

Horváth Krisztián¹ 

Többtest-dinamika és kapcsolt szimulációk alkalmazása a védelmi iparban

Applications of Multi-Body Dynamics and Coupled Simulations in the Defense Industry

A többtest-dinamika (MBD) és a rugalmas többtest-dinamika (MFBD) módszerek alkalmazása a védelmi iparban lehetővé teszi a mechanikai rendszerek mozgásának, terhelésének és kölcsönhatásainak pontos szimulációját, még a prototípusgyártás előtt. A tanulmány áttekinti a korszerű MBD-alapú szimulációk fő területeit, beleértve a mechanikai mechanizmusok, pilóta nélküli rendszerek, lánctalpas és kerekes járművek, valamint speciális űr- és repülési rendszerek modellezését. Kiemeljük a co-szimulációs lehetőségeket CFD-vel, DEM-mel/MPS-szel és valós idejű vezérléssel (HIL/SIL), valamint az optimalizációs és érzékenységvizsgálati módszerek szerepét. A bemutatott példák és workflow-modellek rámutatnak arra, hogy az MBD-technológia integrálása a fejlesztési lánc korai szakaszában növeli a megbízhatóságot, csökkenti az NVH-problémákat, rövidíti a fejlesztési időt, és költséghatékonyabbá teszi a tervezést.

Kulcsszavak: többtest-dinamika, rugalmas test, digitális iker, DEM, MPS, lánctalpas jármű, NVH, védelmi ipar

The application of Multibody Dynamics (MBD) and Flexible Multibody Dynamics (MFBD) in the defence industry enables accurate simulation of mechanical systems' motion, loads, and interactions prior to physical prototyping. This paper reviews key areas of modern MBD-based simulations, including modelling of mechanical mechanisms, unmanned systems, tracked and wheeled vehicles, and specialised aerospace systems. Co-simulation capabilities with CFD, DEM/ MPS, and real-time control (HIL/SIL) are highlighted, alongside the role of optimisation and sensitivity analysis methods. The presented examples and workflow models demonstrate that integrating MBD technology into the early stages of the development chain increases reliability, reduces NVH issues, shortens development time, and makes the design process more cost-efficient.

¹ Tudományos segédmunkatárs, Széchenyi István Egyetem, e-mail: horvath.krisztian@ga.sze.hu

Keywords: *Multi-Body Dynamics, Multi-Flexible Body Dynamics, defence industry, digital twin, NVH analysis, coupled simulations*

Bevezetés

A védelmi ipar fejlesztési folyamatai az utóbbi évtizedben jelentős mértékben támaszkodnak a számítógépes szimulációkra, különösen a töbtest-dinamikai (*multi-body dynamics*, MBD) és rugalmas testdinamikai (*multi-flexible body dynamics*, MFBD) módszerekre.² Ezek a modellek lehetővé teszik a járművek, fegyverrendszerek és egyéb komplex mechanizmusok mozgásának, terhelésének és dinamikus viselkedésének pontos előrejelzését anélkül, hogy költséges vagy időigényes fizikai prototípusokra lenne szükség.³

A tanulmány célja, hogy átfogó irodalmi áttekintést adjon a töbtest-dinamika és rugalmas testdinamika védelmi ipari alkalmazásairól, különös tekintettel a legfrissebb hazai és nemzetközi kutatási irányokra, módszertani fejlesztésekre és integrációs lehetőségekre. Ennek keretében bemutatjuk a digitálisiker-technológia, a valós idejű vezérlés-egysztimuláció, a *time signal generator* (TSG) eljárások, valamint a diszkrét elemes (DEM) és mozgó részecske szimuláció (MPS) módszerek töbtest-dinamikai modellekbe való integrációjának legújabb eredményeit.

A feldolgozott szakirodalom kitér a láncaltapas és amfibia (kételtű) járművek terepi és hidrodinamikai viselkedésének szimulációjára, repülőgép- és űrmechanizmusok dinamikai vizsgálataira, valamint a zaj- és rezgéselemzések (NVH) területén elért fejlesztésekre. A bemutatott kutatási eredmények rávilágítanak arra, hogy a kapcsolt szimulációs módszerek és a virtuális prototípusok alkalmazása nem csupán a tervezési ciklus hatékonyságát növeli, hanem stratégiai előnyt is biztosíthat a védelmi rendszerek teljesítményének, megbízhatóságának és túlélőképességének javításában.

A töbtest-dinamika alkalmazásának egyik kulcsterülete a láncaltapas járművek talaj-gép kölcsönhatásának modellezése, ahol a valóságghű viselkedés leírása a terramechanikai egyenletek és rugalmas testmodellek együttes alkalmazását igényli.⁴ Hasonlóan összetett feladat az amfibia járművek tervezése, ahol a szárazföldi mobilitás mellett a vízi manőverezhetőség optimalizálása is szükséges, amely CFD és töbtest-dinamika egyútszimulációval érhető el.⁵

Az utóbbi években nagy figyelmet kapott a digitális iker (*digital twin*) technológia alkalmazása, amely lehetővé teszi egy valós rendszer teljes körű virtuális másolatának létrehozását és annak valós idejű összekapcsolását a tényleges vezérlőrendszerrel.⁶ Ez különösen előnyös a katonai és haditechnikai járművek és fegyverrendszerek üzemeltetésének optimalizálásában, a karbantartási igények előrejelzésében, valamint a különféle üzemeltetési forgatókönyvek virtuális tesztelésében.⁷

² DANG et al. 2024.

³ LIU et al. 2021.

⁴ MOCERA et al. 2020.

⁵ FAN et al. 2025.

⁶ DECSI-SZALAI 2022.

⁷ ABRO-ABDALLAH 2024.

A TSG (*time signal generator*) és egyéb inverz gerjesztésgeneráló eljárások alkalmazása lehetőséget ad a valós mérésekből származó gyorsulási és terhelési adatok laboratóriumi vagy szimulációs környezetben való reprodukálására.⁸ Ezzel például egy harcjármű teljes élettartamát jellemző pályaterhelések reprodukálhatók egy négyponos tesztpadon, és így a fáradásos élettartam is előrejelezhető.⁹

További fontos kutatási irány a DEM (*discrete element method*) és MPS (*moving particle simulation*) módszerek integrációja az MBD-modellekbe, ami lehetővé teszi a szemcsés és folyadékös közegek valósághű modellezését. Ez kulcsfontosságú a deformálódó talajon való haladás, valamint a vízi és kételtű haditechnikai járművek teljesítményének szimulációja során.¹⁰

A kutatások hangsúlyozzák, hogy a többtest-dinamikai szimuláció korai alkalmazása a védelmi iparban jelentősen csökkenti a tervezési hibák kockázatát, lerövidíti a fejlesztési időt, valamint mérsékeli a költségeket. A virtuális prototípusok révén a mérnökök már a koncepciófázisban képesek optimalizálni a tartósságot, stabilitást, zaj- és rezgésszinteket, még a fizikai gyártás előtt. Ez a megközelítés nemcsak a versenyképességet növeli, hanem a megbízhatóságot és a harctéri alkalmazhatóságot is javítja.

A magyar nyelvű, hazai szakirodalomban rögzült terminológia – mint például többtest-dinamika, rugalmas test, digitális iker, lánctalpas jármű, futómű rugózás, talajnyomás – biztosítja, hogy a kutatási eredmények és módszertanok szaknyelvi szempontból is megfeleljenek a hazai elvárásoknak.¹¹

Módszertan

A kutatás módszertani alapját nemzetközi, lektorált szakirodalom és hazai, szakmai körökben elfogadott terminológia biztosította. A cél az volt, hogy áttekintsük a többtest-dinamika és rugalmas testdinamika védelmi ipari alkalmazásait, különös tekintettel a digitális iker, a valós idejű vezérlés-együttszimuláció, valamint a diszkrét és részecskealapú módszerek integrációjának lehetőségeire.

A munka során három egymásra épülő lépést követtünk.

Első lépésként nemzetközi, szakmailag ellenőrzött publikációkat dolgoztunk föl, amelyek 2015 után jelentek meg, és relevánsak a többtest-dinamikai, kapcsolt CFD–MBD, DEM–MPS és digitális iker témakörökben.¹² A források felkutatása a Scopus, a Web of Science és az IEEE Xplore adatbázisokban történt.

Második lépésként a hazai, lektorált folyóiratok – így például a *Hadmérnök*, *Haditechnika*, *Periodica Polytechnica* és *Gép* – releváns cikkeit elemeztük a terminológia egységesítése érdekében. Ez biztosította, hogy a tanulmányban kizárólag a Magyarországon elfogadott szakkifejezések szerepeljenek, elkerülve a nyers tükörfordításokat.¹³

⁸ KIM et al. 2025.

⁹ ZHOU–CHANG 2022.

¹⁰ HARADA et al. 2019.

¹¹ FARKAS 2019.

¹² LIU et al. 2021; DANG et al. 2024.

¹³ DECSI–SZALAI 2022; FARKAS 2019.

Harmadik lépésként tematikus kategóriákba rendeztük a forrásokat. A fő vizsgálati területek a következők voltak:

- lánctalpas és amfibia járművek többtest-dinamikai modellezése;¹⁴
- repülőgép- és űrmechanizmusok (például futómű-leejtési teszt, napelemnyitó mechanizmus) dinamikai szimulációja;¹⁵
- digitálisiker-alkalmazások és valós idejű vezérlés-együttlésimuláció a védelmi rendszerekben;¹⁶
- DEM- és MPS-módszerek integrációja a többtest-dinamikai modellekbe;¹⁷
- NVH- (zaj, rezgés, komfort) elemzések többtest-dinamikai alapokon.¹⁸

Az egyes kategóriákon belül a nemzetközi és hazai források összevetése alapján határoztuk meg azokat a módszertani elemeket, amelyek a gyakorlatban is alkalmazhatók hazai kutatóhelyeken és ipari partnereknél. Külön figyelmet fordítottunk a módszerek validálhatóságára és a szimulációk kísérleti úton történő ellenőrizhetőségére.

Alkalmazási példák

A többtest-dinamikai és rugalmastest-dinamikai modellezés számos területen bizonyult hatékony eszköznek a védelmi iparban. Az alábbiakban néhány jellegzetes alkalmazási területet mutatunk be a közelmúlt releváns kutatási eredményei alapján.

Lánctalpas járművek terepjáró képességének modellezése

A lánctalpas harcjárművek mobilitásának előrejelzésére a terramechanikai – azaz a jármű és a talaj közötti kölcsönhatásokkal foglalkozó – kölcsönhatások valóságghű modellezése szükséges. Ehhez gyakran kombinálják a rugalmas futóműelemeket leíró MFBD-modelleket a diszkrét elemes (DEM) talajszimulációval. Egy friss tanulmányban például a *grouser*ek (a lánctalpak fogazott kapaszkodó karmai) formájának optimalizálása révén jelentősen csökkentették a talajon való megcsúszást és növelték a vonóerőt (1. ábra).¹⁹

¹⁴ MOCERA et al. 2020.

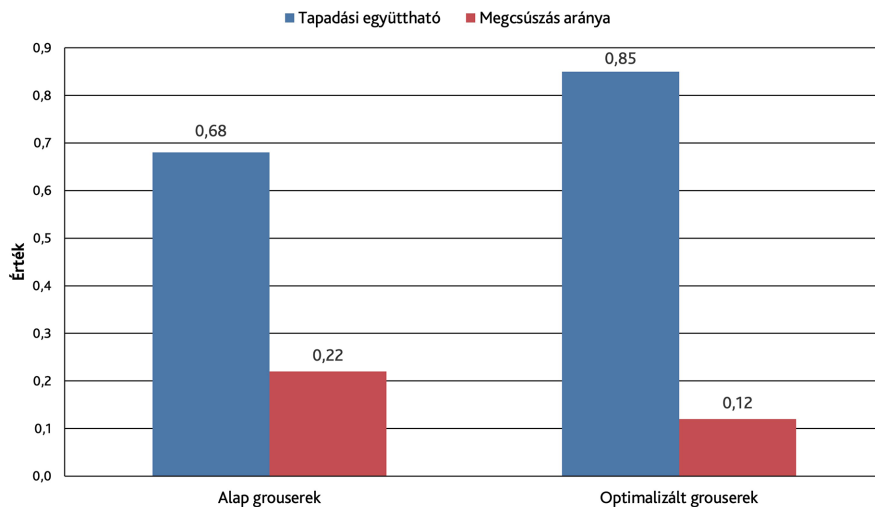
¹⁵ KIM et al. 2025.

¹⁶ ABRO–ABDALLAH 2024.

¹⁷ HARADA et al. 2019.

¹⁸ ZHOU–CHANG 2022.

¹⁹ MOCERA et al. 2020.



1. ábra: A láncfalpas jármű grouserek optimalizálása előtti és utáni tapadási együttható és megcsúszási arány összehasonlítása. Az optimalizált grouserek jelentősen növelték a talajtapadást és csökkentették a megcsúszás mértékét
 Forrás: a szerző szerkesztése MOCERA et al. 2020 alapján

Amfíbia járművek hidrodinamikai optimalizálása

Az amfíbia járművek tervezése során nemcsak a szárazföldi mozgékonyság, hanem a vízi haladási ellenállás minimalizálása is kiemelt szempont. Kapcsolt CFD–MBD-szimulációk segítségével vizsgálták különböző testformák hatását a vízi sebességre és manőverezhetőségre, amelynek eredményeként 5–8%-os teljesítménynövekedést értek el.²⁰

Repülőgép-futóművek dinamikai vizsgálata

A repülőgépek futóműveinek leejtési tesztjeit korábban főként fizikai kísérletekkel végezték, ám ma már MBD–FEA kapcsolt modellek révén a szerkezet deformációja és a lengéscsillapítók viselkedése előzetesen pontosan becsülhető. Egy ilyen vizsgálatban a virtuális prototípus 96%-os egyezést mutatott a kísérleti eredményekkel.²¹

²⁰ FAN et al. 2025.

²¹ KIM et al. 2025.

Digitálisiker-alapú állapotfigyelés

A digitálisiker-technológia alkalmazása lehetővé teszi a járművek valós idejű állapotfigyelését, a szenzoradatok feldolgozását és a karbantartási igények előrejelzését. Egy páncélozott szállítójárműre kifejlesztett rendszer például képes volt a felfüggesztési rendszer meghibásodásának előrejelzésére több mint 150 üzemórával az esemény bekövetkezése előtt.²²

NVH-optimalizálás védelmi rendszereknél

A zaj- és rezgésszint csökkentése nemcsak a kezelői komfort, hanem a felderíthetőség csökkentése szempontjából is fontos. Többtest-dinamikai alapú NVH-modellek és modálanalízis együttes alkalmazásával sikerült az egyik könnyű páncélozott jármű hajtásláncának zajszintjét 4,5 dB-lel mérsékelni.²³ A modálanalízis lehetővé tette a hajtáslánc és a kapcsolódó szerkezeti elemek sajátfrekvenciáinak és rezgésalakjainak azonosítását, ezáltal a kritikus rezonanciák elkerülését és a gerjesztési frekvenciák célzott elhangolását.

Fegyverrendszerek visszarúgás-szimulációja

A webinariumban bemutatott esetek rávilágítottak, hogy a RecurDyn segítségével a lövegcső és bőlcső dinamikus kölcsönhatásai, a csapágyhézagok és a visszarúgási erők előre modellezhetők, ezáltal a szerkezeti terhelések csökkenthetők, és a pontosság növelhető.²⁴ A szoftver erőssége a nagy fokú nemlinearitásokat tartalmazó kontakt- és hézagos kapcsolatok stabil numerikus kezelése, valamint a rugalmas testmodellek integrálása, ami különösen alkalmassá teszi fegyverrendszerek és nagy igénybevételű katonai mechanizmusok vizsgálatára. Ennek eredményeként a szerkezeti terhelések csökkenthetők, a visszarúgási folyamat kontrollálhatóbbá válik, és a rendszer pontossága növelhető.

Pilóta nélküli repülő rendszerek

Drónok és rakéták repülésdinamikai szimulációja, ahol az MBD-modellek képesek a vezérlési algoritmusokkal együttműködni, lehetővé téve a stabilitás és manőverezhetőség előzetes értékelését.

Űripari mechanizmusok

MBD-modellek a műholdak és űreszközök nyitó-záró mechanizmusainak vizsgálatára, ahol a súrlódás, a holtjáték és a dinamikus terhelések hatása kritikus a megbízhatóság szempontjából.

²² ABRO–ABDALLAH 2024.

²³ DECSI–SZALAI 2022.

²⁴ FunctionBay 2025.

Az 1. táblázat összefoglalja a cikkben hivatkozott, a többtest-dinamikai és kapcsolt szimulációs módszerek védelmi ipari alkalmazásával foglalkozó legfontosabb szakirodalmak fő fókuszát, erősségeit és korlátait.

1. táblázat: A felhasznált kulcsirodalmak összefoglalása a tématerülethez kapcsolódóan

#	Hivatkozás	Téma/Fókusz	Erősségek
DANG et al. 2024	Szuperszonikus <i>slipper-track</i> rendszer bifurkáció- és káosz-lemezése	Magas szintű nemlineáris dinamikai modellezés, stabilitási határok feltárása	Erősen specializált; eredmények közvetlenül nehezen általánosíthatók más rendszerekre
LIU et al. 2021	Tűzérzségi lövegső-bölcső szerkezet dinamikai modellezése hézagok kapcsolatokkal	Pontos hézagok kapcsolatok modellezése, MBD–FEA-integráció	Elsősorban merev test és lokális rugalmas deformáció; terepi validáció korlátozott
MOCERA et al. 2020	Láncfalpas jármű <i>grouser</i> ek hatása deformálható talajon	DEM–MBD-integráció, tereptapasztalatokhoz közeli szimuláció	Labor/virtuális környezetre korlátozódik; terepi kísérletek hiányosak
FAN et al. 2025	Amfibia jármű vízi ellenállása és formaoptimalizálás	CFD–MBD kapcsolt modellezés, kvantitatív teljesítményjavulás	Valós környezeti feltételek komplexitása nem teljesen modellezett
DECSI–SZALAI 2022	Digitális iker alkalmazása járműiparban	Részletes <i>workflow</i> és ipari tapasztalat	Konkrét védelmi ipari példák hiánya
ABRO–ABDALLAH 2024	Digitális iker + irányítástechnika UAV-oknál	Rendszerszintű áttekintés; kontroll-integráció	UAV-fókusz; földi járművekre csak részben adaptálható
KIM et al. 2025	Virtuális iterációmódszer fáradásvizsgálatra (elektromos traktor)	Virtuális validáció magas egyezéssel kísérletekkel	Speciális mezőgazdasági alkalmazás; katonai járművekhez adaptáció szükséges
ZHOU–CHANG 2022	Könnyű teherautó hátsó tengely fáradásanalízise	Virtuális iteráció hatékonysága	Egyszerűbb geometria; komplex rendszerekre kiterjesztés hiányzik
HARADA et al. 2019	DEM–MPS csatolt modell hidrodinamikai jelenségekre	Fejlett folyadék-szemcse kölcsönhatás modellezés	Katonai alkalmazás nem tárgyalt; nagy számítási igény
FARKAS 2019	Láncfalpas futóművek technikai ismertetése	Gyakorlati konstrukciós részletek	Tudományos modellezés hiánya

Forrás: a szerző szerkesztése

Előnyök, korlátok és javasolt munkafolyamat (*workflow*) a többtest-dinamikai elemzésben

Előnyök a fejlesztési láncban

A korai, koncepciószintű dinamikai elemzés bizonyítottan segít a tartósság és stabilitás növelésében, csökkenti a zajt és rezgést (NVH), a fejlesztési időt és költséget, valamint megelőzi a mechanizmus- vagy vezérlési hibákat – még a prototípus gyártása előtt.²⁵

²⁵ FunctionBay 2025.

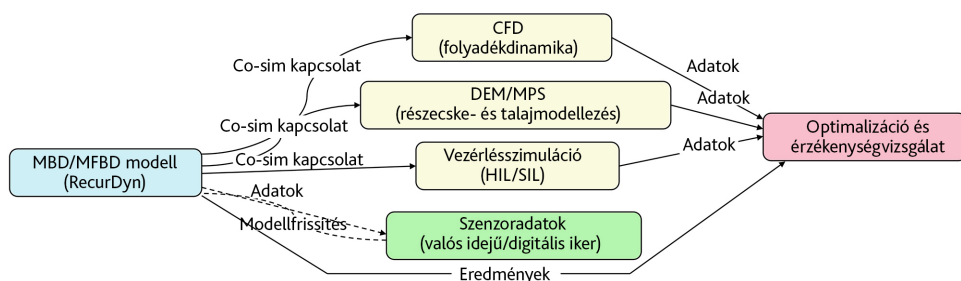
Korlátok és kockázatok

Model-fidelity: a merev és rugalmas testek arányának meghatározása, a kontaktparaméterek validálása kulcsfontosságú a pontosság érdekében.

Konfidencialitás: védelmi ipari adatokhoz kötött validáció korlátozott lehet a hozzáférési jogok miatt.

Co-szimuláció stabilitás: MBD–DEM/MPS és MBD-vezérlés kapcsolás esetén a numerikus stabilitás és az időléptetés helyes beállítása kritikus.

Az MBD/MFBD-modellek hatékonysága jelentősen növelhető co-szimulációval, ahol más fizikai domének (például CFD, DEM/MPS) és valós idejű/digitálisiker-adatok integrálódnak egy egységes optimalizációs és érzékenységvizsgálati folyamatba (2. ábra).



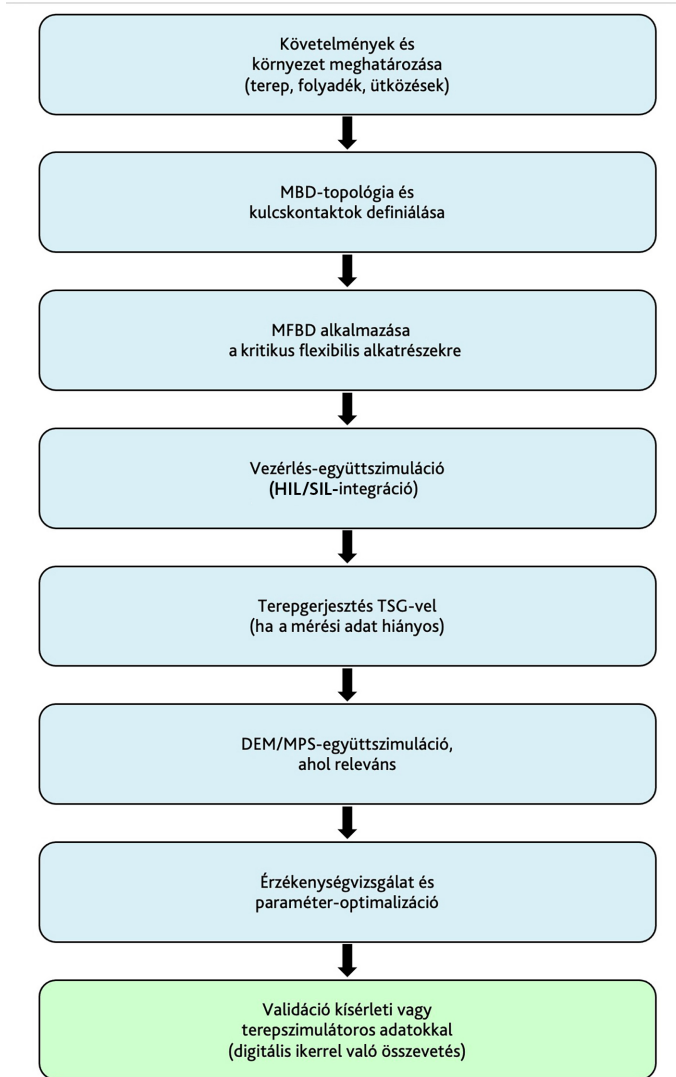
2. ábra: MBD/MFBD co-szimulációs architektúra, amely a CFD, DEM/MPS, vezérlés-szimuláció és valós idejű/digitálisiker-adatok integrációját mutatja, optimalizációs és érzékenységvizsgálati ciklussal kiegészítve

Forrás: a szerző szerkesztése

Javasolt workflow

1. követelmények és környezet (terep, folyadék, ütközések) specifikálása;
2. MBD-topológia és kulcskontaktok definiálása;
3. MFBD alkalmazása a kritikus flexibilis alkatrészekre;
4. vezérlés-egyttszimuláció (HIL/SIL-integráció);
5. terepgerjesztés TSG-vel, ha mérési adat nem áll rendelkezésre;
6. DEM/MPS co-szimuláció alkalmazása, ahol releváns;
7. Érzékenységvizsgálat és paraméter-optimalizáció (például vezérlőparaméterek finomítása *panel-deploy* minimalizálására);
8. validáció kísérleti vagy terepszimulátoros adatokkal, digitálisiker-összevetés segítségével.

A javasolt fejlesztési folyamat fő lépéseit a 3. ábra szemlélteti, amely az MBD- és MFBD-módszerek integrált alkalmazását mutatja a védelmi ipari rendszerek tervezésében és optimalizálásában.



3. ábra: Javasolt MBD/MFBD-alapú fejlesztési workflow a védelmi iparban, kiegészítve terepgerjesztéssel, co-szimulációval és digitálisiker-alapú validációval

Forrás: a szerző szerkesztése

Következtetések

A vizsgált hazai és nemzetközi szakirodalom alapján megállapítható, hogy a többtest-dinamikai és rugalmastest-dinamikai módszerek alkalmazása a védelmi iparban folyamatosan bővül, mind a modellezési pontosság, mind a felhasználási területek tekintetében. A lánctalpas és

amfibia járművek, repülőgép- és űrmechanizmusok, valamint a digitálisiker- és NVH-analízis területein elért eredmények egyértelműen jelzik, hogy a virtuális prototípusok és a kapcsolt szimulációs környezetek alkalmazása jelentős költség- és időmegtakarítást eredményezhet.

A digitálisiker-alapú megoldások különösen ígéretesek a prediktív karbantartás, a valós idejű állapotfigyelés és a komplex rendszerek működésének optimalizálása terén. A prediktív karbantartás során a szenzoradatok és digitálisiker-alapú szimulációk segítségével a várható meghibásodások előre jelezhetők, lehetővé téve az állapotfüggő, kockázatalapú karbantartási döntéseket.

A módszer lehetőséget ad a kockázatok csökkentésére és a megbízhatóság növelésére, ami a védelmi rendszerek esetében stratégiai fontosságú.

A vizsgált példák azt mutatják, hogy a többtest-dinamikai modellek integrálása más numerikus módszerekkel – például CFD, DEM vagy MPS – jelentősen növeli a prediktív képességet, és lehetővé teszi a valósághű szimulációkat még extrém körülmények között is. A jövőbeli kutatások várhatóan a valós idejű, nagy pontosságú modellek fejlesztésére, valamint a mesterségesintelligencia-alapú adatfeldolgozás és -optimalizálás integrációjára fognak fókuszálni.

Az irodalomkutatás tanulságai alapján a többtest-dinamikai módszerek legnagyobb előnye a védelmi ipar számára abban rejlik, hogy már a tervezés korai fázisában képesek pontos képet adni a rendszer működéséről. Ez lehetővé teszi a tervezési hibák minimalizálását, a fejlesztési költségek és idők csökkentését, valamint a termék élettartamának és megbízhatóságának növelését. A digitálisiker-koncepció alkalmazása pedig tovább erősíti ezt az előnyt, mivel a valós idejű adatkapcsolat révén a karbantartás és üzemeltetés optimalizálható.

Összességében elmondható, hogy a többtest-dinamika és a digitálisiker-módszerek kombinációja a védelmi iparban olyan új lehetőségeket teremt, amelyekkel a tervezési ciklus lerövidíthető, a költségek csökkenthetők, és a rendszerek teljesítménye, illetve túlélőképessége jelentősen javítható.

Felhasznált irodalom

- ABRO, Ghulam E. Mustafa – ABDALLAH, Ayman M. (2024): Digital Twins and Control Theory: A Critical Review on Revolutionizing Quadrotor UAVs. *IEEE Access*, 12, 43291–43307. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3376589>
- DANG, Tianjiao et al. (2024): Bifurcation and Chaos Analysis of a Supersonic Slipper–Track System. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 19(8). Online: <https://doi.org/10.1115/1.4065629>
- DECSI Péter – SZALAI István (2022): A digitális iker szerepe a járműipari fejlesztések területén. In *XXIII. ENELKO – XXXII. SzámOkt Multi-konferencia Kiadvány*. Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 20–24. Online: <https://ojs.emt.ro/enelko-szamokt/article/view/1005/958>
- FAN, Jiawen et al. (2025): Simulation Study on the Navigation Resistance and Shape Optimization of a New Type of Amphibious Vehicle. *Symmetry*, 17(2). Online: <https://doi.org/10.3390/sym17020193>
- FARKAS Zoltán (2019): Lánctalpas futóművek VI. rész. *Haditechnika*, 53(5), 70–75. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.53.5.15>
- FunctionBay (2025): *Multi-Body Dynamics Technology Leading the Defense Industry*. [Webinárium]. FunctionBay Inc.

- HARADA, Eiji – IKARI, Hiroyuki – KHAYYER, Abbas – GOTOH, Hitoshi (2019): Numerical Simulation for Swash Morphodynamics by DEM–MPS Coupling Model. *Coastal Engineering Journal*, 61(1), 2–14. Online: <https://doi.org/10.1080/21664250.2018.1554203>
- KIM, Ji-Tae et al. (2025): Evaluation of Fatigue Life Using Virtual Iteration Method for Electric Agricultural Tractor Frames. *Proceedings of the IMechE, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 239(2). Online: <https://doi.org/10.1177/14644193251343967>
- LIU, Jie et al. (2021): Modeling and Dynamic Analysis of Artillery Barrel-Cradle Structure with Clearance. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35, 1357–1368. Online: <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0302-0>
- MOCERA, Francesco et al. (2020): Grousers Effect in Tracked Vehicle Multibody Dynamics with Deformable Terrain Contact Model. *Applied Sciences*, 10(18). Online: <https://doi.org/10.3390/app10186581>
- ZHOU, Donglong – CHANG, Jianlong (2022): Fatigue Analysis of a Light Truck Rear Axle Based on Virtual Iteration Method. *Shock and Vibration*, (1). Online: <https://doi.org/10.1155/2022/8598491>