

## MODELLVALIDÁCIÓS MÓDSZERTAN JÁRMŰDINAMIKAI SZIMULÁCIÓKHOZ

### MODEL VALIDATION METHODOLOGY FOR VEHICLE DYNAMICS SIMULATIONS

Widner Attila, MSc, [widner.attila@edu.bme.hu](mailto:widner.attila@edu.bme.hu), Dr. Tettamanti Tamás, [tettamanti.tamas@kjk.bme.hu](mailto:tettamanti.tamas@kjk.bme.hu)

#### ÖSSZEFOGLALÁS

Járműdinamikai modelleket széles körben használnak az autóipar számos területén. Az egyes modellek alkalmazhatósága attól függ, hogy mennyire képesek utánozni a valós jármű viselkedését. Minden szimulációs modellnek át kell esnie egy alapos vizsgálati folyamaton, amelyet modell validálásnak neveznek. Bár a járműdinamikai szimulációs modellek, és általánosságban a szimulációs modellek validálásának módszertana jól megalapozott terület, a szerzők legjobb tudása szerint még mindig hiányzik egy keretrendszer, amely a járműdinamikai modellek validálására átfogó módszertant adna. A kutatás célja egy módszertani keretrendszer kidolgozása a járműdinamikai modellek validálásához. Jelen cikk célja a keretrendszer magas szintű áttekintése, bemutatva a főbb komponenseket és a kapcsolódó feladatokat, valamint a validációs metrikával kapcsolatos fontosabb tényezők tárgyalása.

#### ABSTRACT

There are various applications for vehicle dynamics models in the automotive industry. Each model's applicability is based on how well it can mimic the behaviour of the real vehicle. Every simulation model must pass through a testing procedure known as model validation. To the best of the authors' knowledge, a framework for vehicle dynamics model validation still does not exist, even though vehicle dynamics simulations and computational model validation in general are well-established fields. The research objective is to create a methodological framework for validating vehicle dynamics models. The goal of this paper is to give a high-level overview of the framework, outlining its main components and associated tasks while also addressing some concerns about validation metrics.

#### 1. BEVEZETÉS

A járműdinamikai szimulációk széles körben elterjedtek és egyre fontosabbá válnak a járműfejlesztés számos területén, mivel a szimulációk alkalmazása jellemzően költséghatékonyabb, biztonságosabb és gyorsabb, mint a valós járműtesztek. Továbbá a szimuláció során a paraméterek széles köre könnyen módosítható és rövid időn belül, nagyon rugalmas módon tesztelhető.

A modell validáció az a vizsgálati folyamat, amelyet általában a modellfejlesztő és az adott valós rendszert ismerő mérnökök végeznek annak érdekében, hogy biztosítsák, a modell kellő pontossággal reprezentálja a valós rendszert [1,2]. Az említett előnyök azonban csak akkor jelentkeznek, ha a modell és paraméterei kellően pontosak, és a szimulációs eredmények jól tükrözik a valós jelenséget. A kifinomult járműdinamikai modellek számos paraméterrel rendelkeznek, amelyek közül sok nehezen mérhető. A validációs folyamat ezért rengeteg tesztelést és mérést igényel, ami drága és időigényes.

Annak ellenére, hogy a járműdinamikai szimulációs modellek és a számítási modellek validációjának módszertana jól megalapozott témák, továbbra is szükség van egy átfogó keretrendszerre a járműdinamikai modellek validációjához [3].

A kutatás célja egy teljes módszertani keretrendszer létrehozása a járműdinamikai modellek validálásához. Jelen cikk célja, hogy leírja a javasolt módszertan magas szintű áttekintését, bemutatva a fő komponenseket és a hozzájuk kapcsolódó tevékenységeket, valamint a járműdinamikai modellek validálásával kapcsolatos bizonyos kritikus szempontokat, mint például a validálási metrikákat.

A javasolt keretrendszer fontos eleme egy kifinomult járműre szerelhető menetdinamikai

mérőrendszer, amellyel a dinamikus tesztek során számos mozgásjellemző és jármű állapotjellemző nagy pontossággal mérhető. Járműdinamikai rendszereknél ezek a mozgásjellemzők, állapotjellemzők általában az alábbiak lehetnek:

- x, y, z pozíció (GPS),
- jármű sebességnagyság és irány,
- hossz-, oldal-, és függőleges gyorsulás,
- dőlési, bólintási és legyezési szögpozíció,
- gumibroncs oldal-, és hosszirányú kúszás,
- dinamikus kerékdőlés,
- gumibroncs erők és nyomatékok,
- stb.

A validációs mérőszámoknak – amelyek a modell hitelességét (validitását) számszerűsítik – figyelembe kell venniük a valós mérések bizonytalanságát. Ennek eredményeként a validálási folyamathoz az összes releváns rendszer kimeneti mennyiség pontos mérésére van szükség. Továbbá egy ilyen mérőrendszer használata lehetővé teszi számos járműparaméter becslését a dinamikus tesztelés során, ami lehetőséget biztosít arra, hogy adott esetben a költséges mérések (motorfékpadi mérések, K&C mérések, stb.), helyett ezen becslő algoritmusokra hagyatkozva határozzuk meg az egyes alrendszerek paramétereit.

A járműdinamikai szimulációs modellek meglehetősen bonyolulttá váltak, mivel a jármű alrendszerek is összetettek és a szimulációs modellek igyekeznek minden alrendszert részletesen kezelni. E tendencia szerint ezen modellek validálási folyamata is komplex feladat.

## 2. IRODALOMKUTATÁS

A járműdinamikai modell-validáció területe két fő összetevőből áll: a számítási modellvalidáció és járműdinamika (járműmodellek és járműparaméter mérések, becslés). Az általános modellvalidáció terület jól megalapozott. Carson szerint a validáció és verifikáció célja egy olyan modell, amely pontos, ha arra használjuk, hogy előre jelezze az általa képviselt valós rendszer teljesítményét, vagy megjósolja a teljesítmény különbségét két forgatókönyv vagy két modellkonfiguráció között. A validációs folyamat a modell hitelességének javításához is vezet a döntéshozók szemében [1, 3]. Sok szakértő szerint nincs abszolút valid modell [4], [5, 6]. Ezért mindig lesznek eltérések a mért fizikai jelenség és a szimulációs eredmények között. A szimuláció célja, hogy választ adjon egy konkrét kérdésre, vagy információt adjon a

mérnökök számára a döntéshozatali folyamat során, ezért a modellt csak az adott tartományban kell validálni. Bármilyen további validálási munka javíthatja a modellt, de ha erre nincs szükség, akkor az feleslegesen megnöveli a folyamat költségét és időigényét.

A járműdinamikai modellek matematikai háttere jól megalapozott, az egyik legkorábbi munka ebben a témában 1946-ban készült. Azóta számos munkát mutattak be a járműdinamika területén, köztük Milliken: Race Car Vehicle Dynamics [7], Zomotor: Gépjármű Menetdinamika [8], Pacejka: Tyre and Vehicle Dynamics [9].

A járműmodell validáció témában is sok írás található, de Kutluay szerint „Sok publikáció, amely azt állítja, hogy bemutat egy validálási módszert vagy technikát, általában csak egy módszertan alkalmazását tárgyalja egy egyedi esetre.” [3] A szerzők legjobb tudomása szerint még hiányzik a járműdinamikai szimulációs területhez kapcsolódó átfogó általános módszertani keretrendszer. A legtöbb alkalmazás csak vizuális összehasonlításra és szubjektív megítélésre támaszkodik.

Legtöbbször a modellt kidolgozó csapat dönti el, hogy a szimuláció valid-e. Ez az egész folyamatlanc csökkenti ezeknek a modelleknek a hitelességét.

A szimulációs eredmények csak az üzemi feltételek bizonyos tartományán belül érvényesek. Egy modell valószínűleg csak egy adott feladatra érvényes, például egy validált oldaldinamikai modell felfüggesztési szabadságfokkal nem feltétlenül alkalmas az utazás kényelmének vizsgálatára [3]. Számos bemutatott módszertan statisztikai elemzésen alapul, ezért minden egyes tesztesethez több kísérleti tesztet kell végezni, hogy elegendő adatot gyűjtsünk és csökkentsük a véletlenszerű hiba befolyását. Számos szakértő támogatja azt az elképzelést, hogy a járműdinamikai modell validálásának magában kell foglalnia az állandósult állapotú és a tranziensteszteket, valamint az idő- és frekvenciatartomány elemzését is.

A modell érvényesítésénél figyelembe kell venni a modell alkalmazási területét, mivel a validálás mértékének mindig van határa, és a modellnek egy adott kérdésben (egy adott tartományban) kell hasznosnak lennie.

## 3. VALIDITÁSI METRIKA

A legtöbb publikált menetdinamikai modellvalidációnál nem alkalmaznak sem

validációs mérőszámokat, sem statisztikai elemzést. Jellemzően szubjektív és kvalitatív módon értékeli a modellt a valós teszt- és szimulációs eredmények vizuális összehasonlításán keresztül [3]. Egy modell validációs keretrendszernek tartalmaznia kell egy módszert a kimenetek összehasonlítására, amely számszerűsíti az eltéréseket. Oberkamp és Barone munkájukban különböző jellemzőket tárgyalt, amelyeket a validációs metrikába be kell építeni vagy ki kell zárni [10]. Oberkamp [11] és Trucano [12] azzal érveltek, hogy a számítási és kísérleti eredmények összehasonlításakor a mérési bizonytalanságokat és a hibákat is számszerűsíteni kell. Rendszer kimenet bármilyen típusú fizikailag mérhető mennyiség lehet, vagy lehet olyan mennyiség, amely mérésekből következtetett. Például a rendszer kimenet magában foglalhatja a számított vagy mért mennyiségek származékjait, integráljait vagy összetettebb adatfeldolgozását.

A módszertanban alkalmazott validitási metrika Sarin és társai [13] által kidolgozott mérőszámokra épül. A mérőszámok három fizikailag értelmezhető jellemző alapján (fázis, nagyság és topológia) osztályozzák a hibakomponenseket. Normákat, keresztkorrelációs méréseket és DTW (Dynamic Time Warping) algoritmusokat alkalmaznak az eltérések számszerűsítésére. Fázishiba esetén keresztkorrelációs módszert alkalmaznak. Az amplitúdó hiba elemzése az adatsorok közötti globális, lokális fáziskülönbség és a meredekségkülönbségek minimalizálása után történik - mivel a meredekségkülönbség topológiai hiba, nem pedig amplitúdó hiba. A DTW-t a helyi fázis- és meredekségkülönbségek csökkentésére használják. Ezt követően L1 vektornormát használnak a relatív nagyság különbségek mérésére. A topológia hibát – a meredekség eltéréseinek mértékét – a fázis hibával időben eltolva, DTW-vel módosított csatornák deriváltja alapján számítják ki. Ezután az L1 normát használják a topológia hiba számszerűsítésére.

A metrikának a [8] -ban leírtak alapján figyelembe kell vennie a valós mérőrendszer mérési bizonytalanságát. A mérési pontosságot súlyszámmal vesszük figyelembe, így a pontosabb szenzorok által mért adatok magasabb szorzót kapnak a pontatlanabbakkal szemben. Továbbá a modell felhasználásától függően egyes kimenetek fontosabbak lehetnek, így ezek

figyelembevételére további súlyszámokat vezetünk be.

#### 4. A KERETRENDSZER BEMUTATÁSA

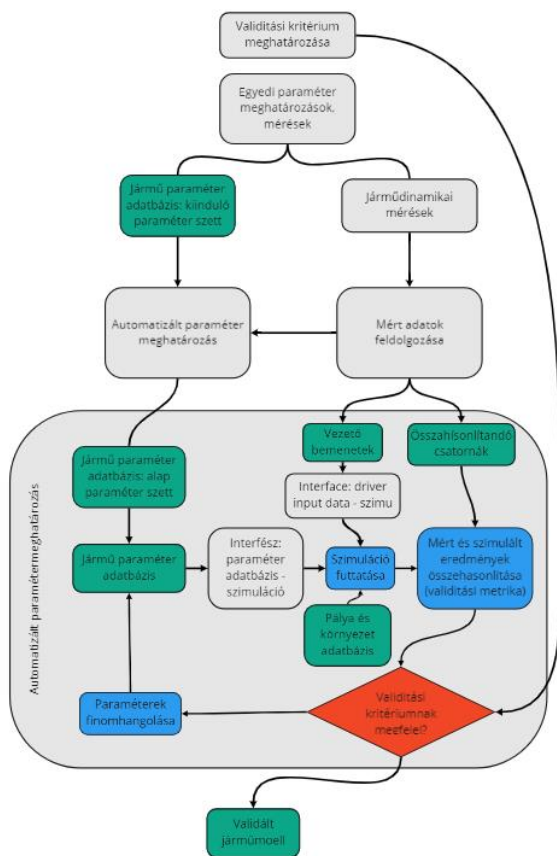
A fejezetben bemutatásra kerül a járműdinamikai modellekhez javasolt validációs keretrendszer. Célunk egy olyan rendszer létrehozása, amely iránymutatást ad a legtöbb járműdinamikai modell validálásához. A keretrendszert az 1. ábra mutatja.

A validitási kritériumok meghatározását követően - amelyek a validitási metrika azon értékei, amely felett a modellt megfelelőnek tekintjük - minden fontos alrendszerre érzékenységvizsgálatot kell elvégezni, ez és a paraméter mérési, becslési módszerek pontossága, idő és költségvonzata alapján ki lehet választani a megfelelő mérési módszereket. A validációs metrikákhoz alapos, átfogó menetdinamikai mérések elvégzése szükséges. Előzetesen célszerű az egyedi paraméter méréseket elvégezni, ezek mellett a menetdinamikai mérőrendszerhez tartozó paraméterek mérése is elvégezhető – például a gyorsulásérzékelő helyzete a tömegközépponthez képest. Ezek kritikusak a járműdinamikai mérések megfelelő utófeldolgozásához. A járműdinamikai méréseket egy kifinomult mérőrendszerrel célszerű végezni, amely minden fontos mozgást képes mérni, olyan jelenségeket is mint a jármű karosszériájának mozgása (legyezés, bólintás, dőlés), felfüggesztés mozgása, abroncsok erői és nyomatékai, oldaleszűzési szög, kerékdőlésszög stb.

Majd a mérések alapján - a következő két blokkban - a járműmodell paramétereinek becslését egy automatizált rendszer végzi, amely kimenetként megadja a szimulációs környezet alap paraméterkészletét a paraméterekhez tartozó mérési/becslési pontossággal. Továbbá a feldolgozást követően a járműmodell vezérlő bemenetei (kormányzóg, gáz-, fék- és kuplungpedál erő/pozíció, sebességi fokozat) és a mért rendszerkimenetek (modellenként változó, de általában járműsebesség, hossz- és oldalgyorsulás, legyezési sebesség stb.) rendelkezésre állnak a szimulációs kimenetekkel való összehasonlításához. Végül a validálás rekurzív folyamatát egy arra alkalmas géptanulási algoritmussal végezzük el, az iteratív folyamat fő lépéseit az 1. ábrán a kék és piros alakzatokkal mutatjuk be.

- A szimuláció futtatása a járműtesztekből származó vezérlő bemenetek felhasználásával.
- A két adathalmaz (szimuláció, mérési eredmények) összehasonlítása (validitási metrikák számításával), majd ezen metrikák összehasonlítása a kívánt értékkel.
- Ha a kritériumok nem teljesülnek, akkor a fent említett bizonytalansági sávban módosítja az algoritmus a paramétereket.

A folyamat akkor ér véget, ha az érvényességi feltételek teljesülnek.



1. ábra. Járműdinamikai modellvalidációs keretrendszer blokkvázlata

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikációban szereplő kutatást a BME az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

## 13. IRODALOM

- [1] J. Carson, „Model verification and validation,” Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2002.
- [2] 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
- [3] E. Kutluay, H. Winner, „Validation of vehicle dynamics simulation models – a review,” Vehicle System Dynamics, 2014.
- [4] R. Sargent, „Verification and validation of simulation models,” Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010
- [5] I. Babuska, J. T. Oden, “Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts,” Computer methods in applied mechanics and engineering, 2004
- [6] R. W. Logan, C. K. Nitta, “Verification & validation: process and levels leading to qualitative or quantitative validation statements,” SAE transactions, 2004
- [7] W. F. Milliken, D. L. Milliken, Race car vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers 1995
- [8] Zomotor Á. “Gépjármű Menetdinamika, 2004
- [9] H. Pacejka, Tire and vehicle dynamics. Elsevier, 2005
- [10] W. Oberkampf, M. Barone, “Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics,” Journal of Computational Physics, vol. 217, 2006
- [11] W. Oberkampf, T. Trucano, “Validation methodology in computational fluid dynamics,” Fluids 2000 Conference and Exhibit,
- [12] W. Oberkampf, T. Trucano, “Verification and validation in computational fluid dynamics,” Progress in aerospace sciences, 2002
- [13] H. Sarin, M. Kokkolaras, G. Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, R.-J. Yang „A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Models With Emphasis on Vehicle Safety Applications” 2009