

# 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, PhD  
[tettamanti.tamas@kjk.bme.hu](mailto:tettamanti.tamas@kjk.bme.hu)

### ÖSSZEFOGLALÁS

Járműdinamikai modelleket széles körben használnak az autópár számos területén. Az egyes modellek használhatósága 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, mely 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 sector. Each model's usability is based on how well it can mimic the phenomenons 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, despite the fact that 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, hogy 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, mellyel a dinamikus tesztek során számos mozgásjellemező és jármű állapotjellemző nagy pontossággal mérhető. Járműdinamikai rendszereknél ezek a mozgásjellemezők, 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 nyomaték
- 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 tesztek során, ami lehetőséget biztosít arra, hogy adott esetben a költséges mérések (motorfékpad mérések, K&C mérések, stb.), helyett ezen becselő 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 idejét.

A járműdinamikai modellek matematikai háttere jól megalapozott, az egyik legkorábbi munka ebben a témában 1946-ban született. 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 folyamatlánc 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 csökkentjük a véletlenszerű hiba befolyását. Számos szakértő támogatja azt az elképzelést, hogy a járműdinamikai modell validálásának magában kell foglalnia az állandósult állapotú és a tranziens tesztek, 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 modelleknek egy adott kérdésben (egy adott tartományban) kell hasznosnak lenniük.

### 3. VALIDITÁSI METRIKA

„A legtöbb publikációban nem használnak validációs mérőszámokat és nem végeznek statisztikai elemzést. Ehelyett szubjektív és kvalitatív ítéletet hoznak a valós teszt- és szimulációs eredmények vizuális összehasonlításán keresztül.” [3] Egy modell validációs keretrendszernek tartalmaznia kell egy módszert a kimenetek összehasonlítására, mely számszerűsíti az eltéréseket. Oberkampff és Barone munkájukban különböző jellemzőket tárgyalt, amelyeket a validációs metrikába be kell építeni vagy ki kell zárni [10]. Oberkampff [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 validációs 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.

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.

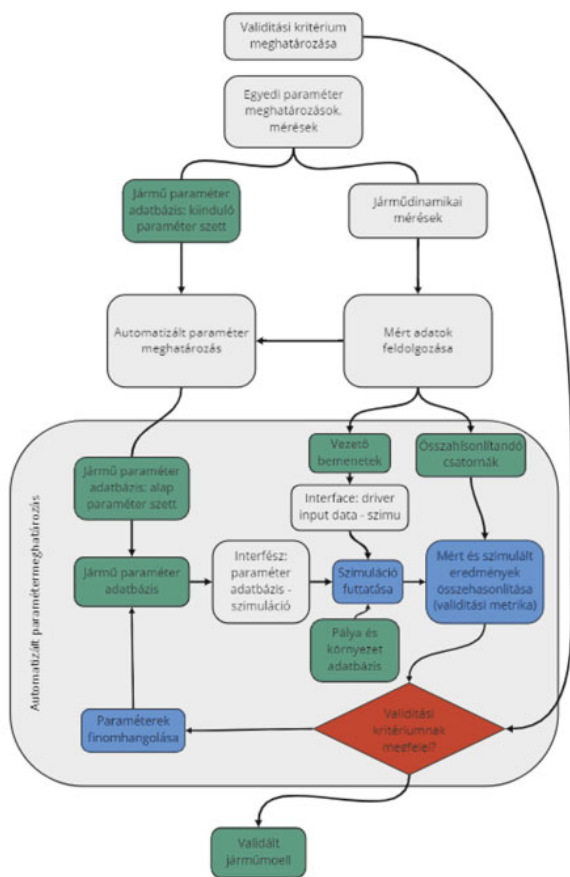
### 4. A KERETRENDSZER BEMUTATÁSA

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 validációs kritériumok meghatározását követően - melyek a validációs metrika azon értékei mely 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 tömegközépponthoz 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 nyomatókai, oldalcsúszási szög, kerékdőlésszög stb.

Majd a mérések alapján - az következő két blokkban - a járműmodell paramétereinek becslését egy automatizált rendszer végzi, mely kimenetként megadja a szimulációs környezet alap paraméterkészletét a paraméterekhez tartozó mérési/becslési pontossággal. Továbbá az feldolgozást követően a járműmodell vezérlő bemenetei (kormányzó, 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).

A modell validálása és a mérések a Neumann János Egyetem járműdinamikai mérőrendszerével történtek.

## 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



# CONTENTS

<i>1. Talal Alsardia, Dr. László Lovas:</i> FRICTION VARIATION IN A BOLTED JOINT DURING CYCLIC TIGHTENING .....	5
<i>2. Ayham Aljawabrah, Dr. László Lovas:</i> KINEMATICAL MODEL OF THE DOG CLUTCH SHIFTING .....	9
<i>3. Hussein Alzyod, Dr. Peter Ficzere, Prof. Lajos Borbas:</i> INVESTIGATION THE INFLUENCE OF THE PRINTING PARAMETERS ON WARPING IN FFF 3D PRINTED ABS USING NUMERICAL SOLUTION .....	13
<i>4. Dr. Nádasdi Ferenc, Dr. Keszi- Szeremlei Andrea:</i> TECHNOLOGY DEVELOPMENT USING VALUE ANALYSIS .....	17
<i>5. Sári Zoltán:</i> THE POSSIBILITY OF SOLAR CELL SUPPORTED ENERGY MANAGEMENT IN HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES .....	22
<i>6. Widner Attila, Dr. Tettamanti Tamás:</i> MODELVALIDATION METHODOLOGY FOR VEHICLE DYNAMICS SIMULATIONS .....	32

# GÉP

## INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám

**President of Editorial Board**

Vesza József

**General Editor**

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**Deputy**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

**DEAR READER,**

I'm happy to announce that in September 2022 the GTE Construction Division could organise the 7<sup>th</sup> Conference on the Professional Culture of Mechanical Engineering in an industrial setting, the Knorr-Bremse Rail Systems Budapest hosted the event..

It is an outstanding success that more presenters and participants registered for each of our conferences than ever, and the audience was able to follow a total of 34 presentations.

The plenary session was started by more intriguing presentations with revolutionary topics, like solar cells supported energy management or the applications of artificial intelligence in mechanical engineering. Also worth mentioning is Jónás Szabolcs' cultural history lecture on László Bíró and his invention of the biro pen.

In the following parallel meetings we could listen to lectures on the following topics:

The section lectures were held in 3 sections and 6 topics:

- 1A Construction
- 1B Additive manufacturing
- 2A Technology
- 2B Simulation & modeling
- 3A Value Analysis & Ergonomy
- 3B Measurement & testing

This edition of GÉP magazine contains written formal of six lectures.

Based on the success of our conference, we plan to have the 8th Professional Culture of Mechanical Engineering Conference in 2023.

We thank the sponsors of our conference:

- MTA Department of Engineering Sciences, Scientific Committee on Mechanical Engineering,
- BME Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine and Product Design,
- Knorr-Bremse Rail Systems Budapest Ltd.,
- SZTAKI Computer and Automation Research Institute

*Yours sincerely, on behalf of the organizing committee:*

*Attila Metál*

*Secretary of GTE Construction Division*

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: http://www.gepujsag.hu • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP

(https://eshop.posta.hu/storefront/), via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

**The published articles have been reviewed.** • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary



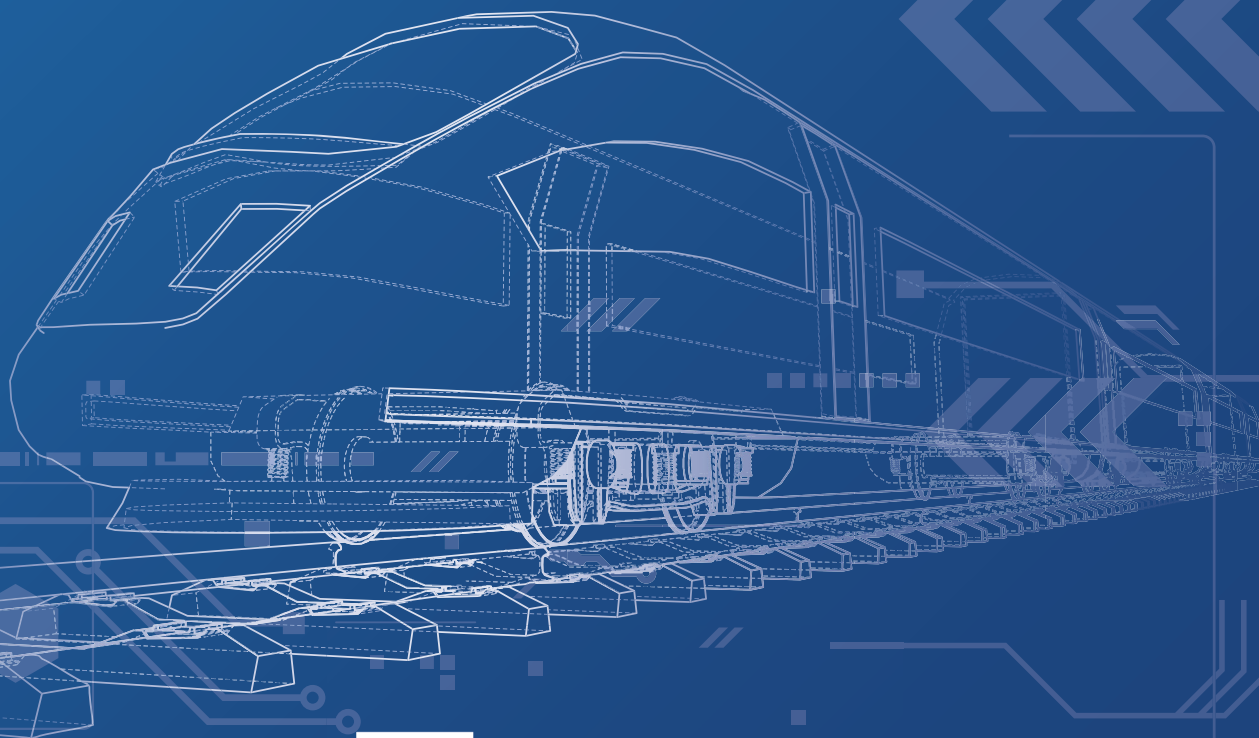
# MÉRNÖKI CSÚCSTELJESÍTMÉNY MINDEN MEGÉRKEZÉS MÖGÖTT

45 SZABADALOM

DÍJNYERTES FÉKVEZÉRLŐ- ÉS FEDÉLZETI RENDSZEREK

GYÁRTÁSKÖZELI FEJLESZTÉSEK

HIGH-TECH ESZKÖZÖK



**KNORR-BREMSE**