

Hidrogén-töltőállomások valós idejű kockázatkezelése digitális iker alapú keretrendszerrel

Digital twin framework for real-time hazard mitigation in hydrogen refuelling stations

HASULYÓ Gábor¹, Dr. VADÁSZI Marianna²,

¹ Bányászat és Energia Intézet, Miskolci Egyetem, HU-3515 Miskolc, Egyetemváros

² Bányászat és Energia Intézet, Miskolci Egyetem, HU-3515 Miskolc, Egyetemváros

Abstract

This study explores digital twin technology to enhance the safety and reliability of hydrogen refuelling stations. By creating real-time virtual replicas, the system enables immediate leak detection, hazard identification, and predictive maintenance. The research demonstrates that integrating physical data with analytical models significantly reduces operational risks, supporting a safer transition to sustainable hydrogen-based mobility.

Keywords: digital twin, hydrogen refuelling station, safety enhancement, real-time monitoring, predictive maintenance,

Kivonat

A tanulmány a digitális ikerpár technológia alkalmazását vizsgálja a hidrogén-töltőállomások biztonságának és megbízhatóságának növelésére. A valós idejű virtuális másolatok lehetővé teszik az azonnali szivárgásérzékelést, veszélyazonosítást és prediktív karbantartást. A kutatás igazolja, hogy a fizikai adatok és analitikai modellek integrálása jelentősen csökkenti az üzemeltetési kockázatokat, segítve a fenntartható hidrogénmobilitásra való átállást.

Kulcsszavak: digitális iker, hidrogén töltőállomás, biztonságfokozás, valós idejű megfigyelés, prediktív karbantartás

Bevezetés

A globális gazdaság napjainkban az alacsony szén-dioxid-kibocsátású technológiák felé mozdul el a klímaváltozás elleni küzdelem és az üvegházhatású gázok mérséklése érdekében, amely során a hidrogénenergia a fenntartható és környezetbarát energetikai megoldások egyik létfontosságú elemévé vált [1]. A jelenlegi nemzetközi helyzet Európát az energia-infrastruktúra alapos újragondolására és az alternatív forrásokra való gyorsított áttérésre kényszeríti, ahol az egyik legfőbb cél a megújuló energiaforrások széles körű integrálása mellett egy rugalmasabb és költséghatékonyabb rendszer kiépítése. A növekvő energiaigény és a környezeti kihívások miatt sürgetővé vált a hagyományos fosszilis tüzelőanyagoktól való függőség csökkentése, mivel ezek tartós használata bizonyítottan hozzájárult a globális felmelegedés antropogén alapú növekedéséhez.

A dekarbonizációs célok eléréséhez elengedhetetlen a hidrogén felé való elmozdulás, amely bár ígéretes alternatív üzemanyag, elterjedése előtt még számos technológiai és biztonsági akadály áll, amely szorosan összefügg a hidrogén-töltőhálózatának hiányával. A hidrogén töltőállomások olyan kritikus létesítmények, amelyek közvetlenül juttatják el az energiát a lakossághoz, ezért biztonságuk alapvető tényező a hidrogéngazdaság felfuttatásában.

A hidrogén széles körű alkalmazhatóságát elősegíti, hogy magas energiasűrűséggel rendelkezik, ugyanakkor fizikai tulajdonságai speciális műszaki megoldásokat igényelnek. Különösen kritikus szempont a gáz alacsony gyulladási energiája, amely miatt már egy statikus elektromos kisülés is elegendő lehet az öngyulladásához. Emiatt a töltőállomások tervezésekor nemcsak a tömörségvizsgálatra, hanem a szikramentes környezet kialakítására is kiemelt figyelmet kell fordítani.

A hidrogén molekuláris szerkezetéből adódóan hajlamos a fémes szerkezetekbe való bediffundálásra, ami a szerkezeti anyagok ridegedéséhez és idő előtti tönkremeneteléhez vezethet. Ez a jelenség, az úgynevezett hidrogén ridegedés, alapvetően befolyásolja a tárolótartályok és a nagynyomású vezetékek anyagválasztását. A biztonságos üzemeltetés érdekében elengedhetetlen a folyamatos gázkoncentráció-mérés, amely képes detektálni a szivárgást, mielőtt a hidrogén-levegő elegy elérné a kritikus alsó gyulladási határértéket. A modern töltőinfrastruktúra kiépítése során továbbá figyelembe kell venni a gyors tankolás során fellépő adiabatikus melegedést is, amely precíz hőmérséklet-szabályozást tesz szükségessé. A lakossági elfogadottság növeléséhez elengedhetetlen a nemzetközi biztonsági szabványok egységesítése és a vészhelyzeti protokollok szigorú betartatása. Csak a technológiai kockázatok teljes körű kezelésével és a robbanásbiztos rendszerek integrálásával válhat a hidrogén a jövő mobilitásának valódi tartóoszlopává.

A tankolási folyamat során fellépő nyomásváltozások komoly kockázatokat hordoznak, ami szükségessé teszi a nagynyomású rendszerek alapos biztonsági elemzését, különös tekintettel a hidrogén egyedi fizikai tulajdonságaira. Mivel a hidrogén a legkisebb molekula, rendkívül könnyen szivárog, emellett színtelen és szagtalan gáz, ami a hagyományos detektálást felettébb nehezíti [2]. A 350-700 bar közötti tárolási nyomás jelentős biztonsági kockázatot jelent, hiszen a levegővel keveredve a hidrogén könnyen eléri a gyulladási határértéket (4-75 térfogatszázalék). A széles robbanási tartomány miatt a ruházatból eredő statikus feltöltődés vagy a töltőállomás körül lévő kavicságy mozgás is növeli a gyulladásveszélyt, ezért elengedhetetlen az IoT-alapú detektorok alkalmazása a szivárgások gyors észlelése és az automata riasztórendszerek aktiválása érdekében.

A fizikai védelem mellett, amely magában foglalja a robbanásbiztos szerkezeteket és a nagy szilárdságú alapanyagokat, a legfontosabb fejlesztési irány egy olyan valós idejű monitoring rendszer kialakítása, amely azonnali beavatkozást tesz lehetővé vészhelyzetben [3]. Az Ipar 4.0 egyik alappilléreként számon tartott digitális iker technológia transzformatív megoldást kínál erre, lehetővé téve a valós idejű megfigyelést, a prediktív karbantartást és az optimalizált működést virtuális másolatokon keresztül [4]. A digitális iker egy komplex számítógépes szimuláció, amely a hidrogén-töltőállomás paramétereit azonos módon képezi le a digitális világban, folyamatosan frissülve a valós adatok alapján. A gépi tanulás és az adatfolyamok összekapcsolása révén megelőzhetőek a tervezési hibák és a szivárgásokból eredő balesetek, miközben a rendszer előre jelzi a várható kockázati szituációkat. A mesterséges intelligencia integrálásával a modell képes meghatározni a biztonságos és veszélyes üzemi állapotokat a korábban összegyűjtött adatok alapján [3].

A jelenlegi kutatások rávilágítanak arra, hogy a tisztán statikus monitoring rendszerekkel nehéz optimálisan reagálni a hirtelen fellépő szivárgásokra vagy hidrogéntüzekre, ezért van szükség dinamikus modellekre. A jelen tanulmány éppen ezért egy olyan dinamikus, digitális iker alapú intelligens rendszert mutat be, amely képes ezen összetett folyamatok szimulálására és a biztonsági szint maximalizálására.

1. INTELLIGENS BIZTONSÁGFELÜGYELET ÉS KOCKÁZATKEZELÉS

1.1. Szenzoros adatvisszacsatolás és folyamatos rendszerfelügyelet

A hidrogén töltőállomások biztonságos üzemeltetésének alapja a különböző érzékelőktől (akusztikus gázszivárgás érzékelő, hidrogéngáz érzékelő, lángdetektor) érkező adatok folyamatos monitorozása. A mesterséges intelligencia (MI) képes ezeket az információkat valós időben feldolgozni, így különbséget tud tenni a normál üzemi állapot és a kritikus üzemzavarok között. Az MI-alapú algoritmusok elemzik a gázszivárgásokat, a nagynyomású szelepek rendellenességeit és a szokatlan hőmérséklet-ingadozásokat, azonnali kockázatelemzést végezve. A korábbi üzemeltetési adatokon nyugvó prediktív modellek képesek előre jelezni a veszélyforrásokat, figyelembe véve az aktuális időjárási körülményeket vagy a használati intenzitást és szükség esetén preventív lépéseket javasolnak [3].

A digitális iker technológia részeként futtatott virtuális szimulációk lehetővé teszik a töltőállomás tesztelését szélsőséges forgatókönyvek mellett is, így a biztonsági szint még a valós üzemelés előtt felmérhető. A digitális elemzés a vészhelyzeti döntéshozatalt is segíti, egy esetleges balesetnél az MI rendszerek pillanatok alatt kiértékelik a szenzoradatokat és a környezeti tényezőket, majd optimális beavatkozási stratégiát javasolnak. Bár a statikus monitorozás önmagában korlátozott védelmet nyújt a hirtelen kialakuló hidrogéngázfelhőkkel vagy hidrogéntüzekkel szemben, a komplex módszerek integrálása jelentősen gyorsítja a válaszadási időt.

1.2. Probléma meghatározása

A jelenlegi tudományos eredmények rámutatnak, hogy bár léteznek biztonsági megoldások a hidrogén töltőállomásokra, de a dinamikus digitális iker-alapú rendszerek még hiányoznak a gyakorlatból. A hagyományos megfigyelés nem elégséges a szivárgásokból eredő súlyos károk, tüzek és robbanások teljes körű megelőzésére. A balesetek előjeleinek korai felismerése elengedhetetlen a gyors és hatékony beavatkozáshoz. Kritikus műszaki kihívást jelent a töltés közben fellépő melegedés a járművek tartályában. A gáznemű hidrogén gyors tágulása során fellépő Joule-Thomson effektus miatt a hőmérséklet drasztikusan emelkedhet [5].

Amennyiben a tartály belső hőmérséklete meghaladja a 85 °C-os határt, az az anyag szerkezeti gyengüléséhez, szivárgáshoz vagy akár robbanáshoz vezethet [6] [7]. Bár az MI-alapú rendszerekben rejlő potenciál az események előrejelzésére már bizonyított, a dinamikus digitális ikertechnológia és a mesterséges intelligencia ötvözése ezen a területen még feltáratlan. A digitális iker által kínált valóság-hű szimulációs környezet új távlatokat nyit a biztonságtechnikai fejlesztésekben, ezért jelen kutatás egy ilyen intelligens és dinamikus rendszer elemzésére fókuszál.

2. MODELFEJLESZTÉS ÉS VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

2.1. Módszertan

A digitális iker alapú biztonsági menedzsment rendszer kidolgozására és validálására szisztematikus megközelítést alkalmaztunk a hidrogén-töltőállomásokhoz. Módszertanunk több, egymással összefüggő fázisból állt: modellfejlesztésből, adatintegrációból, szimuláció végrehajtásából és valós paraméterekkel történő validálásból. A digitális iker modellt MATLAB/Simulink® (MathWorks, 2025) környezetben fejlesztettük ki, amely átfogó eszközöket biztosít a dinamikus rendszer modellezéséhez és szimulációjához. A modell architektúráját úgy terveztük meg, hogy reprodukálja a hidrogén-töltőállomás összes kritikus komponensét, beleértve a kompresszort, a nagynyomású puffertárolót, a hőcserélőt, a hűtőberendezést, a szoftveres logikai vezérlőt és az adagolót.

Minden komponenst matematikailag modelleztünk a fizikai tulajdonságai és működési jellemzői alapján. Termodinamikai elveket építettünk be a kompresszor modelljébe a hidrogén kompressziója során végzett munka kiszámításához, a hatékonysági tényezőket a valós teljesítményhez kalibráltuk. A nagynyomású puffertároló modellt a hidrogén állapotegyenletei alapján fejlesztettük ki különböző nyomásszinteken és hőmérsékleti körülmények között. A hőcserélő és hűtőberendezés modelleket a tankolási folyamat termikus menedzselésének szimulálására terveztük, ami kritikus a biztonságos üzemi hőmérsékletek fenntartása szempontjából. A szimulációt 3600 másodperces teljes futásidővel konfiguráltuk, a tényleges tankolási folyamat ezen időszak 300 másodperces ablakában zajlott. Ez a megközelítés lehetővé tette a rendszer viselkedésének megfigyelését a tankolási folyamat előtt, alatt és után. A kezdeti feltételeket a tipikus működési állapotokhoz igazítottuk, a kezdeti tárolási nyomás 30 bar, környezeti hőmérséklet 20°C és a töltöttségi szint 6,5 kg hidrogén.

Modellvalidációs folyamatunk három szakaszból állt: minden alrendszer egyedileg teszteltünk elméleti elvárások és gyártói specifikációk alapján. Az integrált modellt a magyarországi hidrogén-töltőállomás működési adatai alapján validáltuk és különböző működési forgatókönyveket - beleértve a normál üzemet és a hibás körülményeket - szimuláltunk a rendszer válaszána tesztelésére.

A szimulált és mért értékek közötti százalékos hiba számításait beillesztettük a validációs metrikákba, az elfogadási kritériumokat ± 5 %-ban határoztuk meg a kritikus paraméterekre (nyomás, hőmérséklet, tömegáram) és ± 10 %-ban a származtatott paraméterekre (hatékonyság, energiafogyasztás). A szimulációs eredményeket kvantitatív és kvalitatív módszerekkel egyaránt elemeztük. Az idősoros adatokat feldolgoztuk a kulcsfontosságú teljesítményindikátorok, beleértve a maximális nyomás- és hőmérsékletértékeket, a tankolási időt és az energiahatékonyságot. Statisztikai elemzést végeztünk a digitális iker előrejelzéseinek megbízhatóságának értékelésére a valós mérésekhez képest.

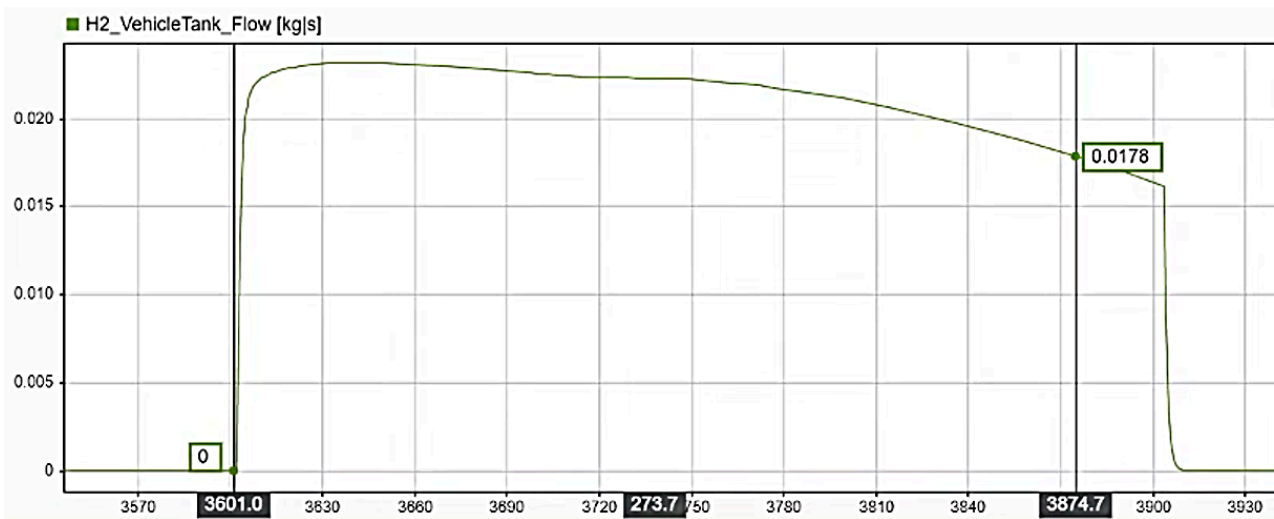
2.2. Szimulációs eredmények

Egy digitális iker alapú, intelligens hidrogén-töltőállomás biztonsági menedzsment modellje hat részre osztható, amelyek mindegyike specifikus szerepet tölt be. A rendszer egy kompresszorból, egy nagynyomású puffertárolóból, egy hőcserélőből, egy hűtőegységből, egy szoftveres logikai vezérlőből és egy gépjármű-tankoláshoz használt adagolóból áll. A hidrogén-töltőállomás modelljének egyik fő komponense a

kompresszor. A sűrítési folyamat modellezése határozza meg az egység által végzett munka mennyiségét. A kompresszor feladata a hidrogéngáz puffertárolókba történő sűrítése a rendszerre előírt üzemi nyomásérték eléréséig.

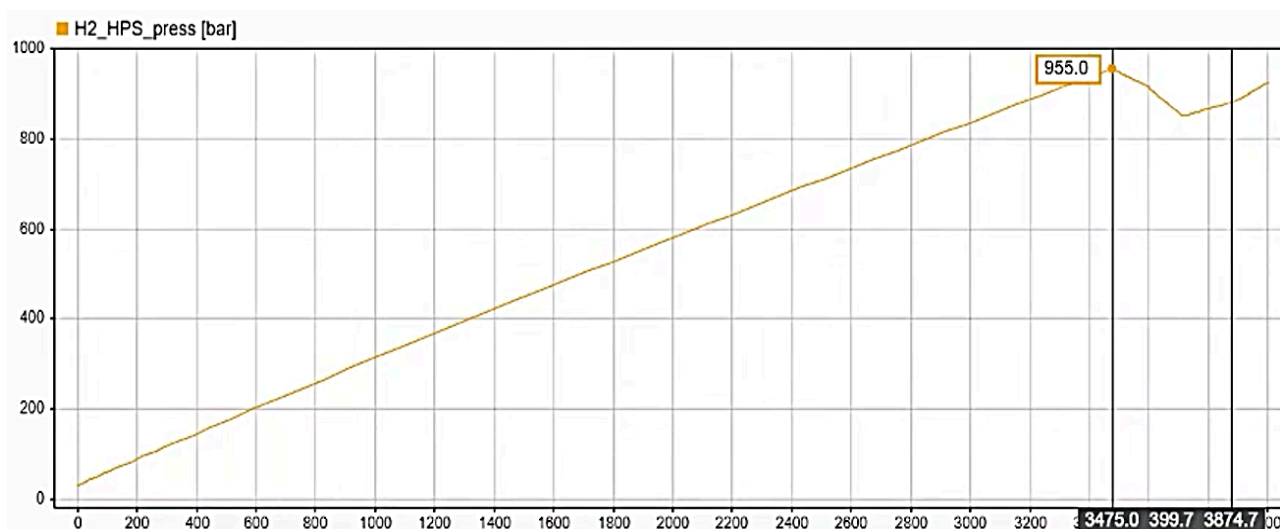
A nagynyomású puffertároló egy vagy több tárolótartályból állhat, amelyek mindegyike különböző maximális nyomásra, vagy mindegyik egységes nyomásra helyezhető. A tárolótartályok feltöltése után az állomás készen áll a hidrogén kiadására. A hidrogén kiadása a tárolótartályok ürítésével történik a jármű üzemanyagtartályának feltöltéséhez szükséges mennyiségben. Ez úgy valósul meg, hogy a kezdeti nyomást a gépjármű-tankolás utáni tárolótartály-nyomásra állítjuk be. A jármű teljes feltöltéséhez szükséges idő és a működés közben felhasznált elektromos áram az adagolóegység-modell két bemenete [8]. A szimulációs vizsgálatot 3600 másodperces futásidővel végeztük, amelyből 300 másodpercet tett ki a tényleges tankolási folyamat. Ez a tanulmány a hidrogén-töltőállomások olyan biztonsági menedzsment modelljét mutatja be, amely a digitális iker technológiát és a mesterséges intelligenciát integrálja az üzembiztonság növelése érdekében [2].

A szimulációs eredmények azt mutatják, hogy a rendszer képes pontosan követni a hidrogén tömegáramának változásait a tankolási folyamat során, amely elérte a 0,023 kg/s maximális értéket, ezáltal biztosítva az optimális töltési sebességet és elkerülve a túlnyomást, amint azt a 1. ábra szemlélteti.



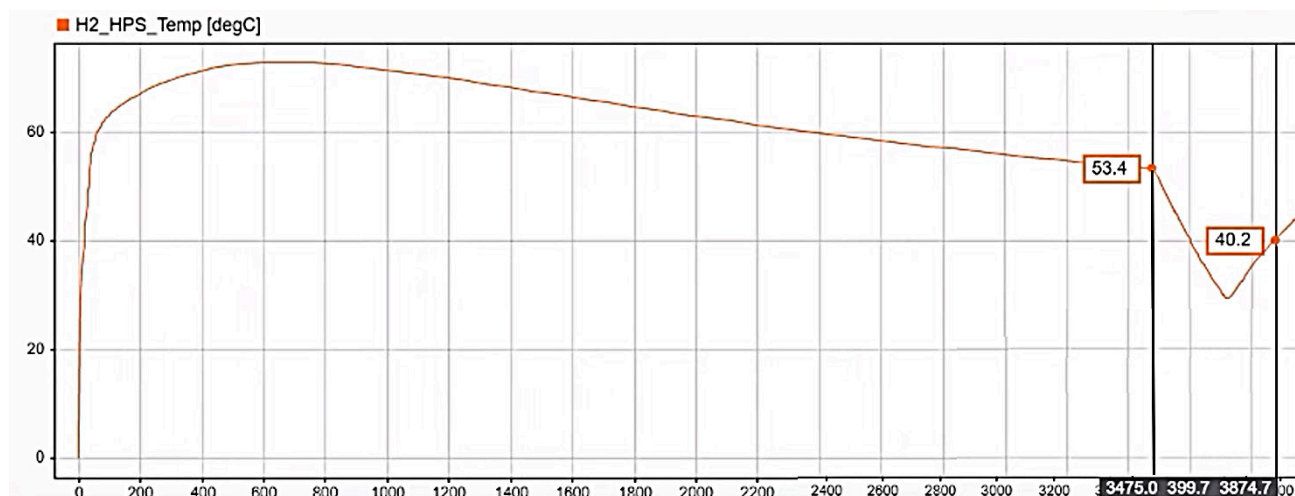
1. ábra. Hidrogén tömegáram az üzemanyag-feltöltés során

A digitális iker modell különösen értékes információkat szolgáltat a nyomásviszonyokról, ahol a kezdeti 30 bar nyomás fokozatosan 955 bar-ra emelkedik, ami kritikus biztonsági paraméter a nagynyomású hidrogéntárolásnál, ahogy az a 2. ábrán látható.



2. ábra. Nagynyomású hidrogéntartály nyomásnövekedése

A hőmérséklet-felügyelet területén a digitális iker technológia alkalmazása kiemelkedő jelentőségű, mivel a hidrogén sűrítése során jelentős hőtermelődés lép fel, ami megfelelő kezelés nélkül biztonsági kockázatot jelenthet. A szimulációs eredmények alapján a nagynyomású tárolórendszer hőmérséklete $53,4^{\circ}\text{C}$ körül stabilizálódik, amint azt a 3. ábra mutatja.



3. ábra. Hőmérsékletváltozás hidrogén-sűrítés közben

Megfigyelhető, hogy a jármű tartályában mért hőmérséklet (4. ábra) alacsonyabb értéken stabilizálódik a sűrítési folyamat során fellépő hidrogéngáz-hőmérsékletnél (3. ábra). Ez a különbség a rendszerbe integrált hőcserélő és hűtőegység hatékony működésének eredménye, amely a hidrogént a kiadás előtt előhűti. Ez a technológiai lépés kritikus fontosságú, mivel ellensúlyozza a tartályban a gyors táulás és töltés során fellépő adiabatikus melegedést, így a tartály belső hőmérséklete a biztonságos tartományban tartható.

A jármű tartályának hőmérséklete a tankolási folyamat végére $61,5^{\circ}\text{C}$ -ra emelkedik, ami továbbra is a biztonságos üzemi tartományon belül marad, ahogy azt az 4. ábra szemlélteti. Ez az információ lehetővé teszi az üzemeltetők számára a hűtőrendszerek hatékonyságának értékelését és szükség esetén a tankolási paraméterek módosítását.



4. ábra. A jármű üzemanyagtartályának hőmérséklete a tankolás során

A digitális iker rendszer valós idejű hőmérséklet-figyelése különösen fontos a hidrogén öngyulladás hőmérsékletének figyelembevételével, amely körülbelül 585°C ; azonban a helyi felmelegedés és a rendszeres elemek hűtése miatt ennél jóval alacsonyabb hőmérsékletek is kritikussá válhatnak.



5. ábra. A jármű tartályába töltött hidrogén tömege

A tömegmérés pontossága és a tankolási folyamat nyomon követése szintén döntő biztonsági szempont, amelyet a digitális iker technológia jelentősen javít. A szimulációs eredmények szerint összesen 6,5 kg hidrogén került a jármű tartályába, amelynek pontos mérése elengedhetetlen a túltöltés elkerülése és a gazdaságos üzemeltetés biztosítása érdekében, amint az a 5. ábrán látható.

3. KÖVETKEZTETÉS

A hidrogén alapvető szerepet játszik a közlekedési szektor dekarbonizációjában, azonban alkalmazása egyedi biztonsági kihívásokat támaszt. Ez a tanulmány a digitális iker technológia transzformatív szerepét elemezte a hidrogénenergia-rendszerekben. A digitális iker-alapú modellezés olyan előnyöket kínál, mint a valós idejű monitorozás, a prediktív karbantartás és a teljesítményoptimalizálás [4]. A kutatás során kidolgozott modell egy valós hidrogén-töltőállomás szimulációját valósította meg. A vizsgálat 3600 másodperces futásidővel zajlott, amelyből a tényleges tankolás 300 másodpercet tett ki. A rendszer kezdeti nyomása 30 bar volt, amely a folyamat végére 955 bar-ra emelkedett. A szimuláció során 6,5 kg hidrogént juttattunk a jármű tartályába.

A hőmérséklet-szabályozás hatékonyságát jelzi, hogy a nagynyomású tárolórendszer 53,4°C-on stabilizálódott. A jármű tartályának hőmérséklete 61,5°C-ra emelkedett, ami a biztonságos üzemi tartományon belül maradt. A digitális iker technológia lehetővé teszi a szivárgások valós idejű észlelését és az automatikus leállítást a kívánt mennyiség elérésekor. Ez minimalizálja a túlnyomás és a szivárgás kockázatát, ami a hidrogén alacsony gyulladási energiája miatt kritikus.

A MI-integrálásával a rendszer képes meghatározni a töltőállomás biztonságos vagy veszélyes állapotait. A prediktív karbantartás révén megelőzhetők a váratlan leállások, így csökkentve az üzemeltetési költségeket. Fontos megjegyezni, hogy a valós idejű monitorozás megnövekedett infrastruktúra- és működési költségekkel járhat. A jövőbeli kutatások az ipari folyamatbiztonságra és a berendezések tervezett paramétereken kívüli viselkedésének vizsgálatára fókuszálnak. Ez a megközelítés döntő szerepet játszhat a fenntartható energiarendszerre való átállásban és a hidrogéngazdaság sikeres megvalósításában.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zhiming Feng et al. - *Review of digital twin technology applications in hydrogen energy*, CHAIN, ISSN: 2097-3470, Volume: 1, Issue: 1, March 2024, Page(s): 54 – 74, DOI: [10.23919/CHAIN.2024.000001](https://doi.org/10.23919/CHAIN.2024.000001), utolsó letöltés dátuma: 2026.02.05.
- [2] Züttel, A. *Hydrogen storage methods*. *Naturwissenschaften* 91, 157–172 (2004). <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.07.
- [3] Na Yeon An et al. - *Digital Twin-Based Hydrogen Refueling Station (HRS) Safety Model: CNN-Based Decision-Making and 3D Simulation*, *Sustainability* 2024, 16(21), 9482; <https://doi.org/10.3390/su16219482>, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.09.

- [4] H. Naanani et al., *Advancing hydrogen safety and reliability through digital twins: Applications, models, and future prospects*, International Journal of Hydrogen Energy Volume 115, 2 April 2025, Pages 344-360; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.440>, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.10.
- [5] Fernando Olmos and Vasilios I. Manousiouthakis, *Hydrogen car fill-up process modeling and simulation*, International Journal of Hydrogen Energy Volume 38, Issue 8, 19 March 2013, Pages 3401-3418, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.064>, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.13.
- [6] E. Rothuizen et al., *Optimization of hydrogen vehicle refueling via dynamic simulation*, International Journal of Hydrogen Energy Volume 38, Issue 11, 15 April 2013, Pages 4221-4231, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.161>, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.15.
- [7] Jongyeon Oh et al., *Dynamic simulation and optimization of hydrogen fueling operated by n-bank cascade fueling method*, International Journal of Hydrogen Energy Volume 49, Part D, 2 January 2024, Pages 276-286, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.073>, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.16.
- [8] Riedl, S. M. and Knapp, R.H., *Development of a software design tool for modeling hydrogen distribution systems*, Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, June 19-24, 2011, ISBN 978-1-880653-96-8, https://www.researchgate.net/publication/289491648_Development_of_a_software_design_tool_for_modeling_hydrogen_distribution_systems, utolsó letöltés dátuma: 2026.02.17.