver számára, amely a jármű lokalizációs adatai (*Localization*) alapján jeleníti meg annak virtuális mását, úgynevezett digitális ikrét a szimulációban, majd ezek alapján futtatja a különböző tesztesetek, azaz a scenáriókat. A kimeneti oldalon fel-lelhető zavarások (*Scene Objects*) vezérlését szintén ez a központi szoftver látja el a benne futó szimulációk alapján. Ezek a zavarások így hatással tudnak lenni a VUT viselkedésére, ezzel gyakorlatilag zárva a SciL zárthurkú modelljét. A VUT és a zavarások együttesen folyamatos teszteseteket hoznak létre vagy definiálják újra azokat, ezzel lényegében a folyamat központi elemévé téve magát a scenáriót (*Scenario*). Ebből jött létre a Scenario-in-the-Loop elnevezés. A klasszikus ViL megoldással ellentétben a szimulációs és kontrol szoftver már nem a járműben helyezkedik el, hanem egy irányító központban található. Ennek legfőbb oka, hogy a feladat ellátásához nagyobb számítási kapacitású számítógépekre lehet szükség, amelyek méretükből kifolyólag nem minden esetben helyezhetők el a VUT fedélzetén. Ezért a központi szoftver a zavaró célú objektumokkal és a tesztel jármű lokalizációját végző rendszerrel rádiókommunikációs kapcsolaton kommunikál, amellyel szemben szigorú hatótávolsági és késedelmi követelmények támaszthatók.

### A SciL bemeneti oldali elemei

A SciL koncepciónak két fő bemente van, ebből az egyik maga a fizikai tesztkörnyezet, valamint annak virtuális modellje, a másik pedig maga a VUT, pontosabban annak mozgása, viselkedése.

A fizikai környezet tulajdonságai általában a tesztek során nem változnak, így az ebből származó adatok statikusnak tekinthetők. Ezek a környezetek jellemzően komplexebb úthálózatokat és olyan további elhelyezett objektumokat tartalmaznak, amelyek jól közelítik a valós közúti viszonyokat. Ilyen valóssághű tesztkörnyezet például a Zalaegerszegen létesített ZalaZONE Járműipari Tesztpálya „Smart City” elnevezésű városi tesztkörnyezete, autópályája és országúti tesztkörnyezete is. [20] Az ezeken alapuló virtuális környezettel szemben azonban már számos kritérium támasztható, – mint például annak logikai kialakítása, geometriai helyessége, felbontása vagy a magassági jellemzői –, amelyek mind befolyásolhatják a tesztelt jármű digitális reprezentációjának viselkedését. [21] Továbbá a virtuális környezetben lehetőség van különböző dinamikusan változó paraméterek alkalmazására is, mint például az időjárás vagy fényviszonyok. Fontos megjegyezni, hogy a virtuális környezetek teljeskörű leírására még nem létezik uniformizált megoldás, azonban számos standard, és leíró módszert dolgoztak ki erre a célra. Ilyenek például az OpenDIRVE® és OpenCRG® standardok, amelyek az úthálózatok logikai és geometriai, valamint felületi és magassági jellemzőit írják le. [22] Virtuális környezetek különböző módokon hozhatók létre, például megépíthetők a különböző járműipari szoftverek virtuális környezetmodellező programjaival, de annak érdekében, hogy a lehető legnagyobb egyezés álljon fenn a virtuális és valós tesztkörnyezet között, érdemes például a valós környezet lézerszkennelésén alapuló pontfelhőkből előállítani azokat. [23]

A bemenő adatok további forrásai a tesztelt jármű vagy járművek, azok vontatmányai, illetve a tesztben résztvevő többi zavaró célú mozgó objektum lokalizációs informá-

ció. Ezek már előállíthatók akár külső szenzorok, pl. kamerák és LiDAR-rok detekciói alapján is. [24] Jellemzően napjainkban inkább még mindig az autópárhánban elterjedt, járműbe szerelhető nagy pontosságú lokalizáció egységeket alkalmaznak erre a célra. Az ilyen lokalizációs eszköz célszerűen valamilyen INS (Inertial Navigation Unit), amely két fő egység, egy DGNSS (Differential Global Navigation Satellite System) és egy IMU (Inertial Measurement Unit) kombinációjából áll. A kettő együttes használatával érhető el az a megfelelő pontosság, amely a szimulációhoz is szükséges. Az IMU általában tartalmaz mindhárom tengely irányába egy lineáris gyorsulásmérőt, illetve egy rotációs elven működő mérőegységet, amelyek segítségével a mérés során a mozgás minden szabadsági foka lefedhető. Az INS eszköz esetén előnyös, ha olyan DGNSS alegységet tartalmaz, amelynek kettő antennája van, ezáltal képes a jármű irányát is mérni. A jobb, akár 1 cm-es pontosság elérése érdekében a DGNSS differenciális korrekciót használ, amely egy tesztelési helyszínre kitélepített bázisállomáshoz viszonyított lokalizációs adatokkal korrigálja a hagyományos műholdas rendszerből származókat. A korrekciós jel azonban érkezik más forrásból is, például celluláris hálózaton keresztül.

A tesztelt jármű esetén fontos megemlíteni, hogy amennyiben a SAE (Society of Automotive Engineers) által definiált jármű automatizáltságot leíró szinteken 3 vagy magasabb szintű járműről van szó, akkor elégséges lehet a fentebb említett INS egység beszerelése. Amennyiben viszont a jármű nem képes teljesen autonóm vezetésre, azaz 2 SAE szintű vagy az alatti, akkor szükség lehet egy kormány és pedárobotokból álló úgynevezett Driverless Test System (DTS) beszerelésére, amely képes vezetni a kontrolszoftver által meghatározott módon a járművet. [25] Ez azonban inkább ADAS funkciók tesztelésénél jellemzőbb.

### A SciL kimeneti oldali elemei és csoportosítási módjaik

A SciL kimeneti oldalán található elemek, vagy úgynevezett zavarások öt főbb típusba sorolhatók:

- VUT szenzor „spoofing”
- V2X kommunikációs „spoofing”
- Mozgó célobjektumok
- Kontrollált mozgású valós járművek
- Infrastruktúra elemek

A VUT szenzor „spoofing” lényegében a VUT szenzorrétegének megkerülésével operáló megoldás, amely során a szimulációs és kontrol szoftverből jövő virtuális információk közvetlenül a jármű döntéshozó rétegébe kerülnek bejuttatásra, ezáltal mintegy becsapva a járművet, amelyet ezzel lehet különböző interakciókra készíteni a virtuális szereplőkkel. Ez a megoldás hasonlít a ViL esetén alkalmazott módszerre, azonban ebben az esetben az információ a központi számítógépen futó szimulációból származik, és onnan kell rádiókommunikációs megoldás alkalmazásával eljuttatni a VUT fedélzetére. A megoldás előnye, hogy veszélyes, nehezen kivitelezhető forgalmi szituációkon alapuló szcenáriók is tesztelhetők a segítségével, biztonságosabbá és költségkímélőbbé téve a vizsgálatokat. Például lehetőség van ily módon forgalmi dugók, nagy járművek, például vonat vagy villamos szcenáriókban történő szerepeltetésére.

A V2X kommunikációs „spoofing” szintén a jármű kvázi becsapásán alapul, viszont jelen esetben a szimulált információ érkezik a valós V2X kommunikációs hálózaton

keresztül szabványos üzenetek formájába, amely nem igényel semmilyen szenzor megkezdést a VUT oldaláról. Az eljárás lényege, hogy a zavarás nem feltétlenül létezik a való világban, de mégis szabványos információ küldhető a létezéséről, amely bizonyos reakciókat válthat ki a VUT-ból. Például, ha a jármű olyan információt kap a V2X hálózaton keresztül, hogy az eredetileg választott útszakaszon forgalmi dugó alakult ki, dönthet úgy, hogy másik útvonalat választ. Hasonlóan egy nem belátható kereszteződést óvatosabban közelít meg, ha arról kap információt, hogy más járművek érkehetnek a többi irányból. Mind a V2X, mind pedig a VUT szenzor „spoofing” lehetőséget nyújthat a jármű kiberbiztonsági képességeinek, aspektusainak vizsgálatára is.

A zavaró célú mozgó célobjektumok két csoportra oszthatók. Az egyik csoportot a járművek, a másikat pedig a sérülékeny úthasználókat reprezentáló úgynevezett VRU (Vulnerable Road User) dummy-k alkotják. Ezeket az objektumokat jellemzően platformok hordozzák, amelyeknek attól függően, hogy például járművet vagy gyalogost hordoznak más-más mérettel és végsebességgel kell rendelkezniük, de alapvető tulajdonságaikban jellemzően megegyeznek. Ilyen tulajdonságok például, hogy a platformoknak ki kell bírniuk egy elütés esetén azt, ha áthajtanak rajtuk úgy, hogy nem okoznak sérülést a tesztelt járműben sem. Fontos a megfelelő rendelkezésreállítás, ezért kellően jó akkumulátor idővel kell rendelkezniük. Ahhoz, hogy az érzékelés szempontjából is megfelelőek legyenek a platformoknak kis radarkeresztmetszettel kell rendelkeznie, így nem zavarják meg a jármű szenzorait. A platformoknak továbbá szintén tartalmazniuk kell INS egységet azért, hogy egyrészt a mozgásukat a szimulációs szoftver is tudja követni, illetve a szoftver által végrehajtandó parancsokhoz az eszköz saját maga is a lokalizációs információit tudja visszacsatolásként felhasználni. Ez tehát rádiókommunikációs aspektusból is fontos, hiszen a szoftver és a platformok közötti két irányú adatkapcsolatot kell létesíteni, ahol szoftver irányába történő visszajelzésnél esetén fontos a kis késedelem. A platformokon túl az általuk hordozott dummy-knak is vannak közös tulajdonságaik. Például megfelelő radarreflexiójú anyagból kell készíteni őket, továbbá előnyös, ha elütésük esetén nem sérülnek jelentősen, hanem például olyan darabokra hullanak szét, amelyeket viszonylag rövid idő alatt egy újabb teszthez össze lehet építeni. Az VRU-k esetén fontos lehet, ha belülről fűthetők, hiszen így akár infrakamerás rendszerek is tesztelhetők velük. Sétáló gyalogos bábuk esetén fontos a láb mozgása, amely kiegészíthető a karok és a fej mozgásával, biciklis bábuk esetén pedig ilyen meghatározó a kerekek és a pedálozó láb mozgása is. A kerekek forgása motorbiciklis dummy-k esetén is fontos lehet, csakúgy, mint a rajtuk különböző testhelyzetben elhelyezett bábuk alkalmazása. Az emberi dummy-k mellett használhatunk még több különböző méretű állatot megformáló dummy-t is.

A mozgó célobjektumok mellett használhatunk még valós járműveket is, amelyek mozgását valamilyen módon kontrolálni kell a központi szoftverből. Ezek a valós járművek vagy DTS vagy akár a saját aktuátoraiuk segítségével is vezethetők, és jellemzően kevésbé biztonságkritikus szcenáriókban és szerepekben használatosak.

Kimenő oldali szereplőként még az olyan infrastrukturális elemeket említhetjük, mint a különböző forgalom irányító lámpák és aktív dinamikus forgalom korlátozó jelek, valamint a szenzorok zavarására alkalmas esőztető berendezés és különböző megvilágítások.



A kimeneti oldali elemek, zavarások háromféleképpen kategorizálhatók (1. Ábra):

- Valós vagy virtuális objektum
- Vezetéknélküli vagy vezetékes vezérlés
- Zárt vagy nyílt hurkú szabályozás

A valós objektumok közé tartoznak a mozgó objektumok, valós járművek és infrastrukturális elemek, tehát minden, amelynek van valós reprezentációja. A virtuális elemek és V2X információk csak a szimulációban léteznek és jellemzően „spoofing” technológiával jutnak el a VUT-be.

A vezetéknélküli vezérlésű eszközök jellemzően a mozgó objektumok és járművek, valamint azok a virtuális információk, amelyeket közvetlenül a VUT döntéshozó rétegébe kell bejuttatni a központi szoftverből. Az infrastrukturális elemek és a V2X hálózat jeladói azonban közvetlenül vezetéken csatlakozhatnak a központi szoftvert futtató szerverekhez így azok esetén nincs szükség vezetéknélküli kapcsolatra.

Azok az eszközök, amelyeknek módosítani kell a viselkedését a VUT mozgás alapján, zárt hurkú szabályozásúnak tekinthetők. Ezek közé tartoznak a mozgó objektumok és valós járművek, hiszen ezek esetén a kontrol szoftvernek tudnia kell, hogy hogyan és hol mozognak a teszt pályán a szcenárió közben. A többi típusú zavarás esetén jellemzően elég csak elküldeni a megfelelő vezérlési információt.

## A SCENARIO-IN-THE-LOOP ALKALMAZÁSÁNAK FŐBB JELLEMZŐI

Az előzőekben bemutatottak alapján látható, hogy a SciL alkalmazásának számos előnye van a klasszikus ViL eljárásokkal szemben, azonban a SciL koncepció alkalmazásának is vannak bizonyos korlátjai. Az alábbi két alfejezetben ezek a főbb előnyök és limitációk kerülnek részletesebben bemutatásra.

### A SciL felhasználásának előnyei

A SciL alkalmazásának egyik meghatározó jellemzője, hogy lehetőséget biztosít sokkal realiztikusabb tesztek elvégzésére, amely nagy előnyt jelent az autonóm járművek tesztelésében. Ugyanis a jelenleg főként ADAS funkciók tesztelésére használt tesztesetek nem használhatók fel teljes mértékben erre a célra, mivel az autonóm járművek esetében nem biztosítható minden esetben, hogy a jármű teljesítse a tesztesetek bementi kritériumait, ezzel érvénytelen teszt futásokat létrehozva, ezáltal a tesztek kiértékelése sem végezhető el a megszokott módszerekkel. A realiztikus környezetben végzett tesztek is jobban illeszkednek az autonóm járművekhez szemben az ADAS funkciók steril környezetben végzett tesztjeivel.

További előny, hogy a központi szimulációs kontroll szoftvernek köszönhetően a tesztesetek lefutása sokkal flexibilisebben kivitelezhető, ugyanis a szoftver képes az önvezető jármű viselkedéséhez igazítani a különböző zavarások mozgását, aktivációját, ezáltal folyamatos, jól időzített kihívás elé állítva a járművet. Ebből kifolyólag az előző pontban említettnek megfelelően a tesztelt járműnek nem kell szigorúan követni a tesztesetek érvényességi kritériumait, hiszen azokat a szoftver minden esetben a jármű viselkedéséhez igazítja. Ettől függetlenül a koncepció alkalmas lehet ADAS funkciók vizsgálatára is, ebben az esetben azonban a flexibilitásra kevésbé van szükség, valamint a realiztikus környezet megléte sem feltétlenül szükséges.

Ellentétben a közúton végzett teszteléssel, a SciL koncepció lehetőséget biztosít a reprodukálható tesztelésre is, amely fontos kritérium a jóváhagyási validációs folyamatokban. Még akkor is, ha a tesztesetek bementi feltételei változnak a jármű viselkedése alapján, de az általuk reprezentált forgalmi szituációk ugyanazon kihívások elé állítják a tesztelt járműveket.

A koncepció egy további előnye, hogy nem csak teljes járműrendszerek vagy funkciók tesztelésére nyújt lehetőséget, hanem segítségével akár egyéb mobilitással és közlekedési infrastruktúrával összefüggő, azokba integrálható eszközök tesztelését is elvégezhetjük. Például lehetőség van kommunikációs eszközök tesztelésére, mint például a különböző V2X eszközök, de akár okos forgalomirányítási megoldások, és egyéb ITS (Intelligent Transportation Systems) applikációk is megvizsgálhatók a segítségével. Ilyen esetben az önvezető járművek is válhatnak zavaró célú objektummá a tesztelt eszköz szemszögéből.

Egy további előny, hogy a központi szoftver szimulációs része jól felhasználható a valós mérésekből történő teszteset absztrakcióra, valamint ezen alapulva további scenáriók generálhatók a szimulációkra jellemző előnyök felhasználásával.

### **A SciL alkalmazásának korlátjai**

A SciL kritikusabb elemei közé sorolható a zárthurkú tesztelésben megjelenő kommunikációs és számítási késedelem kérdése. Annak érdekében, hogy a teszteszközök aktíválási kritériumainak flexibilitását fenn lehessen tartani, szükség van a mozgó objektumok, központi szoftverrel történő kis késedelmű, de mégis nagy hatótávú rádiókommunikációs összeköttetésére, beleértve mind a tesztelt járművet, mind pedig annak viselkedését befolyásoló zavarásokat. Ehhez hozzáadódhat még a szimuláció újra definiálásának számítási ideje, ezzel pedig a virtuális környezet és a valóság között olyan eltolódás jöhet létre, amely veszélyezteti a zavarások megfelelő időzítését, illetve a scenáriók reprodukálhatóságát. Már léteznek olyan megoldások, amelyek akár mindösszesen 10-20 ms késedelmet ígérnek, de a tesztesetben résztvevő szereplők potenciális nagy száma miatt, valamint az esetleges infrastruktúra okozta interferenciák további rizikófaktorként jelennek meg.

Ahogy az korábban már bemutatásra került, a SciL lehetőséget biztosít a ViL eljárásnál megismert virtuális zavarásokkal történő még komplexebb scenáriók létrehozására. Azonban ehhez fel kell adni a tesztelt járműtől való teljes függetlenséget, és meg kell kerülni a jármű szenzorrendszerét. Viszont erre csak akkor van lehetőség, ha a jármű gyártó megadja a hozzáférést a jármű megfelelő alrendszereihez, hogy a virtuális információ bejuttatható legyen. Továbbá a labor környezettel ellentétben a különböző szintű szenzor szimulációk elvégzése próbapályán további kihívást jelent. Szükség lehet nagy számítási képességű eszközök beszerelése, amelyek megfelelően aktiválhatók a központi szoftverből, vagy szélessávú rádiókommunikáció kapcsolatra, a nagy mennyiségű adat központi számítási egységekből történő továbbítására.

A folyamatos valós időben történő teszteset kontroláláshoz speciális szoftverekre is szükség van, amelyek jelenleg nem érhetők el a SciL központi szoftverének minden igényét kielégítő módon kereskedelmi forgalomban, így azokat le kell fejleszteni. Ehhez érdemes lehet összekapcsolt szimulációs megoldásokat, úgynevezett „co-simulation” technológiákat alkalmazni, amelyre azonban már találhatunk ígéretes példákat a gyakorlatban. [26] A megfelelő működéshez azonban szükség van a különböző hardverek és a szoftverek közötti interfészek létrehozására is, amely szintén további kihívásokat tartogat.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A SciL koncepció egy olyan újszerű tesztelési koncepció, amely lehetőséget biztosít az önvezető járművek reprodukálható módon, biztonságos környezetben történő tesztelésére. A SciL központi szoftvere képes kontrollálni a teszteléshez használt valós objektumokat, de ezen felül virtuális zavarások segítségével is képes kihívások elé állítani a tesztelt járművet. A koncepció előnye, hogy realizisztikus tesztkörnyezetet biztosít, amelyben a futtatott scénáriókat képes flexibilisen a VUT mozgásához igazítani, ezáltal fenntartva a megismételhetőséget, valamint felhasználható különböző ITS eszközök tesztelésére és újabb scénáriók létrehozására is. Fontos azonban megjegyezni, hogy a munkában bemutatott komplex SciL koncepció még nem került teljesen megvalósításra, de már léteznek kutatások és megoldások, amelyek a koncepció alapján kerültek realizálásra. [27] A SciL vizsgálata és teljeskörű létrehozása így további kutatási feladatoknak adhat teret.

## ALKALMAZOTT RÖVIDÍTÉSEK

ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DTS	Driverless Test System
EuroNCAP	European New Car Assessment Programme
HiL	Hardware-in-the-Loop
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
ITS	Intelligent Transportation Systems
LiDAR	Light Detection and Ranging
MiL	Model-in-the-Loop
SAE	Society of Automotive Engineers
SciL	Scenario-in-the-Loop
SiL	Software-in-the-Loop
ViL	Vehicle-in-the-Loop
VRU	Vulnerable Road User
VUT	Vehicle Under Test
V2X	Vehicle-to-everything communication

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).

- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] N. Katzorke, M. Moosmann, R. Imdahl, and H. Lasi, “A Method to Assess and Compare Proving Grounds in the Context of Automated Driving Systems,” in *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Sep. 2020, pp. 1–6. doi: [10.1109/ITSC45102.2020.9294310](https://doi.org/10.1109/ITSC45102.2020.9294310).
- [7] B. Liu, H. Zhang, and S. Zhu, “An Incremental V-Model Process for Automotive Development,” in *2016 23rd Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)*, Dec. 2016, pp. 225–232. doi: [10.1109/APSEC.2016.040](https://doi.org/10.1109/APSEC.2016.040).
- [8] N. Hansen, N. Wiechowski, A. Kugler, S. Kowalewski, T. Rambow, and R. Busch, *Model-in-the-Loop and Software-in-the-Loop Testing of Closed-Loop Automotive Software with Artest*. Gesellschaft für Informatik, Bonn, 2017. Accessed: Jan. 02, 2024. [Online]. Available: <https://dl.gi.de/items/bab4a8a8-6908-4534-92f0-2e6bbed1892f>
- [9] 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). Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022R1426> (accessed on 4 April 2023).
- [10] UNECE: New Assessment/Test Method for Automated Driving (NATM) Guidelines for Validating Automated Driving System (ADS). 2022. Available online: <https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE-TRANS-WP.29-2022-58.pdf>
- [11] UNECE 1958 Agreement: Addendum 139–Regulation No. 140: Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars with Regard to Electronic Stability Control (ESC) Systems. 2017. Available online: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2017/R140e.pdf>
- [12] EuroNCAP ASSESSMENT PROTOCOL – OVERALL RATING, Version 9.1.1 2021. Available online: <https://cdn.euroncap.com/media/67890/euro-ncap-assessment-protocol-overall-rating-v911.pdf>
- [13] R. Donà, S. Vass, K. Mattas, M. C. Galassi, and B. Ciuffo, “Virtual Testing in Automated Driving Systems Certification. A Longitudinal Dynamics Validation Example,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 47661–47672, 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3171180](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3171180).
- [14] A. Diewald *et al.*, “Radar Target Simulation for Vehicle-in-the-Loop Testing,” *Vehicles*, vol. 3, no. 2, Art. no. 2, Jun. 2021, doi: [10.3390/vehicles3020016](https://doi.org/10.3390/vehicles3020016).
- [15] S. A. Fayazi, A. Vahidi, and A. Luckow, “A Vehicle-in-the-Loop (VIL) verification of an all-autonomous intersection control scheme,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 107, pp. 193–210, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.trc.2019.07.027](https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.07.027).

- [16] T. Bock, „Vehicle in the Loop–Test und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme” in *Audi Dissertationsreihe*, Vieweg: Göttingen, Germany, 2008; Volume 10.
- [17] M. F. Drechsler, J. Peintner, F. Reway, G. Seifert, A. Riener, and W. Huber, “MiRE, A Mixed Reality Environment for Testing of Automated Driving Functions,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 71, no. 4, pp. 3443–3456, Apr. 2022, doi: [10.1109/TVT.2022.3160353](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3160353).
- [18] H. Németh, A. Hányi, 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).
- [19] 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).
- [20] Z. Szalay, Z. Hamar, and Á. Nyerges, “Novel design concept for an automotive proving ground supporting multilevel CAV development,” *International Journal of Vehicle Design*, vol. 80, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2019, doi: [10.1504/IJVD.2019.105061](https://doi.org/10.1504/IJVD.2019.105061).
- [21] B. Tóth 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.
- [22] M. Dupuis and H. Grezlikowski, “OpenDRIVE® – An open standard for the description of roads in driving simulations,” presented at the Driving Simulation Conference, Paris, France, 4–6 October 2006; pp. 25–36.
- [23] K. Gangel *et al.*, “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/actatech-jaur.00606](https://doi.org/10.14513/actatech-jaur.00606).
- [24] V. Tihanyi *et al.*, “Towards Cooperative Perception Services for ITS: Digital Twin in the Automotive Edge Cloud,” *Energies*, vol. 14, no. 18, Art. no. 18, Jan. 2021, doi: [10.3390/en14185930](https://doi.org/10.3390/en14185930).
- [25] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE Ground Vehicle Standard J3016\_202104, 2021, Available online: [https://saemobilus.sae.org/content/j3016\\_202104](https://saemobilus.sae.org/content/j3016_202104)
- [26] 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).
- [27] Z. Szalay, M. Szalai, B. Tóth, 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).