

ISSN 2676-9042

Vol 8, No 3, 2026.

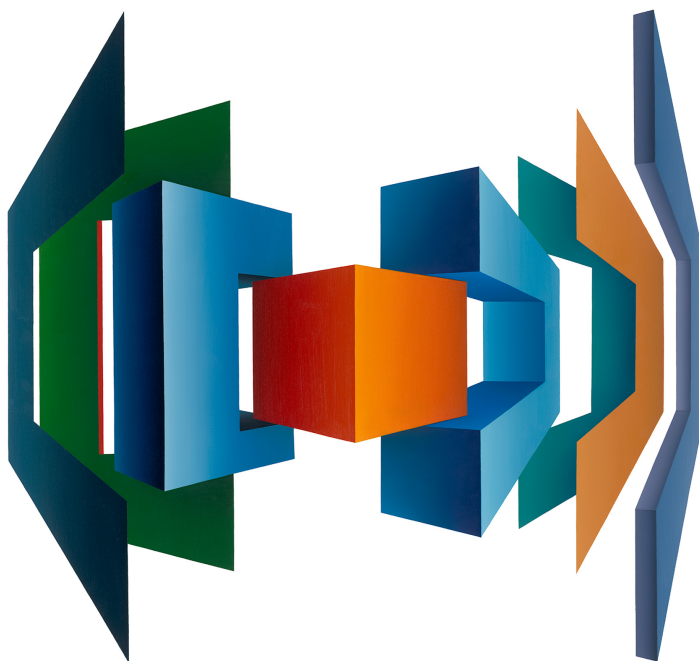
Safety and Security Sciences Review

international, peer-reviewed, professional and
scientific journal of safety and security sciences

2026, VIII. évf. 3. szám

Biztonságtudományi Szemle

a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált,
szakmai és tudományos folyóirata



On the cover can be seen | A borítón

BORS Györgyi

painter/festőművész

Cube peeling V. | Kockahámozás V.

painting | című festménye látható

© Bors Györgyi, 2025

The Military Science Committee of the 9th Department of Economics and Law of the Hungarian Academy of Sciences classified our journal as a "C" category.

Folyóiratunkat a Magyar Tudományos Akadémia IX. Gazdaság- és Jogtudományok Osztályának Hadtudományi Bizottsága „C” kategóriás folyóiratnak minősítette.

The Safety and Security Sciences Review is a classified journal by Hungarian Science Bibliography.

A Biztonságtudományi Szemle a Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) által minősített folyóirat.

Our journal is indexed by the following databases

Folyóiratunkat a következő adatbázisok indexelik

EBSCO



Electronic Periodicals Archive & Database

Elektronikus Periodika Adatbázis

<https://epa.oszk.hu/04100/04186>



Hungarian Periodicals Table of Contents Database

Magyar folyóiratok tartalomjegyzékeinek kereshető adatbázisa

https://matarka.hu/szam_list.php?fsz=2267&nyelv=hun



Digital Archives of Óbuda University

Óbudai Egyetem Digitális Archívum



Országos Széchényi Könyvtár - Digitális Könyvtár

National Széchényi Library Digital Library

OSZK Digitális Könyvtár

<https://oszkdk.oszk.hu/DRJ/39186>



ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

Global Serials Directory | Globális Sorozatok Könyvtára

<http://ulrichsweb.serialsolutions.com/title/1678275514425/863974>



Digital Object Identifier | Digitális ObjektumAzonosító

<https://www.doi.org>

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata
COLUMNS Material Safety Philosophy and History of the Safety and Security Security Policy Security Systems Security Awareness Domotics Health Security Food Safety Economic Security War Security and Law Enforcement Information Security Industrial and Operational Safety Legal and Social Security Book Review Security of Environment Traffic Safety Facility Security Private Security Artificial Intelligence Safety and Security in General Technical Security Fire Safety and Disaster Management	ROVATOK Anyagbiztonság Biztonságfilozófia és -történet Biztonságpolitika Biztonságtechnika Biztonságtudatosság Domotika Égéségszégbiztonság Élelmiszer-biztonság Gazdasági biztonság Hadbiztonság és rendvédelem Információbiztonság Ipar- és üzembiztonság Jog- és társadalombiztonság Könyvismertetés Környezetbiztonság Közlekedésbiztonság Létesítménybiztonság Magánbiztonság Mesterséges intelligencia Munkabiztonság Műszaki biztonság Tűzbiztonság és katasztrófavédelem
The aim of the journal is to publish studies, research reports, book reviews for professionals working in the field of security science or related sciences, or for those interested in the subject of the broadly disciplinary framework of military technical sciences, and for security awareness and developing a safety culture. We know that the cultivation of security sciences includes the study of the history of military and law enforcement security, as well as the knowledge of the historical aspects of our field of science, and its development. We are working to present the latest theoretical models and empirical research findings in our journal. We believe that our Journal and our authors can contribute to the creation of a world that enables a (more) secure life for all the inhabitants of the Earth by knowing the historical past and examining the events of the present with precision and accuracy. Published quarterly, typically in Hungarian, occasionally in a foreign language. Special and/or thematic issues related to conferences and topics are occasionally published in Hungarian or in foreign languages. Only manuscripts that have been reviewed by two independent reviewers and recommended for publication will be published in the Safety and Security Sciences Review. The submitted manuscripts must meet the formal and content requirements available on the journal's website. Please note: we will not return unapproved manuscripts. The studies of the staff and students of Óbuda University, published in the Journal, are recorded by the staff of the University Library at the Hungarian Scientific Works Library (MTMT).	A folyóirat célja a biztonságtudomány területén, vagy ahhoz kapcsolódó területeken dolgozó szakemberek, vagy a téma iránt érdeklődők számára a katonai műszaki tudományok, s így a biztonságtudomány tágan értelmezett diszciplináris keretébe tartozó tanulmányok, kutatási jelentések, beszámolók, könyvismertetések megjelentetése, s ennek révén a biztonság-tudatosság és a biztonsági kultúra fejlesztése. Tudjuk, hogy a biztonságtudományok művelésébe beletartozik a had-, rendészeti- és biztonságtörténet vizsgálata, tudományterületünk történeti és történelmi vetületeinek, s így fejlődésének megismerése. Azon dolgozunk, hogy Folyóiratunkban bemutassuk jelenkorunk legújabb teoretikus modelljeit és empirikus kutatási eredményeit. Hiszünk benne, hogy Folyóiratunk és szerzőink a történelmi múlt ismeretével, a jelenkor eseményeinek precíz és akkurátus vizsgálatával hozzá tudnak járulni egy olyan világ megteremtéséhez, amelyik lehetővé teszi a Föld minden lakója számára a biztonságos(abb) életet. Megjelenés negyedévente, jellemzően magyar, eseti jelleggel idegen nyelven. Konferenciákhoz és témákhoz kapcsolódóan különszámok, tematikus számok alkalmi jelleggel magyar vagy idegen nyelven jelennek meg. A Biztonságtudományi Szemle folyóiratban csak két független lektor által lektorált és megjelentetésre alkalmasnak tartott tanulmányok jelenhetnek meg. A beküldött kéziratoknak formai és tartalmi szempontból egyaránt meg kell felelniük a Folyóirat weboldalon közzét elvárásoknak. El nem fogadott kéziratokat nem áll módunkban visszaküldeni. Az Óbudai Egyetem munkatársainak és hallgatóinak a Folyóiratban megjelent tanulmányait az Egyetemi Könyvtár munkatársai rögzítik a Magyar Tudományos Művek Tárában (MTMT).

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

ISSN 2676-9042

<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu>

Edited by Editorial Board | Szerkeszti a Szerkesztőbizottság

Chairman of the Editorial Board | A Szerkesztőbizottság elnöke

Prof. Dr. RAJNAI Zoltán

rajnai.zoltan@bgk.uni-obuda.hu

Scientific Secretary of the Editorial Board, person responsible for editing | A szerkesztőbizottság tudományos titkára, a szerkesztésért felelős személy

Dr. Dr. habil. KOLLÁR Csaba PhD

kollar.csaba@uni-obuda.hu

Members of the Editorial Board | A szerkesztőbizottság tagjai

Prof. Dr. BÁNÁTI Diána banati@mk.u-szeged.hu

Dr. BEREK László PhD berek.laszlo@uni-obuda.hu

Prof. Dr. BEREK Tamás PhD berek.tamas@uni-nke.hu

Prof. Dr. BESENYŐ János besenyo.janos@uni-obuda.hu

Prof. Dr. CVETITYANIN Livia akadémikus cpinter.livia@bgk.uni-obuda.hu

Prof. Dr. Dragan JOVANOVIĆ draganj@uns.ac.rs

Prof. Dr. Jeffrey KAPLAN kaplan@uwosh.edu

Prof. Dr. KOVÁCS Tünde PhD kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Dr. Cyprian Aleksander KOZERA PhD c.kozera@akademia.mil.pl

Prof. Dr. Maashutha Samuel TSHEHLA samuel@sun.ac.za

Prof. Dr. Manuela TVARONAVIČIENĖ manuela.tvaronaviciene@vgtu.lt

Dr. habil. NAGY Rudolf PhD nagy.rudolf@bgk.uni-obuda.hu

Staff of the Editorial Board | A szerkesztőbizottság munkatársai

BELÁZ Annamária, SZALÁNCZI-ORBÁN Virág

English-language proofreader | Angol nyelvi lektor

Dr. BEKE Éva PhD

Technical editor | Technikai szerkesztő

HARTMANN László

Editorial office | Szerkesztőség

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Biztonságtudományi Doktori Iskola

1081 Budapest, Népszínház utca 8.

Publisher | Kiadó

Óbudai Egyetem, 1034 Budapest, Bécsi út 96/B.

Responsible for publishing | A kiadásért felel

Prof. Dr. KOVÁCS Levente

Rector of Óbuda University | az Óbudai Egyetem rektora

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

The Journal's Professional-Scientific Advisory Board	A Folyóirat Szakmai-Tudományos Tanácsadó Testülete
---	---

Chairman of the Advisory Board | A Tanácsadó Testület elnöke

Prof. Dr. GODA Tibor DSc.

Az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola vezetője

Members of the Advisory Board | A Tanácsadó Testület tagjai
in alphabetical order | ABC sorrendben

Prof. Dr. HAIG Zsolt mk. ezredes

A Nemzeti Közsolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola vezető helyettese
A Védelmi elektronika, informatika és kommunikáció kutatási terület vezetője

Prof. Dr. KÓNYA Zoltán DSc.

A Szegedi Tudományegyetem Környezettudományi Doktori Iskola vezetője

Prof. Dr. KORINEK László akadémikus

A Magyar Rendészettudományi Társaság elnöke

LONTAI Márton

A Nemzeti Szakértői és Kutató Központ főigazgatója

Prof. Dr. PADÁNYI József DSc. mk. vezérőrnagy

A Nemzeti Közsolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola vezetője
A Magyar Hadtudományi Társaság elnöke

Prof. Dr. RÉGER Mihály DSc.

Az Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola vezetője

TIKOS Anita

Women In IT Security (WITSEC) Egyesület elnökségi tagja

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

Vol 8, No 3, 2026.

2026. VIII. évf. 3. szám

Authors of this issue

E számunk szerzői

BAUMGARTNER Helga

baumgartner.helga@phd.uni-obuda.hu

Helga BAUMGARTNER, safety engineer, PhD Student at the Doctoral School for Safety and Security Sciences of Óbuda University. Her research focuses on face recognition in crime prevention and counter-terrorism. In her research, she examines the factors affecting the technological performance and operation of facial recognition systems, as well as the related operational and governance challenges in border and aviation security. Her research covers, inter alia, the role of data quality, training databases and human oversight. She also focuses on the technological and operational requirements for the reliable use of facial recognition systems in border and aviation security. Her previous publications are related to counter-terrorism, biometric identification, artificial intelligence and facial recognition.

BAUMGARTNER Helga biztonság-technikai mérnök, az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájának PhD hallgatója. Kutatási területe az arcfelismerés alkalmazása a bűnmegelőzésben és a terrorizmus elleni védekezésben. Doktori kutatásában az arcfelismerő rendszerek technológiai teljesítményét és működését befolyásoló tényezőket, valamint az ezekhez kapcsolódó működtetési és irányítási kihívásokat vizsgálja a határ- és repülésbiztonság területén. Kutatása kiterjed többek között az adatminőség, a tanuló adatbázisok és az emberi felügyelet szerepére. Foglalkozik továbbá az arcfelismerő rendszerek megbízható alkalmazásához kapcsolódó technológiai és működtetési követelményeivel a határ- és repülésbiztonságban. Korábbi publikációi a terrorizmus elleni védekezés, a biometrikus azonosítás, a mesterséges intelligencia és az arcfelismerés témaköréhez kapcsolódnak.

BODOR Károly

bodor.karoly@ek-cer.hu

Károly BODOR is a colleague of the HUN-REN Centre for Energy Research (19 years) and ELI ALPS (14 years). He became involved in the design and implementation of the ELI ALPS radiation protection system in 2008. It immediately became clear that in addition to traditional radiation protection knowledge, new procedures had to be developed, and new knowledge and vision, and an interdisciplinary approach would be needed. For this purpose, he participated in meetings and conferences held during the ELI preparation phase, and mastered the so-called FLUKA Monte Carlo code, which was not yet used in Hungary at that time. During his work, he led several diploma theses with his colleague and supervisor Dr. Péter Zagvyai. As a radiation protection expert and designer, he supported the operation of ELI ALPS. He obtained his doctorate at the Doctoral School on Safety and Security Studies of Óbuda University.

BODOR Károly a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (19 év) és az ELI ALPS munkatársa (14 év). Az ELI ALPS sugárvédelmi rendszerének tervezésébe és megvalósításába 2008-ban kapcsolódott be. Rögtön világossá vált, hogy a hagyományos sugárvédelmi tudás mellett új eljárásokat kell kidolgozni, illetve új ismeretekre és látásmódra, interdiszciplináris megközelítésre lesz szükség. Ennek érdekében részt vett az ELI előkészítési fázisban megtartott találkozók, konferenciák, valamint elsajátította az akkor még Magyarországon nem használt ún. FLUKA Monte Carlo kódot. Munkája során több diplomamát vezetett Dr. Zagvyai Péter kollégájával, témavezetőjével. Sugárvédelmi szakértőként és tervezőként támogatta az ELI ALPS üzemelését. Az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájában szerezte meg a doktori fokozatot.

BURAI István György

burai.istvan@bgk.uni-obuda.hu

István György BURAI is an Assistant Lecturer at the Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering, Óbuda University, Department of Manufacturing Technology. He teaches in the field of me-

BURAI István György tanársegéd az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gyártástechnológiai Intézeti Tanszékén. Gépészmérnöki szakterületen oktat, különös tekintettel

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

chanical engineering, with a focus on CNC technology and computer-aided manufacturing. He is currently pursuing his PhD at the Doctoral School on Safety and Security Sciences of Óbuda University. His research examines the integration of artificial intelligence into education and its related security risks. His work focuses on the theoretical and empirical analysis of the AI–Education–CNC framework, including AI-based G-code generation and intelligent assistant systems. He has published on AI applications in education, SWOT-based strategic analysis, and the relationship between AI and CNC technologies, and has participated in an industrial digitalization project involving CNC data integration.

a CNC-technológiára és a számítógéppel támogatott gyártástervezésre. Doktori tanulmányait az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájában folytatja, ahol kutatási témája a mesterséges intelligencia oktatási adaptációja és annak biztonsági kockázatai. Tudományos munkája az MI–Oktatás–CNC hármas rendszerének vizsgálatára irányul, elméleti modellalkotás és empirikus kutatások keretében. Publikációi a mesterséges intelligencia oktatási alkalmazásával, SWOT-alapú stratégiai elemzésével, valamint az MI és CNC technológia kapcsolatával foglalkoznak. Részt vett ipari digitalizációs projektben, amely a CNC rendszerek adat- és folyamatintegrációjára irányult.

DRÉGELYI-KISS Ágota

dregelyi.agota@bgk.uni-obuda.hu

Ágota DRÉGELYI-KISS is an associate professor at Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering. She received her MSc degree in chemical engineering from Budapest University of Technology and Economics in 2000 and obtained her PhD in engineering in 2011, followed by habilitation in 2023. Her teaching and research focus on measurement science, metrology, quality control, and design of experiments. She has been involved in several national and international research and development projects as a leader and participant and actively contributes to doctoral education and supervision. She serves on editorial boards of multiple scientific journals and regularly acts as a reviewer for international journals and conferences. She is a member of several professional organizations, including the Hungarian Academy of Sciences public body and IMEKO TC14. Her main research interests include dimensional metrology, measurement uncertainty, industrial CT-based measurements, data analysis, and quality engineering.

DRÉGELYI-KISS Ágota egyetemi docens az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán. Okleveles vegyészmérnöki diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte (2000), majd PhD fokozatot szerzett műszaki területen (2011), később habilitált (2023). Oktatói és kutatói tevékenysége a mérés technika, metrológia, minőség szabályozás és kísérlettervezés területére összpontosul. Több hazai és nemzetközi projekt vezetője és résztvevője volt, valamint aktívan közreműködik doktori képzésben és témavezetésben. Számos tudományos folyóirat szerkesztőbizottsági tagja, rendszeres bíráló nemzetközi konferenciákon és folyóiratokban. Tagja több szakmai szervezetnek, többek között az MTA köztestületének és az IMEKO TC14 bizottságnak. Kutatási témái közé tartozik a dimenzionális mérés technika, mérési bizonytalanság, ipari CT-alapú mérések, valamint az adatelemzés és minőségirányítás.

FARKAS Gabriella

farkas.gabriella@bgk.uni-obuda.hu

Gabriella FARKAS Lecturer at Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering at Óbuda University, senior lecturer. Fields of education: quality assurance, surface roughness measurement, Lean techniques. Teaching activities are in BSc, MSc programs and specialized trainings. She's PhD doctor's degree in Agricultural Technical Sciences in 2010 (Doctoral School of Mechanical Engineering) and earned her habilitation in 2025.

FARKAS Gabriella az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar oktatója, egyetemi adjunktus beosztásban. Oktatási területei: minőségbiztosítás, felületi érdességmérés, Lean technikák. Alapképzésben több szakon, mesterképzésben és a szakmérnöki képzéseken végez oktatási tevékenységet. PhD fokozatot Agrár Műszaki Tudományokban szerzett 2010-ben, 2025-ben habilitált.

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

GULYÁS Attila

gulyas.attila@ek-cer.hu

Attila GULYÁS is a member of the Nuclear Security Department of the HUN-REN Centre for Energy Research. His primary task is to manage and implement projects related to the development and application development of radiation sensors, and he represents the expertise of experimental physics and metrology in these. He graduated in physics from the Budapest University of Technology and previously gained expertise in the development of measurement technology in various laboratories in the private sector: semiconductor industry development, high-performance laser application development start-up, accredited calibration and testing laboratories in the pharmaceutical and mechanical industries.

Gulyás Attila a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumának munkatársa. Alapvető feladata a sugárzásérzékelők fejlesztéseihez, alkalmazás-fejlesztéseihez kapcsolódó projekteknek a vezetése és végrehajtása, ezekhez a kísérleti-fizika és metrológia szakmaiságát képviseli. A Budapesti Műszaki Egyetemen szerzett fizikus diplomát és korábban a magánszektor legkülönbözőbb laboratóriumaiban tett szert a mérés-technika-fejlesztői jártasságra: félvezetőipari fejlesztő, nagyteljesítményű lézeralkalmazás fejlesztő start-up, gyógyszeripari és gépipari akkreditált kalibráló és vizsgáló laboratóriumok.

HERÉNYI Zoltán

zoltan.herenyi@gmail.com

Following the completion of his electrical engineering degree, the author worked for 17 years as an occupational safety inspector within the national labour safety authority. His earlier industrial experience and hands-on knowledge gained during his inspections led him to realize that new, more effective solutions are needed in the prevention and investigation of workplace accidents. In pursuit of this goal, he earned an MSc in Computer Science from the University of Miskolc, with a thesis focused on the image-based detection of personal protective equipment and hazardous zones. He is currently enrolled in the occupational safety engineering postgraduate program at Óbuda University, and is also a state-funded PhD student at the Doctoral School of Safety and Security Sciences. His research explores the applicability of artificial intelligence in preventing occupational diseases and workplace accidents.

A szerző villamosmérnöki diplomáját követően 17 éven át dolgozott munkavédelmi felügyelőként az állami munkavédelmi hatóságnál. Korábbi ipari tapasztalatai és felügyelői munkája során szerzett gyakorlati ismeretei vezették el annak felismeréséhez, hogy a munkahelyi balesetek megelőzése és kivizsgálása területén új, hatékonyabb megoldásokra van szükség. Ennek jegyében informatika MSc diplomát szerzett a Miskolci Egyetemen, diplomamunkáját a munkavédelmi felszerelések és veszélyzónák képfeldolgozáson alapuló felismeréséről írta. Jelenleg munkavédelmi szakmérnök hallgató az Óbudai Egyetem levelező képzésén, valamint állami ösztöndíjas doktorandusz a Biztonságtudományi Doktori Iskolában. Kutatási területe a mesterséges intelligencia foglalkozási megbetegedések és munkabalesetek megelőzésében való alkalmazhatósága.

HORVÁTH András

horvath.andras@bgk.uni-obuda.hu

András HORVÁTH is an assistant lecturer at Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering at Óbuda University. Fields of education: quality assurance, quality management. He teaches in BSc, MSc and specialized trainings, his subjects are related to quality management. He is a PhD student at the Doctoral School on Safety and Security Sciences.

HORVÁTH András az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar oktatója, egyetemi tanársegéd beosztásban. Oktatási területei: minőségbiztosítás, minőségmenedzsment. Alapképzésben több szakon, mesterképzésben és a szakmérnöki képzéseken a minőségmenedzsmenttel kapcsolatos tantárgyak oktatását végzi. A Biztonságtudományi Doktori Iskola PhD hallgatója.

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

KOLLÁR Csaba

kollar.csaba@uni-obuda.hu

Csaba KOLLÁR is a communications engineer, certified communications specialist, electronic information security manager, doctor of economics (PhD), and doctor (PhD) and habilitated doctor (Dr. habil.) in military engineering. He is also a cybernetics consultant, coach, and mediator. His research interests include the social aspects and economic impacts of the digital age, with a particular focus on the human aspects of information security, information security awareness, human-robot interaction, smart cities, artificial intelligence, social credit systems, and domotics. He is a senior research fellow at Óbuda University, where he leads the specialized courses for Domotics Engineer/Consultant and Facility and Property Professional Engineer/Manager. He is also the head of the Artificial Intelligence Workshop and serves as the scientific secretary of the Editorial Board of the Safety and Security Sciences Review, which is classified by the Military Science Committee of the 9th Department of Economics and Law of the Hungarian Academy of Sciences. Csaba Kollár is an expert with the Hungarian Society of Military Science and the National Association of Human Professionals, and has been a member of the Artificial Intelligence Consortium since Q4 2018.

KOLLÁR Csaba kommunikációtechnikai mérnök, okleveles kommunikációs szakember, elektronikus információbiztonsági vezető, a közgazdaságtudományok doktora (PhD), a katonai műszaki tudományok doktora (PhD) és habilitált doktora (Dr. habil.), kibernetikus, tanácsadó, coach, mediátor. Kutatási területe a digitális kor társadalmi vetületei és gazdasági hatásai, kiemelten az információbiztonság humán aspektusa, az információbiztonság-tudatosság fejlesztése, az ember-robot interakció, az okosváros, a mesterséges intelligencia, a társadalmi kredit rendszere, az intelligens épületek (domotika rendszerek) üzemeltetése és gazdálkodása. Az Óbudai Egyetem tudományos főmunkatársa, a domotika szakmérnök/szaktanácsadó és a létesítménygazdálkodó és -üzemeltető szakmérnök/szakmenedzser továbbképzési szakok képzésvezetője, a Mesterséges Intelligencia Műhely vezetője, az MTA IX. Osztály Hadtudományi Bizottsága által minősített Biztonságtudományi Szemle szerkesztőbizottságának tudományos titkára, az Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájának és a Nemzeti Köszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskolájának az oktatója, témavezetője. A Magyar Hadtudományi Társaság és a Humán Szakemberek Országos Szövetsége szakértője. 2018. negyedik negyedévtől a Mesterséges Intelligencia Konzorcium tagja.

MARSI Balázs

marsi.balazs@tek.gov.hu

Police Captain Balázs MARSI has been with the Counter-Terrorism Center since 2010. He is a member of the team that has established and operated the TEK CBRN unit since 2011. During the process, he participated in the recruitment, training and further training of the unit and TEK personnel, in the market research and procurement of technical equipment necessary for task performance, as well as their continuous application and maintenance. Since 2011, they have been closely cooperating with the US DoE NNSA (National Nuclear Security Administration of the United States Department of Energy), as well as relevant domestic (e.g. BM OKF, HUN-REN Centre for Energy Research) and European counterparts in order to maintain the level of their knowledge and equipment. As part of their professional training, they have participated in several Europol and CEPOL trainings, workshops and other international professional forums related to the CBRN field,

MARSI Balázs rendőr százados, a Terrorelhárítási Központ munkatársa 2010 óta. Tagja annak a csapatnak, akik 2011 óta kialakították és működtetik a TEK CBRN egységét. A folyamat során részt vett az egység és a TEK személyi állományának felvételében, képzésében és továbbképzésében, a feladatvégrehajtáshoz szükséges technikai eszközök piacutatásában és beszerzésében, valamint azok folyamatos alkalmazásában és karbantartásában. 2011 óta szorosan együttműködnek a tudásuk és eszköz parkuk színvonalának megőrzése érdekében az US DoE NNSA-val (Amerikai Egyesült Államok Energiaügyi Minisztérium Nemzeti Nukleáris Biztonsági Hivatal), valamint a releváns hazai (pl.: BM OKF, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont) és európai társszervekkel. Szakmai képzés keretében részt vett több, a CBRN területtel kapcsolatos Europol, CEPOL képzésen, workshopon, illetve más nemzetközi szakmai fórumokon, ahol lehetősége

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

where they had the opportunity to present their efforts in the development of the field.

nyílt bemutatni a terület fejlesztése érdekében tett erőfeszítéseiket.

MONDICS-KURMAY Livia

m.kurmay.livia@uni-obuda.hu

Livia MONDICS-KURMAY is a PhD student at Doctoral School of Safety and Security Sciences, PhD advisor Prof. Dr. Zoltán Rajnai. She works at Óbuda University as a director of education at Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering. Her research focuses on the field of security sciences: "Secret military languages and their technical background in the USA, Germany, and Russia." She pursued her studies in the humanities and social sciences at Eszterházy Károly College and Károli Gáspár University. She furthered her education at Yale University, where she completed two courses relevant to her research interests. Having been born and raised in a region where multiple languages and cultures converged, she developed a keen interest in linguistics and its practical application. She possesses advanced-level language proficiency in several languages. She had primarily worked in the fields of education and the social sciences, managing both an educational institution for children and an educational foundation. The researcher aims to examine language application through the lenses of practical usage and security science, with the goal of uncovering findings applicable to modern encryption methods.

MONDICS-KURMAY Livia jelenleg a Biztonságtudományi Doktori Iskola PhD hallgatója (IV. féléves), témavezetője Prof. Dr. Rajnai Zoltán. Az Óbudai Egyetem munkatársa, a Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar oktatói igazgatója. Kutatását biztonságtudományi területen végzi, témája „Titkos katonai nyelvezet alakulása és annak technikai háttere USA-ban, Németországban és Oroszországban”. Tanulmányait bölcsész- és társadalomtudományi karokon végezte az Eszterházy Károly Főiskolán és Károli Gáspár Református Egyetemen, angol nyelv és kultúra területén. Tanulmányait a Yale Egyetemen kiegészítette, ahol a kutatási területéhez kapcsolódó két tantárgyat végzett el. Olyan területen született és növekedett, ahol a többnyelvűség és több kultúra találkozott, ezért fokozottan érdekelte a nyelvészet és annak gyakorlati alkalmazása. Valamennyi nyelvből rendelkezik felsőfokú nyelvvizsgával. Edigi pályafutása során főleg oktatási és társadalomtudományi területen tevékenykedett, gyermekekkel foglalkozó intézményt vezetett és oktatással, oktatási anyagok kidolgozásával és fejlesztéssel kapcsolatos alapítványt. A tudományos fokozat megszerzésénél a témaválasztás a kutató meglévő nyelvi készségeire alapul és olyan céllal történt, hogy a nyelvek alkalmazását gyakorlati és biztonságtudományi területek szempontjából vizsgálja, olyan eredményeket feltárva, melyek a mai titkosítási eljárásoknál is használatosak lehessenek.

PÁL Károly

karoly.pal@doublingwings.com

Károly PÁL is the co-owner of Doublingwings. He deals with UAV and drone technology, drone development, use, education, and pilot training. His company is the only forensic drone reconnaissance agency in Hungary. As a drone pilot, he has more than 400 hours of flight time, and is currently mainly investigating wind turbines installed in the North Sea using drone technology. He is involved in IT technology (data transmission, control, data storage and transmission) and defense developments related to drone technology. During the drone development so far, the drones have been equipped with gas sensors, with which agricultural, environmental, and industrial measurements have been performed. They want to further develop their capabilities, and they have

PÁL Károly a Doublingwings cég társtulajdonosa. UAV és azon belül dróntechnológiával, drónfejlesztéssel, felhasználással, oktatással, pilótaképzéssel foglalkozik. Cége az egyetlen magyarországi forenzikus drón felderítő ügynökség. Drónpilótaként több mint 400 óra repülési idővel rendelkezik, jelenleg főként az Északi tengerre telepített szélturbinákat vizsgálja dróntechnológia alkalmazásával. A drón technológiához kapcsolódó IT technológia (adatátvitel, irányítás, adattárolás-továbbvitel) és védelmi fejlesztések tartoznak hozzá. Az eddigi drón fejlesztés során a drónokat gázszenzorokkal látták el, melyek segítségével mezőgazdasági, környezetvédelmi, ipari méréseket végeztek el. A képességeiket tovább kívánják fejleszteni, az Energiatudományi Kutatóközponttal el-

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

started joint drone development with the Centre for Energy Research, the aim of which is to locate lost radioactive radiation sources using drones.

kezdték a közös drónfejlesztést, melynek célja az elvesztett radioaktív sugárforrások felkutatása drón alkalmazással.

RÁCZ Ervin

racz@uni-obuda.hu

Ervin RÁCZ graduated in 1999 as a qualified secondary school teacher of physics and mathematics from the Faculty of Science at József Attila University. He obtained his PhD in physics, focusing on the experimental investigation of laser–matter interactions. He spent nearly six years as a postdoctoral researcher at the Department of Physics, University of Illinois Chicago, where he conducted experiments on X-ray laser generation and characterization. In 2011, he joined the Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering at Óbuda University. Between 2012 and 2018, he participated in the development of the ELI-ALPS Laser Research Institute, including the design and procurement of several beamlines. At Óbuda University, he also conducted research on renewable energy sources, including dye-sensitized solar cells. He habilitated in computer science in 2022 and was appointed full professor in the field of electrical engineering by the President of Hungary, effective February 1, 2025. His academic career is highly multidisciplinary, spanning several scientific fields.

RÁCZ Ervin 1999-ben szerzett fizika–matematika szakos középiskolai tanári diplomát a József Attila Tudományegyetem Természettudományi Karán. PhD-fokozatát fizikatudományból, a lézerefény–anyag kölcsönhatás kísérleti vizsgálatából szerezte. Közel hat évet töltött posztdoktori kutatóként a University of Illinois at Chicago Fizika Tanszékén, ahol röntgenlézer-keltési és -karakterizálási kísérleteket vezetett. 2011-ben csatlakozott az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Karához. 2012–2018 között részt vett az ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet megvalósításában, több nyaláb-vonal tervezésében és beszerzésében. Az Óbudai Egyetemen megújuló energiaforrásokat, köztük festékkérekényített napelemeket is kutatott. 2022-ben informatikatudományból habilitált, 2025. február 1-jétől pedig a köztársasági elnök egyetemi tanárrá nevezte ki villamosmérnöki tudományterületen. Munkássága több tudományterületet átfogó, multidiszciplináris.

RAJNAI Zoltán

rajnai.zoltan@uni-obuda.hu

Professor Zoltán RAJNAI serves as Hungary's Cybersecurity Coordinator and as a professor and Vice-Rector General at Óbuda University. He earned his university degree in 1993 and defended his doctoral (PhD) thesis in 2001 at the Miklós Zrínyi National Defence University. Previously, he served as a colonel in the Hungarian Defence Forces (1981–2013) and as a professor specializing in IT, infocommunication, and telecommunication systems at the National Defence University (1993–2013). He completed advanced staff officer training in Paris. From 2007 to 2011, he was the Hungarian program director for the COMMIT French-Hungarian international scientific (R&D&I) project. He was serving as a visiting lecturer at the Military Technical College in Rennes, France. From 2015 to 2025, Prof. Dr. Zoltán RAJNAI served as Dean of the Faculty of Mechanical and Safety Engineering and subsequently as Vice-Rector General of Óbuda University. He was the founder and head of the Doctoral School of Safety Sciences. He was awarded the rank of Knight of the French National Order of Merit (2011) by the President of the French Republic in recognition of his international work in

RAJNAI Zoltán professzor, Magyarország kiberbiztonsági koordinátora, az Óbudai Egyetem professzora és általános rektorhelyettese. Egyetemi diplomáját 1993-ban szerezte, doktori (PhD) fokozatát 2001-ben védte meg a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetemen. Korábban a Magyar Honvédség ezredeseként szolgált (1981-2013), a Nemzetvédelmi Egyetem informatikai, infokommunikációs és telekommunikációs rendszerek professzora (1993-2013). Párizsban végzett felsőfokú vezérkari vezetőképzőt. 2007 és 2011 között a COMMIT francia-magyar nemzetközi tudományos (K+F+I) projekt magyarországi programigazgatója volt, ezzel párhuzamosan vendégoktató Franciaországban a Rennes-i Katonai Műszaki Főiskolán. 2015-től 2025-ig Dr. RAJNAI Zoltán a Gépész- és Biztonságtudományi Kar dékánja, majd az Óbudai Egyetem általános rektorhelyettese. A Biztonságtudományi Doktori Iskola alapítója és vezetője volt. Francia „Nemzeti Érdemrend” lovagi fokozata (2011) a felsőoktatási és tudományos kutatások területén végzett nemzetközi munkásságáért, a Fran-

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

higher education and scientific research. His primary research interests lie in the fields of cybersecurity, information security, infocommunication, and telecommunication systems.

cia Köztársaság elnökétől. Fő kutatási területe a kiberbiztonság, az információbiztonság, az infokommunikáció és a telekommunikációs rendszerek területe.

RÁTKAI Ákos Tamás

ratkai.akos@ek.hun-ren.hu

Ákos Tamás RÁTKAI has worked as a technical manager at the Radiation Protection Laboratory of the HUN-REN Centre for Energy Research since June 2026. He earned his BSc in Engineering Management from the Budapest University of Technology and Economics in 2018 and his MSc in Management and Leadership from Corvinus University of Budapest in 2020. In 2026, he completed postgraduate studies in occupational safety at BME and obtained an advanced radiation protection qualification. His professional goal is to integrate occupational safety and radiation protection, particularly to improve safety at workplaces involving ionizing radiation. He is currently pursuing a PhD at the Doctoral School on Safety and Security Sciences of Óbuda University under the guidance of his supervisor and mentor, Dr. Károly BODOR, and his internal supervisor, Prof. Dr. Ervin RÁCZ.

RÁTKAI Ákos Tamás 2026 júniusától a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumának műszaki menedzsere. Műszaki menedzser diplomáját 2018-ban a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen, Vezetés és szervezés mesterszakos közgazdász végzettségét 2020-ban a Budapesti Corvinus Egyetemen szerezte. 2026-ban elvégezte a BME munkavédelmi szakember szakirányú továbbképzését, majd bővített sugárvédelmi képesítést szerzett. Szakmai célja a munkavédelem és a sugárvédelem integrált szemléletű képviselete, különösen a sugárveszélyes munkahelyek biztonságának fejlesztése érdekében. Jelenleg az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájában készül PhD-fokozatának megszerzésére Dr. BODOR Károly konzulens és mentor, valamint Prof. Dr. RÁCZ Ervin belső konzulens szakmai iránymutatásával.

REZSABEK Nándor

rezsabek.nandor@stud.uni-nke.hu

REZSABEK, N. (1972–), is a certified geographer (specialization in resource and risk analysis) (MSc); an applied environmental researcher (specialization in environmental safety management) (BSc); an organizational plant engineer (BSc); student at the Ludovika University of Public Service, Faculty of Military Sciences and Officer Training, Doctoral School of Military Engineering (PhD). Head of secretariat of the Hungarian Economic Development Agency Public Benefit Nonprofit Ltd. (MGFÜ). Employee of the WJLF Department of Environmental Security. Vice president and board member of the Hungarian Meteoritic Society as well as head of the Meteorite Craters and Impactites Section. Member of the Hungarian Association of Military Science and its Geoinformation Section; TIT Studio Association and its Mineralogical Section; Hungarian Skeptic Society. Founder and editor-in-chief of the planetary science portal Planetology.hu.

REZSABEK N. (1972–) okleveles geográfus (erőforrás- és kockázatelemző specializáció) (MSc); alkalmazott környezetkutató (környezetbiztonsági menedzser specializáció) (BSc); szervező üzemmérnök (BSc); a Nemzeti Közszerződési Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola hallgatója (PhD). A Magyar Gazdaságfejlesztési Ügynökség Közhasznú Nonprofit Kft. (MGFÜ) titkárságvezetője. A WJLF Környezetbiztonsági Tanszékének munkatársa. A Magyar Meteoritikai Társaság alelnöke és elnökségi tagja, illetve Meteoritkráterek és Impaktitok tagozatának vezetője. A Magyar Hadtudományi Társaság és Geoinformációs Szakosztálya; a TIT Stúdió Egyesület és Ásványbarát Szakcsoportja és a Szkeptikus Társaság Egyesület tagja. A Planetology.hu bolygó tudományi portál alapító-főszerkesztője.

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

SÁNTA Róbert

santar@uniduna.hu

I am Prof. Dr. Róbert SÁNTA, Full Professor with over 20 years of experience in renewable energy research, focusing primarily on the mathematical modeling and optimization of heat pump systems and heat exchangers. My research places a strong emphasis on two-phase flow phenomena and the accurate description of both steady-state and transient thermal processes. I have published extensively and participated in numerous national and international projects, especially in the fields of industrial applications and energy efficiency. My goal is to contribute to the advancement of sustainable technologies through both theoretical and practical innovation.

Prof. Dr. SÁNTA Róbert vagyok, egyetemi tanár, több mint 20 éve foglalkozom megújuló energiák, különösen a hőszivattyús rendszerek és hőcserélők matematikai modellezésével és optimalizálásával. Kutatásaim során kiemelt figyelmet fordítok a kétfázisú áramlások, valamint a statikus és tranziens hőtani folyamatok pontos leírására. Számos hazai és nemzetközi publikációval, valamint kutatási projekttel rendelkezem, különösen az ipari alkalmazások és az energiahatékonyság növelése terén. Célom, hogy a fenntartható technológiák fejlesztéséhez hozzájáruljak mind elméleti, mind gyakorlati szinten.

SZÜCS Endre

szucs.endre@bgk.uni-obuda.hu

Endre SZÜCS holds a PhD degree in military science, certified security engineer, mechanical engineer, engineering teacher. Currently, he is a doctoral supervisor and advisor at Óbuda University's Doctoral School on Safety and Security Sciences, instructor of the course "Review and analysis of the history and events of security technology", and he is also a lecturer at the Institute of Mechanical Engineering and Technology and Institute of Safety Science and Cybersecurity at Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Security Engineering. His research interests are "The possibilities of the use of renewable energy sources in safety and security technology", "Investigation of the history of safety and security technology".

SZÜCS Endre a hadtudomány PhD fokozatos, okleveles biztonságtechnikai mérnök, gépészmérnök, mérnök tanár. Jelenleg az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájában témavezető és témakiíró, „A biztonságtechnika történetének, eseményeinek áttekintése, elemzése” című tantárgyat oktató, illetve az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Gépészeti és Biztonságtudományi és Kibervédelmi Intézet óraadója. Kutatási területe A megújuló energiaforrások alkalmazásának lehetőségei a biztonságtechnikában. A biztonságtechnika történetének vizsgálata.

TÓTH Georgina Nóra

toth.georgina@bgk.uni-obuda.hu

Georgina Nóra TÓTH is an assistant professor at the Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering at Óbuda University. She completed her higher education at the Budapest University of Technology, majoring in technical informatics, and then earned a degree in Quality Engineering in 2005. In 2007, she received an MSc degree in Computer Science from the University of Debrecen. Her teaching and research activities focus on process improvement tools, quality control, and risk analysis. She is currently an independent preparatory student at the Doctoral School on Safety and Security Sciences at Óbuda University. Her research primarily focuses on human resource risks in the automotive industry, identifying competency gaps, and examining labor supply risks, with particular attention to the relationship between STEM education and industry expectations.

TÓTH Georgina Nóra egyetemi tanársegéd az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán. Felsőfokú tanulmányait a Budapesti Műszaki Főiskolán végezte műszaki informatika szakon, majd 2005-ben Minőségügyi Szakmérnöki képesítést szerzett. 2007-ben a Debreceni Egyetemen informatika szakos tanári MSc diplomát kapott. Oktatói és kutatói tevékenysége a folyamatjavítási eszközök, minőségszabályozás, kockázatelemzés területére összpontosul. Jelenleg az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájának egyéni felkészülő hallgatója. Kutatási tevékenysége elsősorban az autóiipari humánerőforrás-kockázatokra, a kompetenciahiányok feltárására és a munkaerő-ellátási kockázatok vizsgálatára irányul, különös tekintettel a STEM-képzés és az ipari elvárások összefüggéseire.

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

VÖLGYESI Péter

volgyesi.peter@ek-cer.hu

Péter VÖLGYESI obtained his MSc and PhD degrees in Environmental Science from Eötvös Loránd University. In 2014, he joined the Nuclear Security Department (EK SBL) of the HUN-REN Centre for Energy Research as a young researcher, where he was appointed head of the Detector Testing Laboratory in 2016. Since 2018, he has been the head of the Nuclear Security Department, and since the end of 2020, he has been the head of the Nuclear Forensic Analytical Laboratory. One of the main activities of the SBL is to participate in the fight against the illegal trafficking of nuclear materials and nuclear terrorism (misuse of radioactive materials, incitement to panic). The SBL maintains constant readiness to carry out the activities of Regulation 490/2015 and, if necessary, for on-site inspections, as well as for the delivery of unknown materials to the EK site. In the field of nuclear forensics, the institute has been a designated collaborating center of the International Atomic Energy Agency since 2016.

VÖLGYESI Péter az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerzett környezettudományi MSc és PhD diplomát. 2014-ben fiatal kutatóként csatlakozott a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumához (EK SBL), ahol 2016-ban a Detektortesztelő laboratórium vezetőjének nevezték ki. 2018 óta a Sugárbiztonsági Laboratórium, majd 2020 végétől a Nukleáris törvénytörvényes analitikai laboratórium vezetője. Az SBL egyik fő tevékenysége a nukleáris anyagok illegális forgalmazása (illicit trafficking), illetve a nukleáris terrorizmus (sugárzó anyagokkal való visszaélés, pánikkeltés) elleni küzdelemben való részvétel. Az SBL állandó készenlétet tart fenn a 490/2015-ös rendelet tevékenységének ellátásához és szükség esetén helyszíni vizsgálatokhoz, továbbá az ismeretlen anyagoknak az EK telephelyére történő beszállításához. A nukleáris törvénytörvényes területen az intézet 2016 óta a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség kinevezett együttműködő központja.

ZAGYVAI Péter

zagyvai.peter@ek-cer.hu

Péter ZAGYVAI graduated as a chemical engineer from the Budapest University of Technology (BME) in 1976 and has worked in radioanalysis and radiation protection throughout his career. From 1990 to 2010, he served as head of radiation protection at the BME Training Reactor. Since 2010, his main workplace has been the HUN-REN Centre for Energy Research, where he works as a senior research fellow at the Environmental Physics Laboratory and serves as site radiation protection officer. He also lectures at BSc and MSc level at BME. In addition, he supports the ELI ALPS Laser Research Institute as a radiation protection expert and occasionally contributes to International Atomic Energy Agency (IAEA) activities as a lecturer and consultant, particularly in the fields of accident prevention and facility de-commissioning.

ZAGYVAI Péter, okleveles vegyészmérnökként végzett 1976-ban a Budapesti Műszaki Egyetemen (BME). Már a diplomázás alatt is radioanalitikával foglalkozott, és utána is ezen a tudományterületen maradt. 1990-től 2010-ig a BME Nukleáris Technikai Intézetéhez tartozó oktatóreaktor sugárvédelmi vezetője volt, 2010-től fő munkahelye a jelenlegi HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont lett. A Környezetfizikai Laboratórium tudományos főmunkatársaként dolgozik, 2021 óta nyugdíjasként, emellett ellátja a telephelyi sugárvédelmi megbízott feladatokat. Másodállásban megmarad a BME-n, a Természettudományi Kar, a Gépészmérnöki és Energetikai Kar, valamint a Vegyész- és Biomérnöki Kar BSc és MSc képzéseiben tart előadásokat. Ezek mellett sugárvédelmi szakértőként segíti a szegedi ELI ALPS lézerközpont munkáját, és alkalmanként tanfolyami előadóként és konzulensként részt vesz az International Atomic Energy Agency (IAEA) baleset-elhárítással és létesítmények leszerelésével foglalkozó munkacsoportjaiban.

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

ZÓNAI Viktor

zonai.viktor@uni-obuda.hu

My name is Viktor ZÓNAI. I am a certified mechanical engineer specialized in building services and process engineering, managing director of ThermoSun Ltd., and a PhD student at the Doctoral School of Safety and Security Sciences at Óbuda University. My research focuses on the energy analysis of ground source heat pump systems, with particular attention to their efficiency and environmental sustainability. My goal is to improve the performance of low carbon heating systems. I also teach energy and building services engineering subjects at the University of Dunaújváros. I have published several scientific papers on the optimization of HVAC systems. I am a member of the Hungarian Chamber of Engineers, holding professional licenses for design and technical supervision. I have more than ten years of experience in the design and implementation of thermal engineering systems.

ZÓNAI Viktor vagyok, okleveles épületgépészeti és eljárástechnikai gépészmérnök, a ThermoSun Kft. cégvezetője, valamint doktorandusz az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskolájában. Kutatási területem a talajszondás hőszivattyús rendszerek energetikai vizsgálata, különösen azok hatékonyságára és környezeti fenntarthatóságára fókuszálva. Célom az alacsony szén-dioxid-kibocsátású hőellátó rendszerek teljesítményének növelése. Oktatási tevékenységet folytatok a Dunaújvárosi Egyetemen energetikai és épületgépészeti tárgyakban. Több tudományos publikációm jelent meg az épületgépészeti rendszerek optimalizálása témájában. Tagja vagyok a Magyar Mérnöki Kamarának, tervezői és műszaki ellenőri jogosultsággal. Több mint tízéves tapasztalattal rendelkezem hőtechnikai rendszerek tervezésében és kivitelezésében.

Creator of the cover image | A borítón látható kép alkotója

BORS Györgyi

borsgyorgyi77@gmail.com

She was born in 1977 in Tapolca, Hungary. The tragic early death of her mother was decisive in her life because she was then raised in state care until she was 18 years old. During her years there, she realized that she found the greatest pleasure in art. She studied graphic art for several years at the Railway School of Music and Fine Arts in Budapest with the painter and sculptor György BENEDEK, and later with Árpád "Pika" NAGY and Zoltán SEBESTYÉN. In 2007 she graduated from the King Zsigmond College with a degree in Cultural Management. From 2017, her mentor has been Kálmán GASZTONYI, from whom she learned the different techniques of oil painting. She is a narrative painter. It is important for her to be creative about something, a feeling, an idea, an impression, or even a human quality. She creates using the tools of abstract painting. With her innovative style, she brings experiences, feelings and thoughts with the tools of painting to a universal level that we have all known or experienced in some form. Her work has been successfully featured in various domestic and international competitions and exhibitions (Budapest, London, New Jersey, Hong Kong) and has appeared in several contemporary art albums and art magazines. One of her works can also be

Magyarországon, Tapolcán született 1977-ben. Édesanyja tragikus korai halála meghatározó volt az életében, mert ezt követően 18 éves koráig állami gondozásban nevelkedett. Az ott töltött évek alatt jött rá, hogy a művészetben leli a legnagyobb örömet. Grafikai tanulmányokat folytatott több évig Budapesten a Vasutas Zene- és Képzőművészeti Iskolában BENEDEK György festő és szobrászművésznél, majd később NAGY Árpád „Pika”-nál és SEBESTYÉN Zoltánnál is tanult. 2007-ben diplomázott a Zsigmond Király Főiskola Művelődésszervező szakán. 2017-től mestere GASZTONYI Kálmán, akitől elsajátította az olajfestés különböző technikáit. Narratív festő. Fontos számára, hogy alkotásai szóljanak valmiről, egy érzésről, egy gondolatról, egy benyomásról, vagy akár egy emberi tulajdonságról. Az absztrakt festészet eszközeit felhasználva alkot. Innovatív stílusával olyan tapasztalatokat, érzéseket és gondolatokat emel a festészet eszközeivel egyetemes szintre, melyeket mindnyájan ismerünk vagy megéltünk már valamilyen formában. Munkái sikeresen szerepeltek különféle hazai és nemzetközi versenyeken és kiállításokon (Budapest, London, New Jersey, Hong Kong). Több kortárs művészeti albumban, art magazinban jelentek meg munkái. Egyik alkotása a Magyar Cirkuszművészeti Múzeum

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

found in the public collection of the Hungarian Museum of Circus Art. Her style combines geometric and lyrical abstraction; the two approaches coexist and organically reinforce her art.

közgyűjteményében is megtalálható. Kifejezőmódja a geometriai- és lírai absztrakt, melyek egymás mellett, de mégis szervesen összefonódva erősítik művészetét.

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

Vol 8, No 3, 2026. | 2026. VIII. évf. 3. szám

CONTENTS | TARTALOM

Security Systems column	Biztonságtechnika rovat
--------------------------------	--------------------------------

BAUMGARTNER Helga

Facial recognition systems – The role and selection criteria of training databases	Az arcfelismerő rendszerek alapja – a tanuló adatbázisok szerepe és kiválasztási szempontjai
--	--

1-7

Information Security column	Információbiztonság rovat
------------------------------------	----------------------------------

MONDICS-KURMAY Lívía – RAJNAI Zoltán

Development of secret languages and practical aspects of its application	A Titkos nyelvezet alakulása és alkalmazásának gyakorlati szempontjai
--	---

9-25

Industrial and Operational Safety column	Ipar- és üzembiztonság rovat
---	-------------------------------------

HORVÁTH András – FARKAS Gabriella – SZÜCS Endre

Comparative analysis of the AQAP defence and IATF 16949 automotive requirement systems	A hadiipari AQAP és az autóiipari IATF 16949 követelményrendszerek összehasonlító elemzése
--	--

27-39

TÓTH Georgina Nóra – DRÉGELYI-KISS Ágota

Risks related to human resources management in the automotive industry	A humán erőforrás vállalati működéssel összefüggésbe hozható kockázatai az autóiiparban
--	---

41-51

Security of Environment column	Környezetbiztonság rovat
---------------------------------------	---------------------------------

REZSABEK Nándor

Comparative Analysis of Impact and Volcanic Crater Geosites	Impakt és vulkáni kráter geohelyszínek összehasonlító elemzése
---	--

53-62

Artificial Intelligence column	Mesterséges intelligencia rovat
---------------------------------------	--

BURAI István György – KOLLÁR Csaba

Safety Issues of AI-Based Engineering Assistance in Human-Robot Interaction	Az MI-alapú mérnöki asszisztencia biztonsági kérdései az ember-robot interakcióban
---	--

63-70

Safety and Security in General column	Munkabiztonság rovat
--	-----------------------------

HERÉNYI Zoltán

New Opportunities in Occupational Accident Data Processing: Investigating the Prerequisites for AI-Based Support (Part Two)	A munkabaleseti adatfeldolgozás új lehetőségei: AI-támogatás előfeltételeinek vizsgálata (második rész)
---	---

71-84

Safety and Security Sciences Review	Biztonságtudományi Szemle
international peer-reviewed, professional and scientific journal of safety and security sciences	a biztonságtudomány nemzetközi, lektorált, szakmai és tudományos folyóirata

RÁTKAI Ákos – BODOR Károly – RÁCZ Ervin – ZAGYVAI Péter

The Impact of Occupational Safety Requirements on Radiation Shielding Design in a 155 mm Ammunition Manufacturing NDT System	A munkavédelmi követelmények hatása a sugárvédelmi árnyékolás tervezésére egy 155 mm-es lőszergyártó NDT rendszer esetén
--	--

85-101

Technical Security column	Műszaki biztonság rovat
----------------------------------	--------------------------------

**BODOR Károly – VÖLGYESI Péter – ZAGYVAI Péter – GULYÁS Attila –
PÁL Károly – MARSÍ Balázs – RÁTKAI Ákos**

Development of Drones for Radiation Protection Applications	Sugárvédelmi alkalmazásokra használható drónok fejlesztése
---	--

103-124

ZÓNAI Viktor – SÁNTA Róbert

Diagnostic Evaluation of a Parasitic Heat Release Zone in Ground Source Heat Pump Systems	Parazita hőleadási zóna diagnosztikai értékelése talajszondás hőszivattyús rendszerekben
---	--

125-143

**FACIAL RECOGNITION SYSTEMS –
THE ROLE AND SELECTION CRITERIA
OF TRAINING DATABASES****AZ ARCFELISMERŐ RENDSZEREK
ALAPJA – A TANULÓ ADATBÁZISOK
SZEREPE ÉS KIVÁLASZTÁSI SZEMPONTJAI**BAUMGARTNER Helga¹**Abstract**

The effectiveness of facial recognition systems is closely linked to the quality, composition, and diversity of the training databases used for the development of facial recognition models. A well-structured database plays a pivotal role in ensuring that models provide accurate and reliable results in real-world environments. The aim of this study is to examine the role of facial image databases in artificial intelligence-based facial recognition systems, and to analyse the most important criteria for selecting databases. The study highlights that the foundation of accurate and reliable facial recognition systems lies in the appropriate selection and use of training databases, ensuring that algorithms learn from diverse samples and improve their generalisation capability while reducing potential bias.

Keywords

facial recognition, training databases, dataset bias, artificial intelligence, demographic bias, database selection

Absztrakt

Az arcfelismerő rendszerek hatékonysága szorosan összefügg a modellek tanításához alkalmazott tanuló adatbázisok minőségével, összetételével és változatosságával. A jól strukturált adatbázis kulcsszerepet játszik abban, hogy a modell pontos és megbízható eredményeket nyújtson valós környezetben is. A tanulmány célja az arcfelismerő adatbázisok szerepének bemutatása a mesterséges intelligencián alapuló modellek működésében és hatékonyságának növelésében. Az írás elemzi az adatbázisok kiválasztásának legfontosabb szempontjait. A tanulmány rámutat arra, hogy a pontos és megbízható arcfelismerő rendszerek fejlesztésének egyik alapvető feltétele a megfelelő tanuló adatbázis kiválasztása és alkalmazása, amely biztosítja, hogy az algoritmusok változatos mintákon tanuljanak, és a modellek általánosító képességének növelésében, miközben csökkenti a torzításokat.

Kulcsszavak

arcfelismerés, tanuló adatbázisok, adatbázis-torzítás, mesterséges intelligencia, demográfiai torzítás, adatbázis kiválasztás

¹ baumgartner.helga@phd.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0003-7938-7614 | PhD Student, Doctoral School for Safety and Security Sciences, Óbuda University | Doktorandusz, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

BEVEZETŐ

Napjainkban az arcfelismerés a mesterséges intelligencián alapuló biometrikus azonosítás az egyik leggyorsabban fejlődő és legszélesebb körben alkalmazott technológiája, amely egyre nagyobb szerepet tölt be életünk minden területén – nemcsak az arcfelismerésen alapuló telefonfeloldásban és a személyre szabott marketingmegoldásokban mutatkozik meg, hanem a biztonságtechnika, a rendvédelem és a terrorizmus elleni védekezés területén is. [1]

A nagy forgalmú közterületekre, mint például repülőterekre, stadionokra, pályaudvarokra, valamint utcákra kihelyezett arcfelismerő rendszerek hatékonyan támogatják a bűnüldöző szervek munkáját, elősegítve a körözött személyek azonosítását és előállítását is. A határellenőrzés során az arcfelismerő rendszerek képesek valós időben ellenőrizni az útiokmányban szereplő arckép és a tulajdonosa közötti egyezést.

A hagyományos arcfelismerő rendszerek meghatározott mintázatok – például az arányai vagy jellegzetes pontjai – alapján azonosítják a személyeket, és önmagukban nem igényelnek mesterséges intelligenciát. Az arcfelismerés technológiai fejlődésén keresztül megfigyelhető, hogy már azelőtt is sikeresen működtek arcfelismerő szoftverek, hogy a mesterséges intelligencia mindennapi életünk szerves részévé vált volna. Napjainkban azonban a mesterséges intelligenciát alkalmazó megoldások szinte megkerülhetetlenné váltak, növelve a technológia hatékonyságát.

A mesterséges intelligencián alapuló arcfelismerő szoftverek egyik legfontosabb építőeleme a nagy volumenű, változatos tanuló adatbázis, amelyen az algoritmusok tanulnak és fejlődnek. A modell teljesítménye közvetlenül függ az algoritmus fejlesztéséhez használt adatbázis minőségétől – minél nagyobb elemszámú, jobb minőségű és változatosabb adatbázist alkalmazunk a modell fejlesztésekor, annál hatékonyabb modellt építhetünk. Egy megfelelően összeállított vagy kiválasztott adatbázis biztosítja azt a változatosságot, amely lehetővé teszi a különböző környezetben és feltételek mellett való alkalmazás eredményességét. [2]

A mélytanuláson alapuló mesterséges intelligencia rendszerek esetében az adatok szerepe különösen meghatározó, mivel nagy mennyiségű adatból képesek statisztikai mintázatokat felismerni és ezek alapján általánosítani. Ennek következtében a tanuló adatok mennyisége, minősége és változatossága közvetlen hatással van a modell teljesítményére és megbízhatóságára.

Egy nem megfelelően összeállított adatbázis torzíthatja a tanulási folyamatot, ami pontatlanabb felismeréshez, illetve magasabb hibaarányhoz vezethet, ezáltal csökkentve a rendszer valós környezetben történő alkalmazhatóságát. [3]

Az arcképadatbázis összetétele nemcsak technikai, hanem társadalmi és etikai szempontból is meghatározó, mivel a nem megfelelően reprezentatív adatok torzíthatják az eredményeket. Az elmúlt évek kutatásai rámutattak arra, hogy az arcfelismerő rendszerek pontossága jelentősen eltérhet az egyes demográfiai csoportok között, amennyiben a tanuló adatbázis nem reprezentálja megfelelően a populáció sokszínűségét. Az ilyen torzítások a modellek pontosságának és megbízhatóságának romlásához vezethetnek bizonyos csoportok esetében, ami különösen érzékeny a biztonságtechnika, a rendvédelem és a terrorizmus elleni védekezés területén. Ez különösen fontos olyan alkalmazási környezetben, ahol az arcfelismerés nem kontrollált körülmények között, hanem valós, komplex környezeti feltételek mellett történik. [4]

A modern arcfelismerő rendszerek fejlesztése során egyre nagyobb hangsúlyt kap az adatbázisok demográfiai kiegyensúlyozottsága, a megfelelő címkézés, valamint a különböző környezeti feltételek reprezentáltsága. A tanuló adatbázisok megfelelő kialakítása, illetve kiválasztása nem csupán technológiai kérdés, hanem alapvető feltétele annak is, hogy az arcfelismerő rendszerek megbízhatóan, igazságosan és széles körben alkalmazható módon működjenek. [4]

A tanulmány célja annak bemutatása, hogy a tanuló adatbázisok milyen szerepet töltenek be, és a mesterséges intelligencián alapuló arcfelismerő rendszerek fejlesztésében, valamint, hogy milyen szempontok alapján ítéltethető meg egy adatbázis alkalmassága. Az arcfelismerő rendszerek hatékonyságának vizsgálata ezért nem korlátozódhat kizárólag az alkalmazott algoritmusokra, hanem ki kell terjednie a tanuló adatbázisok felépítésének és összetételének elemzésére is.

ADATBÁZISOK SZEREPE

Az arcfelismerő technológia az elmúlt évek során jelentős fejlődésen ment keresztül. Számos arcfelismerő módszert és adatbázist fejlesztettek ki annak érdekében, hogy a technológia minél hatékonyabban működjön mind szabályozott körülmények között, mind természetes környezetben. Az arcfelismerő rendszerek működési folyamata során a tanuló adatbázisok nem közvetlenül a felismerési folyamatban jelennek meg, hanem a modell fejlesztésének és tanításának szakaszában töltenek be kulcsszerepet. A tanítási fázisban a tanuló adatbázisok szolgálnak alapul ahhoz, hogy a modell elsajátítsa az arcokra jellemző mintázatokat és szerkezeti sajátosságokat. Az azonosítási folyamat során a rendszer már a betanított modell által kinyert azonosítók alapján hasonlítja össze az aktuális képet a referencia adatokkal.

Az arcfelismerő rendszerek megvalósítása során többféle technológiai módszer alakult ki, amelyek az arc vizsgálatának módjában különböznek egymástól. A különböző technológiai megközelítések ellenére közös vonás, hogy mindegyik esetben meghatározó szerepet játszik a tanuló adatbázisok megfelelő kialakítása, mivel a modellek teljesítménye nagymértékben függ a tanulási folyamat során felhasznált adatok minőségétől és változottságától. Az arcfelismerés során alapvetően kétféle módszer terjedt el. [5]

- A 2D alapú módszer az arcot síkban vizsgálja, az arcról készített kép alapján elemzi. Ez a módszer hatékony ellenőrzött körülmények között, de érzékeny a megvilágítási viszonyok, a póz vagy az arckifejezés változásaira.
- A 3D alapú módszer az arc térbeli szerkezetét és mélységét vizsgálja, így kevésbé érzékeny a megvilágítás változására, azonban az arckifejezés változásai továbbra is kihívást jelenthetnek.

Mind a 2D, mind a 3D módszerek hatékonyak lehetnek a megfelelő körülmények között, de mindkettőnek megvannak a maga korlátai. Az utóbbi években a mélytanulás-alapú módszerek – és azon belül is a konvolúciós neurális hálózatok (CNN) – jelentősen átalakították az arcfelismerő rendszerek fejlesztését, lehetővé téve a komplex arcvonások automatikus felismerését nagyméretű adatbázisok segítségével. A gyakorlatban ezért az arcfelismerő rendszerek teljesítménye nemcsak az alkalmazott modellektől, hanem a tanuló adatbázisok minőségétől és változatosságától is függ. A neurális hálózatok képesek a rendelkezésére bocsátott nagy mennyiségű adatból kinyerni a számukra releváns jellemzőket,

valamint autonóm módon tanulni és folyamatosan fejlődni anélkül, hogy erre kifejezetten programozva lennének. [2]

Ez a tanulási képesség azonban nagymértékben függ attól, hogy milyen tanuló adatbázison fejlesztették ki az algoritmust. Az arcfelismerő szoftver megfelelő működéséhez alapvetően nagy mennyiségű és változatos tanuló adatbázisra van szükség. Az adatbázisnak minél több alanytól, változatos szögből, különböző fényviszonyok mellett és különböző arckifejezésekkel rögzített képeket kell tartalmaznia, hogy az algoritmus képes legyen az arcok pontos felismerésére és megkülönböztetésére.

A mélytanulási modellek esetében különösen fontos a nagy mennyiségű tanuló adat rendelkezésre állása, mivel a neurális hálózatok paramétereinek száma rendkívül magas lehet, ezáltal a modellek megbízható tanításához nagyszámú és változatos adat szükséges. Amennyiben a tanuló adatbázis nem megfelelő méretű, vagy nem kellően változatos, a modell nem lesz képes megfelelően általánosítani, és valós környezetben, korábban nem látott képeken pontatlanabb eredményeket adhat. [3]

A tanuló adatbázisok nemcsak a modellek tanításában játszanak kulcsszerepet, hanem azok általánosítási képességét is meghatározzák, vagyis azt, hogy mennyire lesz képes felismerni olyan arcokat is, amelyekkel nem találkozott a tanítás során. Az adatbázisok nemcsak a modell tanítása, hanem a validálás és a tesztelés során is fontos szerepet játszanak. A modell fejlesztése során a rendelkezésre álló adatbázist többnyire három részre osztják véletlenszerűen, annak érdekében, hogy a tanítás finomhangolás és értékelés egymástól független adathalmazokon történjen:

- 60-80% tréning készlet: az algoritmus tanítására szolgál, amelyből megtanulja az arcfelismeréshez szükséges jellemzőket, az azonosítási mintázatokat
- 10-20% validációs készlet: a tanítási folyamat során a modell működésének finomhangolására szolgál
- 10-20% teszt készlet: a tanítási folyamat lezárása után a modell működésének értékelésére szolgál

A teljes adatmennyiség ilyen módon történő felosztása és elkülönítése biztosítja a megfelelő fejlesztési folyamatot, amely elengedhetetlen a módszer sikerességének és megbízhatóságának szempontjából. [3]

Fontos azonban megkülönböztetni a fejlesztési folyamat során alkalmazott teszt készletet a benchmarking fogalmától. A teszt készlet a modell működésének belső mérésére és ellenőrzésére szolgál, azonban nem alkalmas a különböző modellek teljesítményének közvetlen összehasonlítására. Ennek oka, hogy a teszt készlet általában az adott kutatás vagy fejlesztés során használt adatbázisból származik, így a modell tanítási környezetéhez és az alkalmazott módszertanhoz igazodik. Emiatt a különböző kutatócsoportok által használt teszt készletek gyakran eltérő felépítésűek, különböző képfelbontással, demográfiai összetétellel vagy környezeti eltérésekkel kerülnek rögzítésre, ami megnehezíti az eredmények közvetlen összehasonlítását.

Ezt a célt szolgálja a benchmarking, amely külső, független értékelés és tesztelési eljárás. A benchmarking során nyilvános, rögzített protokollt alkalmaznak, amely lehetővé teszi a különböző modellek eredményeinek közvetlen és objektív összehasonlítását. A benchmarking során minden vizsgált algoritmust azonos adatbázison, azonos értékelési feladatok mellett tesztelnek, ami biztosítja az eredmények reprodukálhatóságát és közvetlen

összehasonlíthatóságát. Az ilyen jellegű értékelés során előre meghatározott teljesítménymutatókat alkalmaznak, mint például felismerési pontosság, hibaarány, amelyek lehetővé teszik a különböző modellek objektív értékelését.

Bár a benchmarking célra készült adatbázisok technikailag alkalmazhatók modellek tanítására is, azonban elsődleges funkciójuk a teljesítmények objektív összehasonlítása. Ezeket az adatbázisokat úgy alakítják ki, hogy egységes adatstruktúrát, pontos címkézést és jól definiált értékelési protokollokat tartalmazzanak, amely biztosítja a különböző modellek teljesítményének mérését.

AZ ARCKÉPADATBÁZISOK KIVÁLASZTÁSÁNAK SZEMPONTJAI

A tanuló adatbázisok összeállítása nem pusztán technikai kérdés, hanem olyan tervezési feladat, amely közvetlenül befolyásolja a modell megbízhatóságát és alkalmazhatóságát. A megfelelő adatbázisok kiválasztása az arcfelismerő rendszerek fejlesztésének egyik legfontosabb lépése, mivel a benne található arcképek sokaságán, azok minőségén múlik a modell pontossága. Az adatbázisok minősége nemcsak a technikai jellemzőkkel, mint például a képek felbontása vagy minősége, hanem a demográfiai és környezeti jellemzőkkel, a bőrszín, a nemek eloszlása, a korosztályok, a különböző arckifejezések és a kiegészítők jelenléte, is jellemezhető. [4] [6]:

- **Bőrszín:** az arcfelismerő modellek esetében az egyik legnagyobb kihívás a különböző bőrszínek megfelelő reprezentáltsága az adatbázisokban, amely pontatlansághoz és elfogultsághoz, illetve diszkriminációhoz is vezethet. A modell fejlesztéséhez használt adatbázisnak biztosítania kell a bőrszínek széles spektrumát, hogy pontos eredményeket nyújtson minden felhasználó számára. A bőrszín mellett a bőr fényvisszaverő-képessége is befolyásolhatja az arcfelismerés hatékonyságát, emiatt célszerű a képek rögzítését szabványosított körülmények között végezni, és külön figyelmet fordítani arra, hogy a rendszer robusztusan működjön eltérő fényviszonyok között is.
- **Nemek eloszlása:** fontos, hogy az adatbázisokban a nemek aránya kiegyensúlyozott legyen, hogy a modell mindkét nem képviselőit azonos hatékonysággal legyen képes felismerni, és ne legyen elfogult egyik nem felé sem. Amennyiben egy adott nem jelentősen felülreprezentált az adatbázisban, úgy a modell nagyobb pontossággal tanulja meg az adott nem arcvonásait, jellemzőit, míg az alul reprezentált nem esetében magasabb hibaarány jelenhet meg.
- **Korosztály:** Elengedhetetlen, hogy az adatbázis minden korosztályból tartalmazzon mintákat, hogy a modell képes legyen a különböző életfázisokban lévő személyek arcvonásait is elsajátítani. A korosztályok közötti változatosság elengedhetetlen, hogy a rendszer minden életkorú személyt megfelelően tudjon kezelni. Külön figyelmet kell fordítani az életkor, nem és bőrszín együttes előfordulására – például idősebb sötét bőrű nők esetében –, mivel ezek a tényezők együttesen jelentősen növelhetik az arcfelismerés hibaarányát. Ezért az adatbázisnak biztosítania kell az összetett demográfiai jellemzőkkel rendelkező csoportok megfelelő képviseletét is
- **Egyéni jellemzők és arcvonások:** minden személy rendelkezhet egyedi arcvonásokkal, amely adódhatnak az arc természetes struktúrájából – például széles állkapocs, aszimmetrikus szemek vagy nagyobb homlok – vagy maradandó jegyekből – például orrtörés következtében megváltozott orrnyereg vagy baleseti hegek. Ezek

befolyásolhatják az arcfelismerés pontosságát. Minél több egyedi jellemzővel rendelkező arcképet tartalmaz az adatbázis, annál hatékonyabban alkalmazható a rendszer a különböző személyek felismerésére.

- **Kiegészítők:** az arcfelismerés folyamata nem mindig történik kontrollált környezetben, így gyakran előfordul, hogy az emberek különböző kiegészítőt viselnek, mint például szemüveg, testékszerek, különböző frizurák, vagy arcszőrzet. A valós környezetben működő arcfelismerő rendszerek – például repülőtereken, határátkelőhelyeken vagy közterületi kamerarendszerekben – gyakran olyan személyek arcvonásait rögzíti, akik különböző kiegészítőket viselnek. A napszemüveg, a sapka, a sál, vagy arcszőrzet részben takarhatja az arc jellemző pontjait, ami jelentősen befolyásolhatja a modell teljesítményét. Ezek mind olyan tényezők, amelyek megnehezítik a felismerés folyamatát, ezért az adatbázisnak tartalmaznia kell valamilyen kiegészítővel rendelkező arcképet is a megfelelő működés érdekében.
- **Arckifejezések és hangulatok:** az arcfelismerés során az emberek többsége nem semleges arckifejezéssel látható. A különböző arckifejezések és hangulatok jelentősen befolyásolják egy személy megjelenését, ezért fontos, hogy az adatbázisok olyan arcképeket is tartalmazzanak, amelyek különböző arckifejezéseket vagy hangulatokat mutatnak a megfelelő tanulási kimenet szempontjából. Ez különösen fontos természetes környezetben, ahol az arcok ritkán jelennek meg semleges kifejezéssel.
- **Különböző szögek és megvilágítások:** fontos, hogy az adatbázisokban található arcképek ne csupán szemből vagy oldalprofilból ábrázolják a személyeket, hanem különböző szögekből, a fejet elfordítva, megdöntve, vagy billentve is. A legideálisabb, ha ugyanazon arcképek minden említett változatban megtalálhatóak. Mindamelllett a megvilágítás változatossága is elengedhetetlen, hogy minél szélesebb spektrumon tanulhasson a modell. A valós környezetben működő kamerarendszerek ritkán rögzítik az arcot ideális, frontális nézetből. A kamerák elhelyezkedése, a személy mozgása, valamint a környezeti fényviszonyok jelentős eltéréseket eredményezhetnek a rögzített képek között. Amennyiben a tanuló adatbázis kizárólag kontrollált körülmények között készült képeket tartalmaz, úgy a modell teljesítménye jelentősen romolhat természetes környezetben, ezért a fejlesztés során célszerű olyan adatbázisokat alkalmazni, amelyek különböző kameraszögekből és eltérő megvilágítási körülmények között készült arcképeket is tartalmazznak.
- **Felbontás és képminőség:** minél nagyobb felbontású és jobb minőségű képek találhatóak az adatbázisban, annál hatékonyabban képes a modell tanulni, és annál pontosabban, illetve megbízhatóbban működik az arcfelismerés különféle körülmények között. A gyenge minőségű vagy alacsony felbontású képek csökkenthetik a modell tanulási képességét, azonban jól tükrözik a valós környezetet, így hozzájárulhatnak a modell alkalmazkodóképességének növeléséhez.
- **Címkézés:** az adatbázisban szereplő arcképek minél pontosabb címkézése, azaz a képek kategóriákba sorolása segíti az algoritmusokat abban, hogy megfelelően értelmezzék a képeket, megtanulják a különböző bőrszínekre, nemekre, korosztályokra, arckifejezésekre stb. jellemző sajátosságokat. A nem megfelelő vagy hiányos címkézés megnehezítheti az algoritmus tanulási folyamatát, ami pontatlan felismerésekhez vezethet.

Amennyiben az adatbázis megfelel a fenti szempontoknak, az lehetővé teszi, hogy az algoritmus kellően változatos mintákon tanuljon, így növelve annak valószínűségét, hogy az arcfelismerő rendszer bőrszíntől, nemtől vagy életkortól függetlenül pontosan működjön, hozzájárulva a technológia megbízható alkalmazásához valós élethelyzetekben is.

ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány rámutatott, hogy az adatbázisok minősége, változatossága, címkézett-sége és reprezentativitása közvetlenül befolyásolja a modellek hatékonyságát, pontosságát és általánosító képességét. A nem, életkor, bőrszín, arckifejezés, fényviszony és egyéb demográfiai vagy vizuális jellemzők megfelelő jelenléte elengedhetetlen a megbízható működéshez.

A megfelelően kialakított, valamint a kellő odafigyeléssel kiválasztott adatbázisok hozzájárulnak ahhoz, hogy a modellek változatos környezetben rögzített arcképeken tanuljanak, és ezáltal a valós környezetben történő alkalmazás során is megbízhatóan működjének. Ennek megfelelően az arcfelismerő modellek fejlesztése során kiemelt figyelmet kell fordítani a tanuló adatbázisok kialakítására, illetve kiválasztására.

A jövőbeli fejlesztések szempontjából ezért kiemelt jelentőségű, hogy a kutatók és a fejlesztők megfelelő figyelmet fordítsanak az adatbázisok összeállítása során a reprezentativitásra és a minőségre. A technológia fejlődésével párhuzamosan egyre nagyobb hangsúlyt kapnak azok a kutatások, amelyek a torzítások csökkentésére, valamint a modellek általánosító képességének javítására irányulnak. Ennek eredményeként az arcfelismerő rendszerek alkalmazása a jövőben várhatóan egyre megbízhatóbbá válhat és egyre szélesebb körű alkalmazási lehetőséget kínálhat.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] W. Ayad, S. Qays, A. G. Perera and A. Al-Naji, “Facial Recognition Databases: Recent Developments and Review of Methods”, *Journal of Techniques*, vol. 5, No. 4, pp. 95-104, 2023, DOI: <https://doi.org/10.51173/jt.v5i4.1729>
- [2] I. Adjabi, A. Ouahabi, A. Benzaoui and A. Taleb-Ahmed, “Past, present and future of face recognition: A review”, *Electronics*, vol. 9, No. 8, Art. No. 1188, 2020, DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9081188>
- [3] M. Szemenyei and D. Varnyú, “Deep Learning a Vizuális Informatikában – Egyetemi Jegyzet”, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Irányítástechnika és Informatika Tanszék <https://deeplearning.iit.bme.hu/Public/DL/Jegyzet.pdf>
- [4] J. Buolamwini and T. Gebru, “Gender Shades: Intersectional Accuracy Disparities in Commercial Gender Classification”, *Proceedings of Machine Learning Research*, vol. 81, pp. 1-15, 2018 <https://proceedings.mlr.press/v81/buolamwini18a/buolamwini18a.pdf>
- [5] T. Kovács, I. Milák and Cs. Otti, “A biztonságstudomány biometria aspektusai”, *Pécsi Határőr Tudományos Közlemények*, vol. XIII, Magyar Rendészettudományi Társaság, 2012, pp. 485-496
- [6] K. Kotwal and S. Marcel, “Review of Demographic Bias in Face Recognition”, 2025, DOI: [10.48550/arXiv.2502.02309](https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.02309)

**DEVELOPMENT OF SECRET LANGUAGES
AND PRACTICAL ASPECTS OF ITS
APPLICATION****A TITKOS NYELVEZET ALAKULÁSA ÉS
ALKALMAZÁSÁNAK GYAKORLATI
SZEMPONTJAI**MONDICS-KURMAY Livia¹ – RAJNAI Zoltán²**Abstract**

The concept of a secret language can cover many areas. It can be used for personal purposes, or as a means of secret communication for industrial or military purposes. This study takes a security-scientific approach to the topic of secret language. The first part of the paper introduces three main periods in the evolution of cryptography, followed by a more detailed analysis of three secret languages, where the author aims to examine the different aspects of the effectiveness of secret languages that have emerged in their application. Analysing this experience, the author draws conclusions that can be applied to warfare and security science.

Keywords

encryption, Enigma machine, Navaho, military coding, Caesar-coding, efficient coding

Absztrakt

A titkos nyelvezet, mint fogalom sok területet érinthet. Lehet személyes célokat szolgáló felhasználása, ipari vagy hadi célokból alkalmazott kommunikációs mód. Jelen tanulmányban biztonság tudományi szempontból kerül megközelítésre a titkos nyelvezet tematikája. A tanulmány első részében érintőleges bemutatásra kerül a rejtjelezés evolúciójának három főbb korszaka, majd három titkos nyelvezet kerül részletesebb elemzésre, ahol a szerző célja kivizsgálni a titkos nyelvezetek különböző hatékonysági szempontjait, amik megmutatkoztak alkalmazásuk során. Ezen tapasztalatokat elemezve a hadászat és biztonság tudomány számára is hasznosítható következtetéseket foglal össze.

Kulcsszavak

titkosítás, Enigma-gép, Navaho, katonai rejtjelezés, Caesar-kódolás, hatékony rejtjelezés

¹ m.kurmay.livia@uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0000-2455-5148 | PhD Student, Óbuda University Doctoral School of Safety and Security Sciences | doktorandusz, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

² rajnai.zoltan@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-9139-736X | professor, Óbuda University Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering, Budapest, Hungary | egyetemi tanár, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

BEVEZETÉS

A hadászatban az idők folyamán bevett szokássá vált, hogy jeleket, kódokat, szókapcsolatokat vagy speciális nyelveket használtak az üzenetek titkosítására. Lényeges mozzanat volt a katonai cselekmények lebonyolításánál az üzenetek titkosítása. Bizonyos háborúk kimenetelének alakulását is befolyásolhatta az, hogy az üzenet el tud-e jutni egyik vezetési ponttól a másikig, illetve, hogy az információt meg tudta-e szerezni az ellenség. Az üzenettitkosítás mögötti elsődleges szempont a hatékonyság és az eszközigény volt. Amint a tanulmány során megfigyelhető, a technológia fejlődésével kiszélesedett az eszközhasználat is az adott területen. Míg Julius Caesar matematikusaira és nyelvészeire számíthatott katonai nyelvezetének titkosítása során, addig a II. világháború szereplői már egy komplikált eszközt tudtak igénybe venni. Az eszközök használatánál nagyon sok esetben a betűcserélés módszeréhez nyúltak vissza. Az a nyelvezet élt tovább megfejthetetlenül, melynél a cserélt betűk kombinációja bonyolultabb volt. Ezeken kívül volt még egy feltörhetetlen nyelvezet is. Írásomat tájékoztatásul ajánlom minden érdeklődő és hadi területen tevékenykedő részére.

A KÓDOLÁS FEJLŐDÉSI SZAKASZAI

Egy titkos nyelv értéke akkor mutatkozik meg, amikor éles helyzetben helyt tud állni. Az élet különféle területén tétje van az ilyen helyzeteknek. Gondoljunk egy szerelmes üzenetre, aminek kódolását közösen találták ki az érintettek és ily módon megmenekültek a szülők haragjától. Hadi síkon is megfigyelhető az üzenetek kódolásának fontossága, amiktől egy ország területének hovatartozása és emberek tucatjainak élete függ. Az emberiség titkosítás-evolúciója több szakaszon ment keresztül. Jelen írás szűk keretei miatt – korszakonként – csak néhány titkosítás-típus bemutatására kerül sor azért, hogy az olvasó egy általános képet kaphasson az adott korok titkosítási technikáiról.

Az ókorban többféle rejtjelezést alkalmaztak. A lehetőségeknek csak a rendelkezésre álló anyagok szabhattak határt. Az emberi kreativitás nem volt kérdéses, ezért érdekességképpen néhány példát szeretnék megemlíteni. Ilyen volt a Tűztávíratózás, ahol megfelelő számú fáklyák alkalmazásával üzentek, vagy a szolgák fejére írt üzenetek. Majd idővel egyre nagyobb teret kapott az ábécé betűinek játéka. A titkosítás ezzel a monoalfabetikus (jelentése: egy ábécé) módszer alkalmazása felé haladt. Példa e módszer alkalmazására a görögöknél (Kr.e. III sz.) használt szkütálé nevezetű tárgy, ami feltehetőleg a titkosítás egyik fő eszköze volt. Működése azon az elven alapult, hogy egy vékony bőrszíjat farúdra tekertek úgy, hogy a bőrsávok egymás mellett helyezkedjenek el. Ilyen módon került rá az üzenet, a betűket egymás mellé írták. Az üzenet célba juttatásánál csupán arra kellett ügyelni, hogy az összetekert, betűhalmazt tartalmazó bőrszíj épségben odaérjen. A dekódolása viszont már trükkösebb volt, mivel csak olyan farúdra visszatekerve volt értelmezhető az üzenet tartalma, melynek vastagsága megegyezett az eredeti farúd vastagságával. [1]. Korabeli feljegyzésekből feltehető, hogy Kr. e. 404-ben Lüsandrosz spártai hadvezér időben értesülhetett a perzsa támadásról ennek az eszköznek a segítségével, így fel tudott készülni a támadásra. [2]



1. ábra: Szküttálé

(Forrás: Wikipedia <https://hu.wikipedia.org/wiki/Szk%C3%BCtale>)

A rómaiaknál a Julius Caesarról elnevezet ún. Caesar-titkosítással juttatták célba a rejtett üzeneteket. Ezt a betűeltoláson alapuló módszert írásomban részletesebben fogom elemezni. Eszközigénye nem túl nagy, ezért feltöréséig jó szolgálatot tehetett. [3]

A középkorban a titkosírás virágkorát élte. A különböző irányú törekvések alapja a betűkkel, számokkal, szimbólumokkal való kísérletezés volt. A titkos nyelvezet alkalmazása olyan méreteket öltött, hogy bizonyos országokban hivatalos titoknoki feladatkörökkel bízták meg az erre rátermetteket. A kor egyik fő iránya a monoalfabetikus módszer alkalmazása volt, és annak tovább gondolása „az azonos betűk helyett azonos, különböző betűk helyett különböző karakterek állnak a kódolt szövegben.” [4] Ekkor jelent meg az első nyomtatott kriptológia könyv is Johannes Trithemius (1462-1516) tollából. [3, p. 20] Trithemius módszerének tovább gondolása volt a szóljastromok alkalmazása, ahol a szöveg bizonyos szavait szimbólumokkal jelölték. Megfejtéséhez teljes kódkönyvekre volt szükség. Említést érdemel a Nagy Kód, az ún. Grand Chiffre, amit Antoine és Bonaventure Rossignol 1650 körül dolgozott ki és a Napkirály üzeneteit hivatott titkosítani.

Az újkorban a rejtjelezők egyre bonyolultabb kódolásokhoz folyamodhattak. Ennek oka a nagyléptékű tudományos fejlődés, mely érinti a matematika területét is. Továbbá, műszaki szempontból a rejtjelezők felhasználhatták az adott kor vívmányait és ezek segítségével mechanikus titkosító gépeket hozhattak létre. Gyors és hatékony rejtjelezésre volt szükség, melynek segítségével titokban tarthatták a személyes és hadi információ túl az ütemesen fejlődő gazdasági szegmensek információját is. Kiemelhető a polialfabetikus rejtjelezés, melynek alapja a többféle kódábécé egyidejű alkalmazása. Egyik legismertebb példája a Vigenère-kódolás, ami Blaise de Vigenère francia tudós nevéhez fűződik. Kódolását a Traicte de Chiffres című művében. Itt több kódábécé egyidejű használata történik, egy elgondolt rendszernek megfelelően.[5]

További jelentős titkosítási módszer a Morzekódolás, mely Samuel Morse nevéhez kötődik. A módszer abban rejlik, hogy a leggyakrabban előforduló betűknél a leggyorsabban leadható kód alkalmazását használta.[6] Érdekessége ennek a titkosítási módszernek, hogy kinőtte magát egy nemzetközi kommunikációs és hírközlési rendszerre, ugyanis a 19. század végére a „Morze”-kód nemzetközivé vált. Az angol nyelv karakterein kívül egyéb karaktereket is bevontak a kódolásba, ezáltal nem csak egy adott szűk kör hírközlési igényét látta el. A tengerentúlon is alkalmazták. [7]

Az Enigma (gör. rejtély) kódtárcsás gép (1920 körül) feltalálása az újkor kiemelkedő vívmánya lett. Ez a találmány forradalmasította a rejtjelezést. Az elektromosságról és

rádióhullámokról megszerzett tudás ebben az írógép nagyságú gépben ötvöződött. Feltalálója Arthur Scherbius német mérnök volt. Az Enigma-kódolást a későbbiekben részletesebben is bemutatom. [3, pp. 17-18]

A rejtjelezés evolúciójának három főbb korszaka került érintőlegesen bemutatásra tanulmányomban. A fejlődést három nagy csoportra – üzenetrejtés, helyettesítési, illetve keveréses módszerre – oszthatjuk. Napjaink jellemző titkosítási módszere az aszimmetrikus titkosítás, melyre írásomban nem térek ki. [5, p. 476]

TITKOSÍTÁS KÖZELEBBRŐL

A továbbiakban három titkos nyelvezet elemzésére kerül sor. Az üzenet titkosításának célja van, ezért érdemes ebből a szempontból is elemezni a rejtjelezést. Fontos továbbá kitérnünk arra, milyen eszközökre volt szükség az adott titkos nyelv alkalmazása során, illetve az adott titkos nyelvezettel mennyire sikerült a célt elérni élő helyzetekben, és az események menetét hogyan tudta befolyásolni annak alkalmazása.

1. Caesar-titkosítás

A monoalfabetikus betűhelyettesítés ékes példája ez a módszer. Pontos források nincsenek arra vonatkozólag, hogy a kódot személyesen Caesar találta-e fel. Arra vonatkozólag viszont maradtak fenn források, hogy Caesar egyik tanítójától, Marcus Antonius Gniphótól sajátította el a nyelvhelyesség és nyelvművelés magas fokát, ami megmutatkozott beszédeiben és írásaiban is. [8]

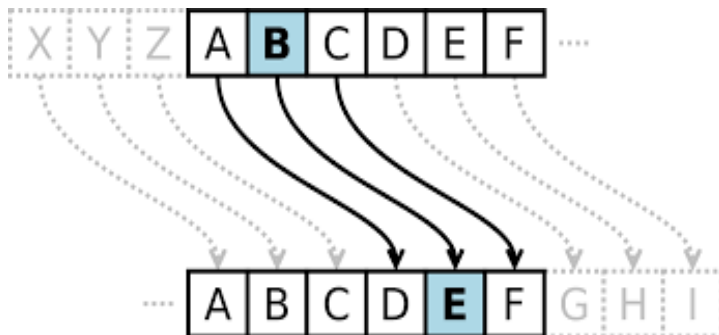
Julius Caesar számos írása közül csak a galliai hadjárata és a polgárháború története maradt fenn az utókornak „Commentarii” címen. (Kiadta újabban Nipperdey, Lipcse 1847, és Schneider, Halle 1855, 2. kötet.) Ezen emlékiratok „világos, kedves nyelvezetűek, s a leírások szemléltető volta miatt példányszerűek”. Caesar a hárombetűs eltolást alkalmazta katonai levelezései során. [2]

Tehát ezek alapján következtethetünk arra, hogy a nyelv művelője volt és nem meglepő, hogy a kód kifejlesztésére pont az ő ideje alatt kerülhetett sor.

A Caesar-kód az egyik legrégebbi és legerjedtebb titkosítási eljárás, mely során egy betű helyettesíti a tőle meghatározott távolságra lévő betűt. A váltás lehet pl. az 5.

abc	5	fgh
-----	---	-----

Az alábbi ábra szemléltetheti:



2. ábra: Caesar-kódolás

(Forrás: <https://s4scoding.com/caesar-cipher-python-code/>)

Az adott ábrán a 4-es helyettesítést látjuk. Pl.: Holnap reggel nyolckor találkozunk. CAESAR-KÓDDAL: Ubyancerttryalbypxbegnyáxbmhax.[9]

Ez a típusú kódolás monoalfabetikus, viszonylag egyszerű, nem eszközigenyes és számos további fejlesztésnek szolgált alapul. Egyszerűségéből adódóan a monoalfabetikus kódolás feltörése nem egy bonyolult feladat, csupán okos megközelítést igényel. A kódfeltörőnek arra is oda kell figyelnie, hogy lehetnek megtévesztő betűk, szimbólumok.



3. ábra: Caesar-korong

(Forrás: <https://www.cryptomuseum.com/crypto/caesar/linge.htm>)

A fenti ábrán látható egy Caesar-korong, amely egy modern eszköz. Ez a korong szemlélteti a Caesar-kódolás alapműködését. A legszélső sor a hagyományos ábécét tartalmazza, az alatta futó sor pedig az adott betű kódolt megfelelőjét.

A monoalfabetikus rejtjelezést sok esetben továbbfejlesztették. A továbbfejlesztések egyik módszere, hogy szimbólumokat helyeztek bizonyos betűk helyett. Egy ehhez hasonló, modernebb Caesar-kódot alkalmaztak az I. Erzsébet angol királynő elleni összeesküvésben is, ahol maradt a monoalfabetikus rejtjel és az egyes szavak helyettesítése. A skót királynő, Stuart Mária ezzel a módszerrel folytatta levelezését Anthony Babingtonnal, aki társaival együtt Stuart Máriát a trónra szeretne volna juttatni. Lord Francis Walsinghamne, az angol királynő kémfőnöke, megszerezte az üzeneteket és matematikusainak tudására támaszkodva megfejtette azokat – a bizonyíték elegendő volt ahhoz, hogy az összeesküvőket kivégezzék. [5, pp. 477-481]

Az amerikai polgárháborúban is ezt a kódot alkalmazták. A déliek csapatüzeneteiket ilyen kódolási módszerrel továbbították. [2]. Ezt bizonyítja a Konföderációs Múzeumban 1896 óta üvegszelencében őrzött üzenet, mely 1863-ban keletkezett és a következőket tartalmazta:

„Pemberton százados, a folyó túloldaláról ne várjon segítséget. Tudassa Johnston tábornokkal, – ha van rá módja – hogy mikor tudná megtámadni az ellenséget vele együtt.

Informáljon engem is, én majd megpróbálok elterelést indítani. Küldtem néhány robbanószerkezetet és mellékelem Johnston sürgönyét.” [10]

Valószínűnek tartják, hogy az üzenet küldője John G. Walker főparancsnok volt. Az üzenetben szereplő Joseph E. Johnston tábornok 32 000 fős sereggel Vicksburgtól délre táborozott le, hogy megvédje Pemberton seregét egy másik, 35 000 fős sereg támadásától. A kódolt üzenetet 1863. július 4-én írták, azon a napon, amikor John C. Pemberton megadta magát Ulysses S. Grantnek, az unionista csapatok vezetőjének. Ezzel véget ért a Mississippin mentén fekvő Vicksburg ostroma, mely hetek óta tartott és a háború egyik fordulópontjának számít. Nincsenek források arra vonatkozólag, hogy az említett üzenet eljutott-e a parancsnokhoz. Az üzenetet a konföderációs csapatok vicksburgi parancsnoka azon a napon kellett volna, hogy megkapja, amikor az unionista csapatok bevették a várost.

Az üvegszelence felbontását a múzeum igazgatónője szorgalmazta. A szelence felnyitásánál látták, hogy a papíron szereplő üzenet kódolt. A kódolt írást többen próbálták megfejteni, de sikertelenül. Az írás megfejtője végül David Gaddy volt, a CIA egyik nyugalmazott szakértője. [10]

A Caesar-kód mára inkább érdekesség, mint biztonságos kommunikációt nyújtó rejtjelezési módszer. Mára eléggé közismert és inkább oktatási célokra használható. Gyors és nem túl bonyolult, ami adott körülmények között előnyös, viszont ugyanúgy gyorsan és nem túl sok erőfeszítéssel megfejthető, amennyiben tájékozottak vagyunk a módszer felől. A rejtjelezés fejlődési szakaszának azon módszere, mely sok más módszer alapjául szolgálhatott.

2. Enigma-kódolás

Az I. világháború időszaka a mechanikai fejlődések időszaka is egyben, ami még inkább fellendítette a titkosító eljárások fejlődését. Fontos szempont volt a gyorsaság és a minél kreatívabb alapokon nyugvó megfejthetlenség. Nyilvánvalóvá vált, hogy a biztonságos, nehezen megfejthető, harctéri körülmények között is jól alkalmazható módszerek jelentősen, akár döntő módon is befolyásolhatják a harctéri helyzetet. Ezen szempontokat figyelembe véve nyújtotta be 1919-ben egy német mérnök, Arthur Scherbius Enigma nevű gépének szabadalmát (Enigma, görögül – titok, szerz.), melyet a tökéletesen biztos kommunikációhoz tervezett. Bármily meglepő, de az akkori katonai hadvezetést nem érdekelte a gép, így néhány éven át a készülék a civil szférát szolgálta ki. Fizikai adottságai eltértek a későbbi, továbbfejlesztett titkosíró Enigma modelltől – súlya 12 kg volt és rendkívül bonyolultnak bizonyult, 7-11 tárcsával rendelkezett a későbbi 3-4 tárcsás géppel szemben. Végül a gép áttervezése után már a német hadi vezetés alkalmazni kezdte. [11]

Az Enigma gépnél alkalmazott módszer a már eddigiek során is ismertett betűcserélő módszer továbbfejlesztett változata. Az alapvető betűcserés módszernél a cserélt betűk kombinációja nem változik. Az Enigma erőssége pedig pont ebben rejlett – a betűk kombinációjának változásában, ahol a három tárcsa 17 576 lépésben összesen 26x26x26 különböző állásban tudott megállni. Ezen kívül a kivehető-betehető tárcsák sorrendjét is szabadon lehet változtatni. Műszaki szempontból maga a szerkezet nem bonyolult. Elektromos felépítésű készülék, melyet egy elem táplált. Kapcsolók sorából és a rájuk kötött izzólámpákból tevődött össze. „Az Enigma ezen túlmenően belül huzalozott tárcsák egymásutánja, írógépyszerű klaviatúra, amelynek betűinek lenyomásával egy kapcsolót aktiválunk.

Az áram a tárcsákon keresztül haladva, egy reflektor, azaz visszafordító tárcsán visszaindulva ugyanazokon a tárcsákon keresztül, de már más útvonalon elér az adott lámpáig, amely felvillan”

„A leütött billentyűk mechanikusan egy kilincsszerkezetet mozgatnak meg, ami hatására az elektromos jel már egy teljes más utat fog bejárni (...) a tárcsa huszonhat betű lenyomása után ér el egy teljes fordulatot.” [11]

Ami a megfejthetőséget illette, mivel minden tárcsa huzalozása egyedi volt, a két készülék csak akkor tudta értelmezni a kódolt üzenetet, ha mindkét gépben azonos sorszámu és jelzésű tárcsák voltak beépítve, még hozzá megegyező sorrendben. *„Az eszközök tárcsái kiemelt védelmet élveztek az üzemeltető állomány részéről, azok az érvényben lévő szabályok szerint semmiképpen nem kerülhettek ellenséges kézbe.” [11]*

Akkor még kevesen gondolták volna, hogy ez a gép lesz talán a leghíresebb eszköz a titkosítások több évezredes története során. A gép használata viszonylag egyszerű, az általa generált kódok viszont nagyon bonyolultak. Ez az oka annak, hogy a német kormány ezt a gépet választotta a második világháború idején a katonai jelentések nagyobb részének a rejtjelezésére. A kódolt üzenetek megfejtése olyan szempontból vált bonyolulttá az ellenség számára, hogy azon kívül, hogy azonos sorszámu, jelzésű, megegyező sorrendben elhelyezett tárcsák kellett, hogy küldjék-fogadják az adott üzenetet, még haderőnemeken belül is eltérő tárcsák kerültek kiosztásra. Például a haditengerészet által használt készülékpár kommunikációját a légierő rejtjelezői nem tudták megfejteni. Ha a két haderőnem egymással kívánt kommunikálni, akkor a vonal mindkét végén azonos jelzésű tárcsákat kellett behelyezni és a többi beállításnak is meg kellett egyeznie. Az eszközhöz társult a kódkönyv, mely egy hónapnyi beállítást tartalmazott.



Bundesarchiv, Bild 1011-MW-4222-02A
Foto: Dietrich J März 1941

4. ábra: Enigma M3 használatban
(Forrás: <https://www.cryptomuseum.com>)

A fenti kép egy Enigma M3-at ábrázol a német U-124 tengeralattjárón. Az Enigma a kép bal alsó részén látható, jobboldalt pedig a kódkönyvet láthatjuk. A fénykép 1941 márciusában készült, rá egy évre már az Enigma M4 volt használatban.[12] (ford. angolról-szerző)



5. ábra: Enigma-tárcsák.
(Forrás: <https://www.cryptomuseum.com>)

Az Enigma kódjainak megfejtése első ízben lengyel szakemberek munkája volt. Nagy erőfeszítéssel, rögzített üzenetek és régi kódkönyvek alapján reprodukálták a gépet és működésének elvét. Marian Rejewski matematikus vezetésével dolgoztak, eredményeiket pedig 1939. szeptember 1-je előtt adták át az angol és francia szakértőknek. A későbbi események ellehetetlenítették a lengyel siker megkoronázását a kódfejtés terén. A munkát az ULTRA nevű csoport tudta továbbvinni a londoni Blechley Parkban kihelyezett bázisán. A munkacsoport matematikusokból, nyelvészekből és más szakemberekből állt. A lengyel kódfejtő gép mintájára megépült a „Bomba” nevű gép, mely *„az üzenetváltásokban rejlő szokások adta hibákat kihasználva addig pörgette a lehetséges beállításokat, amíg nem talált egy értelmes szót. Ha ez megtörtént, az aznapi összes távirat megfejthetővé vált azzal a beállítással, amelyet a Bomba rögzített”*. [11]

Az Enigma kódok feltörése a II. világháború egész folyamatára hatással volt. Kiemelném a haditengerészet titkos harcát, melynek fordulatait nagy részben az Enigma kódgép használata befolyásolta. Míg az Enigma I kódgép üzeneteit a szövetségesek 1940-től sikeresen feltörték, a német haditengerészet újabb, speciális modelljei nehezen voltak feltörhetőek az angol kódfejtők számára. A HMS Bulldog brit akció után - 1941 májusában -, a Brit Királyi Haditengerészetnek sikerült megszereznie egy Enigma M3 modellt és a hozzá tartozó kódkönyvet egy német tengeralattjáróról. Ennek segítségével sikeresen fel tudták törni az ilyen típusról érkező üzeneteket. A német haditengerészet 1942-ben egy további fejlesztéseken átesett gépet, az Enigma M4-et vetette be.



6. ábra: Enigma M3
(Forrás: <https://www.cryptomuseum.com>)



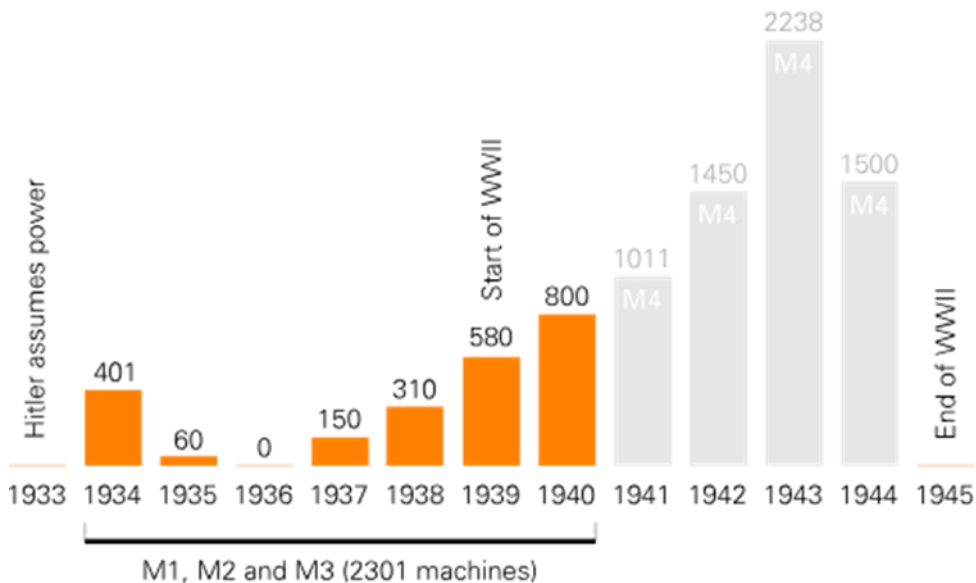
7. ábra: Enigma M4

(Forrás: <https://www.cryptomuseum.com>)

Ezeket az üzeneteket a Bletchley Park kódtörői 10 hónapon át nem tudták feltörni. Ezt az időszakot „blackout”-nak (angolul – áramszünet, szerz.) nevezik, mivel katasztrofálisak voltak a brit katonai műveletek, különösen a német tengeralattjárók elleni harc szempontjából, hiszen szó szerint is a „sötétben tapogatóztak”. A német hadierő az Enigma M4 modell mellé „Triton kulcshálózat” nevű kódkönyvet készített, mely szigorúan titkos volt. Azért, hogy ne kerüljön az ellenség kezébe, vízben oldódó tintával itatóspapírra nyomtatták, hogy lehetővé tegyék gyors megsemmisítését. A szövetségesek mégis hozzá tudtak jutni a saját kódfejtőik számára fontos információhoz. Az angol erők felszínre kényszerítették az U 559-es német tengeralattjárót 1942. október 30.-án, mely hamarosan süllyedni kezdett a mélységi töltetek által megrongálva. Ennek ellenére a legénység több tagja behatolt a tengeralattjáróba és megmentette az Enigma M4 kódkönyveket (jelzőfüzeteket és az időjárási rövid kulcsot).

Rövid jelzőfüzeteket és időjárási rövid kódokat használtak a gyakran használt kifejezések - például időjárás-jelentések, mondatok, parancsok és hasonló titkos betűkombinációk - összehasonlítására. Ezek az anyagok elegendőek voltak a Bletchley Park kódtörőinek, így ezt követően már sikeresen fel tudták törni a német haditengerészet rádiókommunikációját. A dokumentumok mentése szigorúan titkos maradt, hogy a németek ne változtassák meg újra a titkosítási rendszerüket. A matrózok bevetése és a kódtörők munkája jelentősen lerövidítette a szövetségesek harcát a német tengeralattjárók ellen és ezzel a II. világháborút.[13] (ford. németről – szerz.)

Az alábbi ábra szemlélteti az évszámokat és az Enigma típus-gyártásoknak a folyamatát.



8. ábra: Enigma gépek gyártása és használata
(Forrás: <https://www.cryptomuseum.com>)

A leírtak alapján egyértelművé válik, hogy az Enigma megfejtése lehetetlennek bizonyulna, amennyiben a kódfejtők nem rendelkeznek megfejtési támpontokkal, legalább egy megfejtési útvonalat tartalmazó, akár egyetlenegy mondattal. A szövetségesek rendelkezésére állt valamennyi eszköz, visszafejtett üzeneteken kívül kódkönyvek, sőt még Enigma gépek is birtokukba kerültek. Vitathatatlan, hogy rendkívüli és összehangolt munka kellett ahhoz, hogy a tényleges üzenetek értelmezhetőek legyenek. Az olyan intelligens gépek létrehozása, mint a fent említett „Bomba” kódfejtő gép az emberi logikának egyik zseniális találmánya, mely felismerve egy rendszerezettséget meg tudta fejteni a bonyolult kódcsomagokat.

A rendszer mindenhatósága mégis megcáfolható. A következő részben olyan titkosítási módszerre szeretnék kitérni, mely a rendszertelenségnek köszönhetette kiváló helytállását.

3. Kódbeszélők

A titkosítás egyik különleges módszere az, amikor egy ritka nyelvet használnak fel titkosítási céllal, az ebben aktívan szereplőket pedig kódbeszélőknek hívják. Több ilyen alkalmazás is előfordulhatott, hiszen a különböző nyelvek dialektusai néha a felismerhetlenségig meg tudták változtatni az adott nyelvet. Jelen írásomban azonban a titkosításnak egy történelmileg is kiemelkedő példáját szeretném említeni az élő nyelv felhasználásának területéről.

A második világháborúban az USA haditengerészete a Navaho indiánok nyelvét használta biztonsági kommunikációra. Az ötlet Philip Johns mérnöktől származott, aki a Navaho Rezervátumban nőtt fel, mivel édesapja misszionáriusként szolgált ott. Philip Johns egyike volt azon nagyon kevés nem-navahoinak, aki folyékonyan beszélt a nyelvet. Első világháborús veteránként rálátása volt arra, hogy milyen fontos a megfelelő kommunikáció,

és milyen értéke van a titkos rejtjelezésnek. Az amerikai katonai sikertelenségek láttán, melyek javarészt a nem megfelelő kommunikációból eredtek, javasolta, hogy a haditengerészet titkos nyelvezetének alapja a navaho nyelv legyen. Javaslatának egyik meggyőző érve, hogy egyetlen szót, ha négyféleképpen ejtenek, négyféle jelentése lesz. Előben, navahoi barátain keresztül demonstrálta, hogyan tudtak fordítani angol nyelvről navahói nyelvre és vissza. Ezek után a tengerészgyalogság egy hivatalos programot indított el az új kódok kidolgozására. Huszonkilenc olyan navahói indiánt alkalmaztak, akik angolul és navaho nyelven is folyékonyan beszéltek (volt köztük, aki csak 15 éves volt). Segítségükkel kidolgoztak egy navaho kódnyelvet, melyet kipróbáltak szimulált csatákban. [14] (ford. angolról – szerz.)

A következő tényezők játszottak szerepet a nyelv megfejthetetlenségében: a Navaho nyelv nem rendelkezett írásos elemekkel, sem betűkkel, sem szimbólumokkal. Nyelvtana és a hanglejtésből adódó jelentésbeli különbségek még inkább komplikálttá teszik. A nyelvet csak a navahók lakta területen használták, Amerika dél-nyugati részén. Becslések szerint harminc nem-navaho tudott beszélni ezen a nyelven, viszont közülük senki sem tudott japánul. A tengerésznél kifejlesztett nyelvezet azonban nem a hétköznapi kommunikációhoz használt navaho nyelvből állt. Az első huszonkilenc kódbeszélővel fejlesztették ki a titkos nyelvezetet. A katonai kifejezésekhez a természetből választottak szavakat, többek között azért is, mert nem volt erre való szókinsz – pl. a navahó „bagoly” szó a megfigyelő repülőt jelentette: ne-ahs-jah (navaho) – observationplane (ang.), a navahó „vas hal” a tengeralattjárót jelentette: besh-lo (navaho) – submarine (ang.).



9. ábra: Navahói kódbeszélők
(Forrás: https://www.army.mil/nativeamericans/code_talkers.html)

A kódolást megkönnyítette az is, hogy körülbelül négyszázötven, az előzőekhez hasonló katonai kifejezést alkalmaztak. Ezeken a kifejezéseken kívül a következő rejtjelezést kapták a szavak: amikor a kódbeszélő üzenetet kapott, akkor összefüggéstelen, egymás

mellé rakott navaho szavakat hallott. A kódbeszélőnek először minden navaho szót angolra kellett fordítania. Ezt követően az angol szavaknak csak az első betűit használta úgy, hogy abból értelmes angol szó keletkezzen. Például, az angol NAVY szó navaho kóddal a következőképpen alakul: „tsah (needle) wol-la-chee (ant) ah-keh-di-glini (victor) tsah-ah-dzoh (yucca). Az ilyen módon kapott szó volt a megfejtés. A betűk gyakoriságától függően egy betűnek három vagy két navaho szó volt a megfelelője. Ezeket a kódbeszélőknek meg kellett tanulniuk, hogy akadálytalanul folyhasson a kommunikáció. A kódbeszélők rendkívüli precizitással dolgoztak. Az Ivo Dzsima-i csatában hat kódbeszélő dolgozott két napon át, több mint 800 üzenetet fogadtak és továbbítottak hibátlanul. Howard Connor, az 5. Tengerészeti hadosztály egykori vezetője szerint a navahók nélkül ez az akció nem lett volna sikeres. E háborún kívül a kódbeszélőket az 1950-es években Koreában, az 1960-as években Vietnámban is alkalmazták.” [15] [16] [17] (ford. angolról – szerz.)

Amint láthatjuk, nem volt elegendő egyszerűen a navaho nyelv a titkos kommunikációhoz. Ezt a nyelvet egy kódnyelv alapjaként használták. Ennek a technikának a segítségével a hadsereg felkészült volt azzal szemben, ha az ellenség esetleg foglyul ejt egy navaho nyelven beszélőt – de nem kódbeszélőt. Egy titkos nyelvezetre nem kiképzett navaho katona nem tudta megfejteni a kódolt üzeneteket. Erre a kódnyelvre speciális képzést kaptak a kódbeszélők. Természetesen az Amerikai Haditengerészet fokozott védelem mellett alkalmazta a kódbeszélőket. Ahogy a németek védték az Enigma gépeiket és a kódkönyveiket, úgy meg kellett védeni a kódbeszélőket is, akik általában két fős csoportban dolgoztak. Telefont vagy walkie-talkie eszközt használtak, jelentették a légicsapásokat és tűzérési bombázásokat, közvetítették a csapatok mozgásának irányítását, jelentették az ellenséges helyszíneket, irányították a csapásokat az amerikai állásokból, és szenzitív katonai információkat osztottak meg. [14] (ford.angolról-szerz.)



10. ábra: Veterán navaho kódbeszélő

(Forrás: <https://www.aarp.org/politics-society/history/info-2021/pearl-harbor-thomas-begay.html>)

Jelen szakasznál a három titkos nyelvezet elemzésének végéhez értünk. A leírtak alapján látható, a három kódolásnál a cél ugyanaz, célba juttatni az üzenetet anélkül, hogy arról más tudomást szerezzen. Minden esetben a kreativitás és az adott körülmények játszottak szerepet. A Caesar-kódolásnál az ábécé matematikai rendszerezésével játszottak, az Enigmánál pedig már szükséges volt az addigra feltalált tudományos vívmányok - elektromágnesesség és mérnöki tudásbázis fejlettsége - alkalmazása, ami adott volt az akkori Európában. A navaho nyelv alkalmazásánál pedig kellett a szikra - az ötlet és a katonai igények ismerete -, hogy a nyelvet alkalmazásba tudják venni és felismerjék a nyelv egyedi adottságait.

KÖVETKEZTETÉSEK ÉS KUTATÁSI EREDMÉNYEK

Kutatásom során a következő következtetésekre jutottam a titkos nyelvezet alkalmazásával kapcsolatosan. Mivel a titkos nyelvezet alkalmazása legtöbbször nehéz és feszült időszakban történik, a legfontosabb szempont a gyorsaság, kevés eszközigénnyel. A három vizsgált nyelv közül az élő nyelv alkalmazása volt a legeredményesebb. A navaho kódbeszélők betanítás után hibátlanul tudták közvetíteni a kódolt üzeneteket. Az Enigma géphez képest, egy háromsoros angol üzenet közvetítése a navaho kódbeszélőknél 20 másodpercbe, míg egy gépnél ugyanez a feladat harminc percbe telt.[18] (ford. angolról – szerz.)

Az alábbiakban a következő szempontokból vizsgáltam meg az eddig részletesebben említett titkosítási eljárásokat: megfejthetetlenség, betaníthatóság, sérülékenységbiztonság, célba érés biztonsága, rugalmasság, használhatóság ideje. Az összehasonlítás alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

- **megfejthetetlenség** – a leggyengébb eredményeket az adott esetben a Caesar-kód mutatta, bár abban a korban, amikor feltalálták és alkalmazták, lehetséges, hogy az 1940-es évek Enigma-gépének felelt meg. Az újkorban azonban már nem tudta megállni a helyét, csak olyan környezetben, ahol nem tudtak róla (lásd az amerikai polgárháború, ahol feltehetőleg általánosságban nem sokat tudhattak a Caesar-titkosításról). Az újkorban az európai vezető réteg általános műveltsége magas volt, mivel egyre többen foglalkoztak az ókor vizsgálatával. Tudtak a Caesar-kódolásról és alkalmazták is, és további fejlesztéseknek vetették alá. *Ennél a pontnál úgy vélem, a műveltség, a tudás fontos szempont a titkosítás területén. Hadászati szempontból a hadi elitet fontos kiképezni a titkosírás történetére, hisz az Enigma gép is némileg a Caesar-kódolásnak az alapjait alkalmazta. Az, hogy a jó eséllyel megfejthetetlennek létrehozott Enigma gép mégis megfejthető lett – az a rendszeres előfordulásának az eredménye és annak, hogy megszerezték magát a gépet és a kódkönyveket, így a titkos nyelvezetre fény derült. A mérnökök, nyelvészek már vissza tudták fejteni, mert rájöttek a rendszerre és rendszerességre, a gyakoriságra, mely zöld utat mutatott a megfejtés és dekódolás felé. Ezzel szemben a navahi nyelv fel-törhetetlen volt. A szakképzett japán kódfejtők fel tudták törni az Amerikai Hadse-reg és Légierő kódolásait, de a navaho kódbeszélőket alkalmazó hadi tengerészetét nem. A navaho nyelvnek nem volt „nyoma” – hiszen írás nélküliségén alapult, tehát az ellenség nem tudott utána kutatni. Az emberi nyelv rendszertelenségeket is tartalmaz, melyeket nem lehet kiszűrni, ezzel erősebb, mint egy tökéletes rendszeren alapuló eszköz, mint pl. az Enigma gép. Bonyolult és kis csoportoknál használt élő nyelvek alkalmazása tehát jó alapként szolgálhat egy kódnyelv létrehozásánál. A*

történelem során megmutatkozik, hogy ez volt az egyik leghatékonyabb módszer. Körültekintően lehet csak alkalmazni az adott megoldást, mivel, néprajzkutatókkal fel lehet deríteni a legtávolibb vidékek nyelvi sajátosságait is, ahogyan ezt a német felderítők is tették, ők azonban nem kutattak tengerentúl, továbbá, kevesebb eszközük is volt erre a II. világháború környékén.

- **betaníthatóság** – mennyi időt vesz igénybe egy titkos nyelv megtanulása és alkalmazása ténylegesen, feszült és szoros határidők mellett, mint amikkel meg kell küzdeni a hadseregnél. A Caesar-kódolásnál az idők során kifejlesztettek egy Caesar-korongot is, mely jelentősen lerövidítette a kódolás és dekódolás idejét, Az Enigma gép tette a dolgát, megfelelő tárcsák és kódkönyvek mellett a dekódolás nem jelentett különösebb nehézséget. A gép kezelését és a kódkönyvek alkalmazását kellett megtanulni. A navaho titkos nyelvezetnél a kódbeszélőknek meg kellett tanulniuk a kódszavakat és a kifejezéseket. Az Enigma és a navaho kódolásnál a kiképzési idő maximum egy hónapra tehető. *Tehát fontos az idővel való számolás, a felkészültség és az előre kiképzett szakemberek megléte.*
- **sérülékenység, biztonság** – mind fizikai tárgyaknál, mind emberek alkalmazásánál – fennáll a sérülékenység kérdése. Az Enigma gép meghibásodásai további kutatást igényelnek. Az a tény áll rendelkezésre jelen írás keretein belül, hogy a gépet meg tudták szerezni és ebben az esetben a nyelv titkosságánál vesztett ügyről volt szó. A navaho indiánok sérülékenysége emberi szempontból fennáll, hisz előfordulhat, hogy az ellenség foglyul ejtethet egy kódbeszélőt, és a történelem során alkalmazott kegyetlenségekkel szóra bírhatja. Ez történt egy navaho katonával is, aki azonban nem volt kódbeszélő. A katonát a japánok foglyul ejtették Bataan mellett, nem tudták szóra bírni. A katona azonban, mivel nem volt kódbeszélő, ezért nem értette a navahón alapuló kódnyelvet. *Ez az eset arra mutat rá, hogy nem elegendő egy katonai titkosításra alkalmas nyelv, azt tovább kell fejleszteni. A kódbeszélőket pedig minden áron védeni, ahogy ez sikerült is az amerikai tengerészetnél.*
- **célba érés biztonsága** – az Enigma gépnél az üzenet célba érése garantált volt, hiszen két egyforma típusú készülék tudta csak küldeni-fogadni az üzeneteket. A német hadiflotta vezetése azonban nem volt eléggé körültekintő, hiszen a szövetségesek megszerezték az Enigma M4 modellt a németek tudomása nélkül és annyira okosan leplezték, hogy megszerezték, hogy akár saját veszteségeket is elviseltek, csak hogy ne derüljön ki a tény. *Ennél az esetről láthatjuk, mennyire kétélű a garantált biztonság, amennyiben egy készülék alkalmazására kerül sor. Törekedni kell arra, hogy ellenőrizhető legyen, amennyiben más is hozzáfért a készülékhez. A kódbeszélők esetéből az a tapasztalat, hogy a fogadó környezet biztonsága garantált legyen.*
- **rugalmasság** – rugalmas megoldások alkalmazása – a három vizsgált nyelvből csak is a kódbeszélők esetében tapasztalható – a japánokkal való harcnál egyik esetben az amerikaiak saját csapatukat lőtték, mert azt hitték, hogy azon a bizonyos területen japánok tartózkodnak. Csak a navaho kódbeszélők gyors bevetésével tudták őket megállítani, mert az angol nyelven adott parancsra azt hitték, hogy a japánok trükkje.[15] *Mivel ennél a nyelvnél nincs eszközigény, csupán az adó-vevő készülék, vagy, az adott esetről – egy-egy kódbeszélő jelenléte, ezért rugalmasabban alkalmazható.*

- **használhatóság ideje**, vagy mennyi ideig tud szolgálni az adott titkos nyelv – a navaho kódnyelv egészen az 1960-as évek végéig szolgálta az amerikai hadsereget, ami azt mutatja, hogy tökéletesen bevált és megfelelt a katonai igényeknek.

Az alábbiakban a 3 titkosítási nyelvezet került összehasonlításra a leghatékonyabb eljárás kimutatására a szerző kutatásai alapján, az MI segítségével:

Szempont	Caesar-kód	Enigma-gép	Navaho kód
Megfejthetőség	Legalacsonyabb. Az újkorban már ismert volt az általános műveltség miatt. Saját korában alacsony általános műveltség mellett jól alkalmazható lehetett.	Közepes. Elméletileg egyik legerősebb, de a rendszeresség és a gépmegszerzése miatt feltörhető.	Legmagasabb. Feltehetően teljesen bízható az élő nyelv rendszertelensége és írásbeliség hiánya miatt.
Betaníthatóság	Gyors. A Caesar-korong használatával jelentősen lerövidült az idő.	Kb. 1 hónap. A gép kezelését és a kódkönyvek használatát kellett elsajátítani, további eszköz-alkalmazást igényelt felhasználás során (gép, kódkönyvek).	Kb. 1 hónap. A speciális kódszavak és kifejezések megtanulása volt szükséges.
Sérülékenységi	Magas. Elméleti tudás alapú; ha ismerik a módszert, megfejthető.	Magas - Fizikai. A gép és a kódkönyvek megszerzése a titkosítás végét jelentette.	Közepes - Emberi. A kódbeszélő foglyul ejthető, de a nyelv továbbfejlesztése (kódolt navaho) védelmet nyújtott.
Célba érési biztonsága	Alacsony abban az esetben, ha ismert a módszer.	Kétélű. A vétel biztonságos, de ha az ellenségnek is van gépe, észrevétel nélkül lehallgathatja.	Biztonságos. Fontos a fogadó környezet védelme.
Rugalmasság	Közepes (egyszerű eszköz-igény).	Alacsony (eszköz-igényes).	Magas. Nincs külön eszköz-igény (csak adó-vevő), gyorsan bevezethető kritikus helyzetben.
Használhatóság ideje	Az ókortól az újkor elejéig.	A II. világháború alatt (a feltöréséig).	Az 1940-es évektől 1960-as évek végéig.

A táblázat alapján látható, hogy a három vizsgált nyelv közül az élő nyelv alkalmazása volt a legeredményesebb.

Biztonságos titkos nyelvezet margójára idézném a következőt: „Biztonságosnak a mai körülmények között az az eljárás tekinthető, amelyiknek a feltörése a legjobb gépekkel 10-15 év alatt sem valószínűsíthető meg (teljes biztonság nem garantálható, hiszen az összes

lehetőség kipróbálása elvileg lehetséges.) Az erős produkciós titkosítók (pl. AES) ma biztonságosnak számítanak, és a hagyományos eljárások modern utódai (Papp–Szabó 2006). [5, p. 476]

Hagyományos eljárások jó alapként szolgálhatnak a titkosítás területének egyengetéséhez és fejlesztéséhez, a mai kor egyre változatosabb technológiáival élve, egész kiváló készlet-választék tárulhat ezen terület fejlesztői elé.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmányban bemutatásra kerültek a titkos nyelvezet általános fejlődési szakaszai, kiemelve három módszer bemutatását – Caesar-kódolás, Enigma gép által alkalmazott titkosítás és az élő emberi nyelv kódnyelvként való alkalmazása. A háromféle nyelvezet elemzését a következő szempontok alapján végeztem – történelmi háttér, keletkezés oka, eszközigény és a titkos nyelvezet általános szerkezete. További célom volt az alkalmazás konkrét környezetének bemutatása példákon keresztül. Ennek azért láttam szükségét, mert az alkalmazás gyakorlati elemzésével további hasznos következtetésekre lehet jutni és a régi tapasztalatokat olyan irányba terelni, hogy az, a mai hazai hadi környezet számára hasznos információként szolgáljon. Végezetül a három bemutatott nyelvezet alapján következtetések levonására került sor, ahol szemügyre vettem a titkos nyelv *megfejtethetlenségét, betaníthatóságát, sérülékenységét, célba érésének biztonságát, rugalmasságát, használhatóságának idejét*.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] G. Gyurák, „*A kriptográfia és a hírszerzés hadtudományi gyökerei - Military roots of cryptography and intelligence*,” Hadtudományi Szemle 2014, Évfolyam 18, szám 3, pp 15-16.
- [2] E. Szigeti, „*Kódfejtés, rejtjelezés történelemórán*,” 10 július 2019. [Online]. Available: www.torizzotthon.hu/modszertan/kodfejtés-rejtjelezés-történelemórán. [Letöltés dátuma: 2024. december 15.].
- [3] G. Gyurák, „*A kriptográfia és a hírszerzés hadtudományi gyökerei - Military roots of cryptography and intelligence*,” Hadtudományi Szemle 2014, Évfolyam 18, szám 3, pp 17-18.
- [4] B. Láng, *Titkosírás a kora újkori Magyarországon*, Budapest: Balassi Kiadó, 2015.
- [5] G. Kallós, „*A titkosítás művészete - Titkosítás és kódfejtés az ókortól napjainkig*,” in XXIV. Apáczai-napok Tudományos Konferencia tanulmánykötete, Győr: Széchenyi István Egyetem Apáczai Csere János Kar, 2021.
- [6] „Rejtjelező,” [Online]. Elérhető: www.rejtjelezo.hu/morse-kod-ismerteto. [Letöltés dátuma: 2024. december 18.].
- [7] „*Morse-kód fordító, memoriterekkel*,” TrM Fordítóiroda, [Online]. Elérhető: www.tremforditas.hu/morse. [Letöltés dátuma: 2024. december 18.].
- [8] „Caesar. Pallas nagy lexikona,” [Online]. Elérhető: www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/Lexikonok-a-pallas-nagy-lexikona-2/c-4B61/caesar-4BE4/. [Letöltés dátuma: 2024. december 17.].
- [9] www.kalkulatorok.net/caesar-titkositas-online-kodolo-dekodolo. [Online] [Letöltés dátuma: 2024. október 10.].

- [10] Múlt-kor szerkesztősége, „*Kódolt üzenet az amerikai polgárháború sorsdöntő ostromából.*” Múlt-kor történelmi magazin, január 4, 2011. [Online]. Elérhető: https://mult-kor.hu/20110104_kodolt_uzenet_az_amerikai_polgarhaboru_sorsdonto_ostromabol. [Letöltés dátuma: 2024. november 24.].
- [11] P. Snoj, „*Az Enigma rejtélye*”, Honvédelem.hu, június 7, 2021. [Online]. Elérhető: <https://honvedelem.hu/hirek/az-enigma-rejtelye.html>. [Letöltés dátuma: 2024. december 4.].
- [12] Crypto Museum, „*Enigma 3*”, Crypto Museum Online, Elérhető: <https://www.cryptomuseum.com/crypto/enigma/m3/index.htm> [Letöltés dátuma: 2024. december 5.].
- [13] Deutsches Spionagemuseum, „*Vor 75 Jahren erbeutete ein britischer Zerstörer Enigma M4 Codebücher*”, Deutsches Spionagemuseum Blog, okt. 30, 2017. Elérhető: <https://www.deutsches-spionagemuseum.de/2017/10/30/vor-75-jahren-erbeutete-ein-britischer-zerstoerer-enigma-m4-codebuecher>. [Letöltés dátuma: 2024. december 5.].
- [14] Hirschfelder és M. K. de Montano, „*A Portrait of Native America Today*,” in The Native American Almanac: A Portrait of Native America Today, New York, NY, USA: Prentice Hall General Reference, 1993, pp. 232–234.
- [15] „*Navajo Code Talkers*,” Grand Valley State University Math Department. Elérhető: <https://web.archive.org/web/20080506022452/http://www.gvsu.edu/math/enigma/Navajo/PAGES9-1.HTM>. [Letöltés dátuma: 2024. december 5.].
- [16] U.S. Navy, „*Navajo Code Talkers: World War II Fact Sheet*,” Naval History and Heritage Command. Elérhető: <http://www.history.navy.mil/faqs/faq61-4.htm>. [Letöltés dátuma: 2024. december 10.].
- [17] A.Molnar Jr., „*Navajo Code Talkers: World War II Fact Sheet*,” Navy and Marine Corps World War II Commemorative Committee, Published: Thu Apr 16 15:08:36 EDT 2020. Elérhető: <https://www.history.navy.mil/research/library/online-reading-room/title-list-alphabetically/n/code-talkers.html>. [Letöltés dátuma: 2024. december 10.].
- [18] Molnar Jr., „*Navajo Code Talkers: World War II Fact Sheet*,” Navy and Marine Corps World War II Commemorative Committee, Washington, DC, USA: Naval Historical Center, Department of the Navy. [Online]. Elérhető: <https://www.history.navy.mil/research/library/online-reading-room/title-list-alphabetically/n/code-talkers.html>. [Letöltés dátuma: 2024. december 10.].

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE AQAP
DEFENCE AND IATF 16949
AUTOMOTIVE REQUIREMENT SYSTEMS****A HADIIPARI AQAP ÉS AZ AUTÓIPARI
IATF 16949 KÖVETELMÉNYRENDSZEREK
ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSE**HORVÁTH András¹ – FARKAS Gabriella² – SZŰCS Endre³**Abstract**

The development of quality management systems has been closely linked to the rise of mass production, standardization, and global supply chains. In the defence industry, standardization primarily evolved to ensure interoperability, operational readiness, and reliability, leading to the establishment of the AQAP quality assurance framework. In the automotive industry, the demands of mass production and customer expectations gradually led to the development of standardized quality management requirements, which are now embodied in the IATF 16949 standard. This paper examines the historical evolution of quality management in the defence and automotive sectors and explores how their different operational environments have shaped industry-specific quality requirements and supplier expectations. The analysis highlights that, despite sharing common quality management principles, defence and automotive systems differ significantly in their emphasis on interoperability, government quality assurance, process capability, defect prevention, and logistics efficiency.

Keywords

AQAP, IATF 16949, quality management, defense industry, automotive industry, risk

Absztrakt

A civil minőségirányítási rendszerek fejlődése szorosan kapcsolódik a tömegtermelés, a szabványosítás és a globális beszállítói láncok kialakulásához. A hadiiparban a szabványosítás elsődleges célja az interoperabilitás, a műveleti rendelkezésre állás és a megbízhatóság biztosítása volt, amely az AQAP követelményrendszerében teljesedett ki. Az autóiiparban a tömegtermelés és a vevői elvárások hatására fokozatosan alakultak ki azok az egységes minőségirányítási követelmények, amelyek napjainkban az IATF 16949 szabványban jelennek meg. A cikk célja a hadiipari és az autóiipari minőségirányítás fejlődésének bemutatása, valamint annak feltárása, hogy az eltérő működési környezet miként alakította a két ágazat minőségügyi követelményeit és beszállítói elvárásait. Az összehasonlító elemzés alapján megállapítható, hogy míg a NATO AQAP rendszerében az interoperabilitás, a nyomonkövethetőség és a kormányzati minőségbiztosítás meghatározó jelentőségű, addig az IATF 16949 rendszerében a folyamatképesség, a hibamegelőzés és a sorozatgyártás hatékonysága kerül előtérbe.

Kulcsszavak

AQAP, IATF 16949, minőségirányítás, hadiipar, autóiipar, gyártási kockázat

¹ horvath.andras@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0007-9130-1413 | assistant lecturer, Óbuda University | egyetemi tanársegéd, Óbudai Egyetem

² farkas.gabriella@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0000-9881-7286 | assistant professor, Óbuda University | egyetemi adjunktus, Óbudai Egyetem

³ szucs.endre@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0003-2818-262X | senior lecturer, Óbuda University | egyetemi oktató, Óbudai Egyetem

BEVEZETÉS

A világban a globális kereskedelem és gyártás egyik alapvető követelményévé vált a nemzetközi szabványok alkalmazása. A szabványok célja, hogy biztosítsák a termékek, alkatrészek, folyamatok és szolgáltatások egységességét, összehasonlíthatóságát és kompatibilitását. A szabványok alkalmazása önkéntes, ugyanakkor használatuk hiányában nem valósítható meg a különböző gyártók által létrehozott termékek alkatrészeinek csereszabátossága. A gyártók és beszállítók által megkövetelt szabványok gyártásközi betartásával létrehozza a vevők bizalmát a termékekkel kapcsolatban [1].

A szabványok alkalmazási területük alapján alap-, termék-, folyamat-, vizsgálati és irányítási rendszerszabványokra oszthatók. Az irányítási rendszerszabványok speciális csoportját alkotják az ágazati vagy beszállítói többletkövetelmények, amelyek egy adott iparág sajátos elvárásait fogalmazzák meg. Ide tartoznak többek között a NATO védelmi iparában alkalmazott AQAP minőségbiztosítási többletkövetelmények (Allied Quality Assurance Publication, Szövetségesi Minőségbiztosítási Kiadvány) vagy az autóiipari IATF 16949 többletkövetelmény. Ezek az előírások az ISO 9001 irányítási rendszerszabvány alapelveire épülnek, de az adott ágazat kockázatainak és minőségi követelményeinek megfelelő többletelvárásokat tartalmaznak [2].

A jelenlegi NATO követelményeket tartalmazó egységes gyártási előírások elődje már a 18. században megjelent Franciaországban. A francia hadsereg által használt ágyúk kaliberét egységesítették, ez lehetővé tette a gyártás egyszerűsítését és üzemeltetését [3]. A következő nagyobb mérföldkö a hadászati területen az USA-ban 1937-ben bevezetett, egységesített műszaki előírások a szárazföldi és tengerészeti haderőnem számára (Army-Navy Aeronautical Board). Ez adta az alapját 1952-ben megalapított Védelmi Szabványosítási Program (Defense Standardization Program, DSP) létrejöttének [4]. A DSP napjainkban is érvényben van, a program koordinálja a katonai és civil szabványok alkalmazását, elősegíti a logisztikai és beszállítói folyamatok egységesítését az Egyesült Államokban.

A NATO szabványosítási tevékenysége 1951-ben kezdődött a Katonai Szabványosítási Hivatal (Military Agency for Standardization, MAS) létrehozásával a szövetséges országok katonai rendszereinek összehangolására. A feladata a szövetséges országok interoperabilitását biztosító szabványosítási dokumentumok kidolgozása volt. Ennek keretében elsősorban STANAG (Standardization Agreement, Egységesítési Egyezmény) megállapodásokat adott ki, amelyek a katonai műveletek, a logisztika, a fegyverrendszerek és a minőségbiztosítás egységes követelményeit rögzítik. A NATO katonai minőségügyi rendszerének egyik legfontosabb dokumentuma a STANAG 4107 [5], amely a kormányzati minőségbiztosítás kölcsönös elfogadásának alapját képezi, és amelyre az AQAP minőségbiztosítási kiadványok is épülnek [6,7].

Ford és Gould tanulmányában [8] a kézfegyverek és kézfegyver-lőszerek szabványosítási törekvéseit fejti ki a NATO-n belül 1970 és 1980 között. Megállapítja, hogy a szabványosítás nem csak műszaki vagy logisztikai kérdés volt, hanem politikai jelleget is öltött. Ez azt jelenti, hogy a NATO tagállamok kiemelt szereplői (Egyesült Államok, Egyesült Királyság, Nyugat Németország) a saját szabványaikat szerették volna elfogadtatni a többi tagállammal. Végül a közös megegyezést a belga Fabrique Nationale (Nemzeti Gyár, FN) által fejlesztett SS109 lőszer szabvány eredményezte. A közös NATO lőszer szabványosítást a Varsói Szerződés megalakulása sürgette.

Az Európai Védelmi Ügynökség (European Defence Agency, EDA) 2004-ben jött létre az Európai Unió védelmi együttműködésének erősítése érdekében. Az ügynökség feladata a katonai képességfejlesztés, a védelmi kutatás és a hadiipari együttműködés támogatása, valamint a szabványosítás elősegítése [9].

A NATO szabványosítási rendszerének modernizációja során a MAS funkcióit fokozatosan átvette a 2014-ben létrehozott NATO Szabványosítási Hivatal (NATO Standardization Office, NSO), amely jelenleg a NATO szabványosítási tevékenységének központi koordináló szervezete.

A hadi- és a civil ipar minőségügyi követelményeinek fejlődése eltérő működési környezetben ment végbe, ugyanakkor mindkét területen alapvető cél volt a beszállítói láncok megfelelőségének és a termékek megbízhatóságának biztosítása. Míg a hadiiparban a szerződéses megfelelőség, a rendszerbiztonság és a kormányzati minőségbiztosítás állt a szabályozás középpontjában, míg az autóiparban a globális beszállítói hálózatok növekvő komplexitása, a nagy volumenű sorozatgyártás, a Just-In-Time logisztikai rendszerek, valamint a termékbiztonsági és termékfelelősségi követelmények tették szükségessé az egységes beszállítói minőségirányítási előírások kialakítását. Ennek eredményeként az autóipar az ISO 9001 szabvány alapjaira építve létrehozta saját, nemzetközileg harmonizált követelményrendszerét, amely napjainkban az IATF 16949 [10] szabványban jelenik meg. Az IATF 16949 kidolgozásában meghatározó szerepet játszottak az OEM (Original Equipment Manufacturer, Eredeti Berendezésgyártó) járműgyártók, amelyek egységes követelményeket határoztak meg a teljes beszállítói láncra vonatkozóan.

A kutatás célja a hadiipari és a járműipari minőségirányítási rendszerek fejlődésének és alkalmazási sajátosságainak vizsgálata és összehasonlító elemzése. A hadiipari és a járműipari minőségirányítás közös alapját az ISO 9001 alapelvei jelentik, azonban az eltérő működési környezet és vevői elvárások következtében jelentős különbségek alakultak ki a két rendszer követelményeiben. A tanulmány a vevői követelmény, a fejlesztési folyamat, a kockázatkezelés, a nyomonkövethetőség, a logisztika, a költséggazdálkodás, valamint a megbízhatóság és termékbiztonság szempontjából hasonlítja össze az AQAP és az IATF 16949 rendszereket.

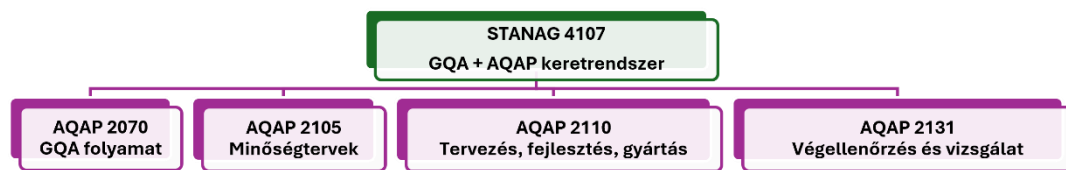
HADIIPARI GYÁRTÁS ÉS SZABVÁNYOSÍTÁS

A hadiipari minőségirányítás fejlődését elsősorban a hibamentes gyártás és az interoperabilitás iránti igény határozta meg. A két világháború során a hadseregek nagy mennyiségben igényelték fegyvereket, lőszereket és haditechnikai eszközöket, ezért szükségessé vált a gyártási folyamatok egységesítése és a termékek csereszabotosságának biztosítása. A nagy gyártási volumen miatt a teljes körű ellenőrzést fokozatosan felváltották a statisztikai minőségszabályozási és mintavételes ellenőrzési módszerek. [6,7]

A hadiipari minőségbiztosítás fejlődésének egyik fontos állomása volt a MIL-STD-105 [11] mintavételi szabvány bevezetése, amely a katonai termékek ellenőrzésének alapját jelentette. A következő jelentős lépést az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma által 1963-ban kiadott MIL-Q-9858A [12] szabvány jelentette. Ez már nemcsak a végtermék megfelelőségét vizsgálta, hanem előírta a beszállítók számára dokumentált minőségbiztosítási rendszer működtetését is. A szabvány jelentős hatást gyakorolt a későbbi polgári minőségirányítási rendszerek fejlődésére, és az ISO 9001 [13] egyik elődjének tekinthető. [6,7]

A katonai szabványosítás fejlődésében több ország játszott meghatározó szerepet. Az Egyesült Királyság a Defence Standards (DEF STAN, [14]) rendszerrel járult hozzá a hadiipari minőségbiztosítás fejlődéséhez, míg a civil alkalmazásra kidolgozott BS 5750 [15] szabvány később az ISO 9001 alapjául szolgált. Németországban a szabványosítás az ipari szabványokkal párhuzamosan fejlődött, és a NATO-hoz való csatlakozást követően a Bundeswehr fokozatosan átvette a STANAG- és AQAP-követelményeket. [8] Ázsiában Japán a statisztikai minőség szabályozás és a folyamatos fejlesztés módszereinek alkalmazásával vált meghatározóvá, míg Kína a GJB (Guo Jia Jun Biao, Kínai katonai termék minőségbiztosítási többletkövetelmény), a Szovjetunió és később Oroszország pedig a GOST (Gosudarstvenny Standart, Orosz nemzeti megfelelőségi tanúsítvány) szabványrendszerre építette hadiipari szabványosítását.

A NATO minőségirányítási rendszerének alapját a STANAG 4107 [5] és az arra épülő AQAP (Allied Quality Assurance Publications) dokumentumok jelentik (1. ábra). A STANAG 4107 a NATO minőségbiztosítási politikájának és a kölcsönös kormányzati minőségbiztosítási (Government Quality Assurance, GQA) elfogadásnak a szabványosítási keretét adja, míg az AQAP-dokumentumok a védelmi termékekre és szolgáltatásokra vonatkozó konkrét minőségirányítási és minőségbiztosítási követelményeket egységesítik. Az AQAP 2110 [16] a tervezést, fejlesztést és gyártást végző szervezetek minőségirányítási követelményeit határozza meg, az AQAP 2070 [17] a GQA folyamatának végrehajtására ad útmutatást, az AQAP 2105 [18] a minőségtervekkel, az AQAP 2131 [19] pedig a végellenőrzésekkel foglalkozik. Ezek a dokumentumok a STANAG 4107 keretrendszerében együttesen biztosítják a NATO beszállítói láncának minőségét, megbízhatóságát és interoperabilitását a hadiipar számára.



1. ábra: A NATO minőségbiztosítási keretrendszere: STANAG 4107 és az AQAP dokumentumrendszer (saját szerkesztés)

JÁRMŰIPAR ÉS SZABVÁNYOSÍTÁS

Az autóipar minőségirányítási rendszereinek fejlődése szorosan kapcsolódik a tömegtermelés megjelenéséhez és a gyártási folyamatok egyre magasabb szintű szabályozásának igényéhez. A 20. század elején Henry Ford futószalagos gyártási rendszere forradalmasította az ipari termelést, lehetővé téve a nagy darabszámú, egységes minőségű termékek előállítását az átfutási idők és a gyártási költségek radikális csökkentése mellett. A tömegtermelés sikerének alapfeltétele volt a szabványosított alkatrészek alkalmazása, a gyártási folyamatok ismételhetősége és a termékek csereszabotossága. [20]

A minőségügy fejlődésének következő jelentős állomása Walter A. Shewhart munkásságához kapcsolódik, aki az 1920-as években kidolgozta a statisztikai folyamatszabályozás (Statistical Process Control, SPC) alapjait. Módszerei lehetővé tették a gyártási folyamatok folyamatos nyomon követését és a hibák korai felismerését a tömeggyártásban, ami jelentős hatást gyakorolt a modern minőségirányítási rendszerek kialakulására.

A második világháborút követően W. Edwards Deming és Joseph M. Juran továbbfejlesztették a minőségirányítás elméletét. Deming a folyamatközpontú szemléletet, a statisztikai módszerek alkalmazását és a folyamatos fejlesztés fontosságát hangsúlyozta, míg Juran a minőségtervezés, a minőségszabályozás és a minőségfejlesztés egységes rendszerét dolgozta ki. Munkásságuk eredményeként a japán ipar a második világháborút követő évtizedekben a minőségirányítás egyik vezető szereplőjévé fejlődött, és saját minőségfilozófiájával jelentős hatást gyakorolt a nemzetközi minőségmenedzsment fejlődésére az amerikai és európai megközelítések mellett. [2].

Az Egyesült Királyságban 1979-ben jelent meg a BS 5750 [15] minőségirányítási szabvány, amely az első átfogó, szervezeti szintű minőségirányítási követelményrendszerek közé tartozott. A szabvány célja a vállalati folyamatok szabályozása és a vevői követelmények következetes teljesítésének biztosítása volt. A BS 5750 előfutára volt az 1987-ben kiadott ISO 9001 nemzetközi szabvány kidolgozásának.

Az ISO 9001 megjelenése meghatározó jelentőségű a minőségirányítás történetében, mivel egységes keretrendszert biztosított a különböző iparágak számára. Az autóipar azonban hamar felismerte, hogy a szabvány általánosan megfogalmazott követelményei nem minden esetben elegendők a nagy sorozatú gyártás és az összetett beszállítói láncok kezeléséhez. Ennek eredményeként az amerikai nagy autógyártó konszernek, a Ford, a General Motors és a Chrysler 1994-ben létrehozták a QS-9000 követelményt [21], amely az ISO 9001 szabványt autóipari többletkövetelményekkel egészítette ki a beszállítók minőségirányítási rendszerének működtetéséhez. [22]

A globális autóipari beszállítói láncok fejlődése szükségessé tette a különböző regionális követelményrendszerek egységesítését. Ennek eredményeként jelent meg 1999-ben az ISO/TS 16949 [23] műszaki specifikáció, amely egyetlen nemzetközi szabványba foglalta az amerikai, az európai és a japán autóipari többletkövetelményeket. A többletkövetelmény célja a hibamegelőzés, a selejt és az újramunkálás csökkentése, valamint a beszállítói folyamatok folyamatos fejlesztése volt.

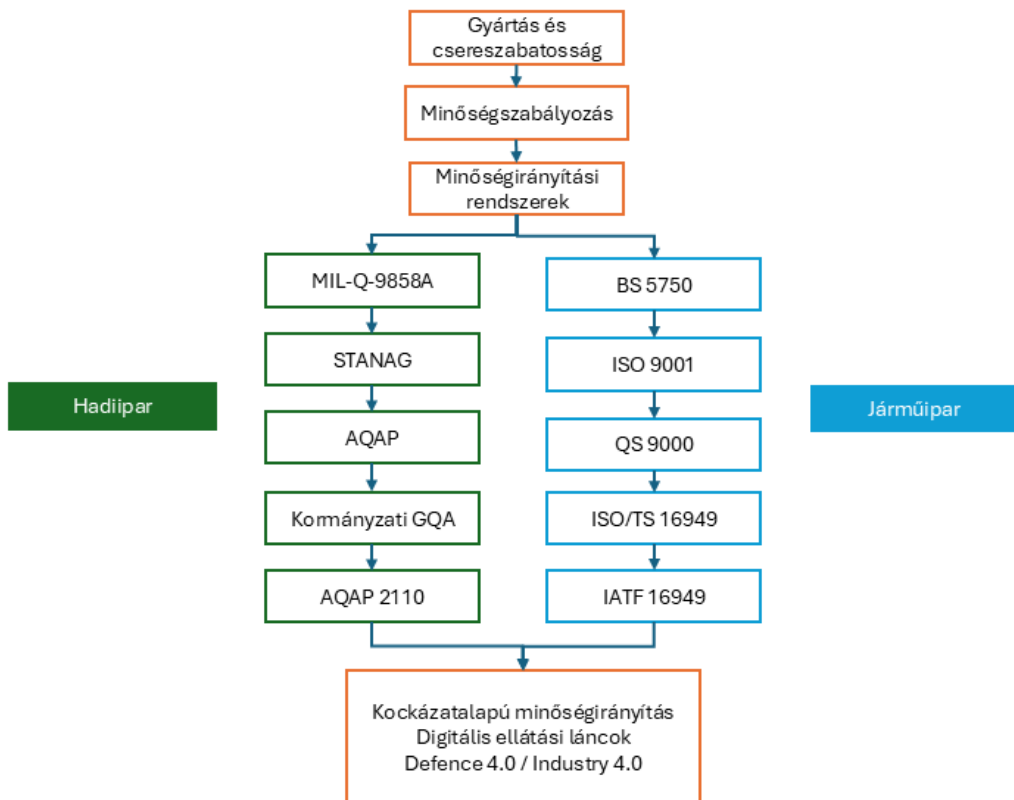
Az ISO/TS 16949 szabványt 2016-ban az IATF 16949 váltotta fel, amelyet a International Automotive Task Force (IATF) dolgozott ki. Az új autóipari többletkövetelmény az ISO 9001:2015 [13] követelményeire épül, és kiemelt hangsúlyt helyez a kockázatalapú gondolkodásra, a termékbiztonságra, a beszállítói lánc felügyeletére, a hibamegelőzésre és a folyamatos fejlesztésre. Napjainkban az IATF 16949 a világ vezető gépjárműgyártói és autóipari beszállítói számára alapvető minőségirányítási követelménynek számít, és meghatározó szerepet tölt be a globális autóipari ellátási lánc működésében. [24]

Az autóipari minőségirányítás sajátossága, hogy az IATF 16949 követelményeinek gyakorlati megvalósítását az úgynevezett Automotive Core Tools (Alapvető autóipari minőségtechnikák) módszertan támogatja. Ezek az eszközök a fejlesztési és gyártási folyamatok szabályozását, a kockázatok csökkentését és a hibamegelőzést szolgálják. A legfontosabb Core Tools elemek az fejlett termékminőség-tervezés (Advanced Product Quality Planning, APQP), a gyártási alkatrész jóváhagyási eljárás (Production Part Approval Process, PPAP), a hibamód- és hatáselemzés (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), a statisztikai folyamatszabályozás Statistical Process Control, SPC), a mérőrendszer elemzés (Measurement System Analysis, MSA) és a szabályozás terv (Control Plan, CP) [25]. Ezek együttes alkalmazása biztosítja a termékfejlesztés, a gyártás és a beszállítói folyamatok sza-

bályozottságát, valamint hozzájárul a hibák megelőzéséhez és a folyamatos fejlesztés megvalósításához. Az autóiipari minőségirányítás célja a vevői elégedettség növelése, a selejtarány csökkentése és a nullahibás gyártás megközelítése, amely a gyakorlatban gyakran a gyártási szórás csökkentésére alkalmazott statisztikai módszer, az ún. Six Sigma módszer-tanhoz kapcsolódó 3,4 ppm hibaszint elérését tűzi ki célul.

HADIIPARI ÉS JÁRMŰIPARI GYÁRTÁS MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSÁNAK KÜLÖNBSEGEI

A hadiipari és az autóiipari minőségirányítás fejlődése tehát számos közös elemmel, jellemzővel rendelkezik, ugyanakkor az eltérő alkalmazási környezet és vevői elvárás miatt eltérő szabályozási rendszerek alakultak ki. A fejlődési folyamat főbb mérföldköveit az 2. ábra mutatja be.



2. ábra: Hadiipari és járműipari minőségügyi követelmények fejlődése (saját szerkesztés)

Látható, hogy a hadiipari és az autóiipari minőségirányítási rendszerek fejlődése részben párhuzamosan zajlott. Mindkét területen a megbízható működéssel rendelkező műszaki termékek gyártása, a folyamatok szabályozása és a minőségirányítási rendszerek kialakulása jelentették a fejlődés alapját. Míg a hadiiparban a katonai szabványokból és a NATO AQAP-rendszerből fejlődött ki a jelenlegi minőségbiztosítási struktúra, addig az autóiiparban a QS-9000, ISO/TS 16949, majd az IATF 16949 követelményrendszer vált meghatározóvá. A két terület fejlődésének összehasonlítása lehetőséget biztosít a közös és az

ágazatspecifikus minőségügyi követelmények azonosítására. A két iparág minőségirányítási rendszere eltérő fejlődési utat járt be, azonban a kockázatalapú minőségirányítás, a digitalizáció, a nyomonkövethetőség és az intelligens ellátási láncok térnyerése következtében a jövőben várhatóan egyre több közös jellemzőt mutatnak majd. Az Ipar 4.0 és a Defence 4.0 megoldások alkalmazása mindkét területen a proaktív, adatvezérelt minőségirányítás irányába mutat [26].

A hadiipari és az autóipari minőségirányítási rendszerek több területen hasonló célokat szolgálnak. Az AQAP 2110 [16] a teljes minőségirányítási rendszerre vonatkozó követelményeket tartalmazza, ezért az IATF 16949 szabvánnyal összehasonlítható. Az AQAP 2105 [18] a minőségtervezés területén hasonlítható az APQP [27] módszerhez, míg az AQAP 2131 [19] a termék megfelelőség igazolásán keresztül a PPAP [28] rendszerrel mutat rokonságot. A kockázatok kezelésében az AQAP követelményei és az autóiparban alkalmazott FMEA [29] egyaránt a hibák megelőzését és a megbízhatóság növelését szolgálják. A legnagyobb különbséget az AQAP 2070 [17] által szabályozott kormányzati minőségbiztosítás jelenti, ellenben az autóiparban a beszállítók felügyeletét nem állami szervezetek, hanem maguk a járműgyártók végzik.

A két iparág minőségirányítási rendszereinek fejlődése számos közös elemet mutat, ugyanakkor az eltérő működési környezetből adódóan jelentős különbségek is megfigyelhetők. A következőkben ezen hasonlóságok és eltérések összehasonlító elemzésére kerül sor.

Vevői követelmények

A hadiipari és a járműipari beszállítói láncokban a vevői követelmények meghatározó szerepet töltenek be a műszaki termékek megfelelőségének, megbízhatóságának és biztonságának biztosításában. A járműiparban a vevői követelményeket elsősorban az OEM-ek által meghatározott beszállítói előírások határozzák meg, amelyek a termék- és folyamatmegfelelőségre, a hibamegelőzésre, valamint a folyamatos fejlesztésre fókuszálnak.

A hadiiparban a megrendelő által meghatározott szerződéses előírások, műszaki specifikációk és minőségbiztosítási követelmények, valamint a NATO AQAP dokumentumok képezik a követelmények alapját. Ezek a követelmények nagyobb hangsúlyt fektetnek a termékjellemzők mellett a konfigurációkezelésre, a nyomonkövethetőségre, a dokumentációra és az ellenőrzési tevékenységekre is.

A járműipari és a hadiipari vevői követelmények közötti egyik lényeges különbség a gyártási volumenből adódik. Míg a járműiparban a nagy sorozatnagyság miatt a folyamatstabilitás és a folyamatképeség igazolása kerül előtérbe, addig a hadiiparban többnyire az egyedi és kis sorozatú gyártás következtében a konfigurációkezelés, a dokumentáltság és a nyomonkövethetőség kap hangsúlyosabb szerepet.

Az ellenőrzési és auditálási gyakorlat szintén eltérő. Az autóiparban a beszállítók auditálását elsősorban az OEM-ek, a vevői képviselők és a tanúsító szervezetek auditorai végzik, míg a hadiiparban a vevői auditok mellett a kormányzati minőségbiztosítás képviselői (Government Quality Assurance Representative, GQAR) is jogosultak a beszállítók folyamatainak és termékeinek felügyeletére. Ennek megfelelően a járműipari auditok elsősorban a folyamatok stabil működésének értékelésére, a hadiipari auditok pedig a szerződéses követelmények, a konfiguráció és a nyomonkövethetőség megfelelőségének igazolására irányulnak.

Fejlesztési folyamat

A járműiparban a fejlesztési folyamatok elsődleges célja a nagy volumenű sorozatgyártásra alkalmas termékek és gyártási folyamatok megfelelő kialakítása. Ennek következtében a fejlesztések során kiemelt szerepet kap a folyamatképesség, a gyárthatóság és a gazdaságosság biztosítása. A fejlesztések támogatására az autóipar egységes módszertanokat alkalmaz, amelyek közül a legjelentősebbek az APQP, a folyamat-FMEA, a szabályozási terv (Control Plan, CP) és a PPAP.

A hadiiparban a fejlesztési folyamat hangsúlyai eltérőek. A gyártásfejlesztés elsődleges célja nem a nagy sorozatú gyártás optimalizálása, hanem a szerződéses követelményeknek való megfelelés, valamint a termék konfigurációjának és nyomonkövethetőségének biztosítása.

A két ágazat közötti egyik legfontosabb különbség, hogy a járműipari fejlesztések alapvetően a későbbi sorozatgyártás optimalizálására irányulnak, míg a hadiiparban a fejlesztési folyamat során a rendszer teljes életciklusát figyelembe kell venni, beleértve az üzemeltetést, a fenntartást, a modernizációt és a kivonás követelményeit is [30]. Ennek következtében a hadiipari fejlesztések általában nagyobb dokumentációs és jóváhagyási igénnyel valósulnak meg, mint a járműipari fejlesztési projektek.

Kockázatkezelés

Az autóipari és a hadiipari kockázatkezelés irányultsága csekély mértékben tér el egymástól, a lényeges különbség az, hogy hogyan rangsorolják a kockázati tényezőket, és a gyártás során kit delegálnak a kockázatok értékelésében. Az autóiparban a kockázatkezelés elsősorban a sorozatgyártás során fellépő termék- és folyamatkockázatok azonosítására és csökkentésére irányul, míg a hadiipari gyártásban a kockázatok vizsgálatának a fókuszában az áll, hogy a gyártás során miben nem teljesültek azok a szerződéses feltételek, amelyek az előerő képességét csökkentik.

Az autóiparban a kockázatok kezelésének alapvető eszköze az FMEA, amely a potenciális hibamódok, azok okainak és következményeinek elemzésére szolgál. A NATO GQA rendszerében a RIAC (Risk Identification, Assessment and Communication) folyamat támogatja a szerződéses és minőségbiztosítási kockázatok azonosítását, értékelését és kommunikációját. Míg az FMEA a műszaki hibák megelőzésére, a RIAC pedig a kormányzati minőségbiztosítási felügyelet kockázatalapú tervezésére szolgál. Mindkét módszer összhangban áll az ISO 31000 szabvány [31] kockázatkezelési alapelveivel, amelyek a kockázatok szisztematikus azonosítását, értékelését és kezelését helyezik előtérbe.

A két megközelítés közötti fő különbség továbbá, hogy az autóipari kockázatelemzés elsősorban a sorozatgyártási és termékhibák megelőzésére fókuszál, míg a hadiipari kockázatkezelés a szerződéses követelmények teljesülését, a rendszer megbízhatóságát és az esetleges meghibásodások biztonsági következményeit is figyelembe veszi. A hadiipari kockázatkezelési folyamatba szükség esetén a kormányzati minőségbiztosítás képviselője (GQAR) is bevonható.

Nyomonkövethetőség

A nyomonkövethetőség mind a hadiiparban, mind a járműiparban alapvető követelmény, azonban vannak eltérések. A járműipar elsősorban a termék életciklusára koncentrálna, biztosítva az alkatrészek, gyártási tételek és folyamatok visszakövethetőségét. Ennek

elsődleges célja a minőségi problémák okainak feltárása, a hibás termékek azonosítása és a visszahívási folyamatok támogatása.

Ezzel szemben a hadiiparban a nyomomonkövethetőség a rendszer teljes életciklusára kiterjed, a fejlesztéstől és gyártástól kezdve az üzemeltetésen, karbantartáson és modernizáción át egészen a kivonásig. Ennek megfelelően a követelmények nem csupán az alkatrészek és gyártási folyamatok azonosítására terjednek ki, hanem a konfigurációváltozások, javítások és üzemeltetési események dokumentált követésére is.

A hadiipari követelmények kiemelt figyelmet fordítanak a hamis vagy nem hitelesített alkatrészek kizárására, mivel azok közvetlenül veszélyeztethetik a rendszer megbízhatóságát és biztonságát. A járműiparban a hamis alkatrészek szintén kockázatot jelentenek, azonban a vevői követelmények elsődlegesen a termék- és folyamatmegfelelőség biztosítására összpontosítanak.

Just in Time és logisztika

A logisztikai követelmények területén jelentős különbség figyelhető meg a két ágazat között. A járműiparban a beszállítói láncok működését a Just-in-Time (JIT) és Just-in-Sequence (JIS) elvek [32] határozzák meg a költségsökkentés céljából. A JIT azt jelenti, hogy közvetlenül a gyártás megkezdése előtt szerzik be a szükséges anyagokat és alkatrészeket, míg a JIS során a gyártás közbeni felhasználás sorrendjében történik az alkatrészek beszállítása a gyártósorra. E megközelítések elsődleges célja a készletszintek minimalizálása, a készletezési költségek csökkentése és a termelési folyamatok folyamatos kiszolgálásának biztosítása.

Ezzel szemben a hadiiparban a logisztikai követelmények elsődlegesen az ellátásbiztonságra, az alkatrész-utánpótlás garantálására és a rendszer hosszú távú üzemeltethetőségének támogatására irányulnak. A hadiipari gyártás mennyiségi és időbeli igénye kevésbé tervezhető, ezért a logisztikai és készletgazdálkodási folyamatok korlátozott mértékben építhetők a Just-in-Time (JIT) elvre.

Költséggazdálkodás

A költséggazdálkodás területén is a járműipar és a hadiipar eltérő szemléletet alkalmaz. A járműiparban a nagy volumenű sorozatgyártás következtében az egységköltség csökkentése, a gyártási hatékonyság növelése és a selejtarány csökkentése, veszteségek minimalizálása kerül előtérbe.

Ezzel szemben a hadiiparban a költségek értékelése a rendszer teljes életciklusára terjed ki, figyelembe véve a fejlesztés, a gyártás, az üzemeltetés, a fenntartás, a modernizáció és a kivonás költségeit is. A beszerzési döntések során ezért nem kizárólag a kezdeti beruházási költség, hanem a teljes életciklus-költség (Life Cycle Cost, LCC) jelent meghatározó szempontot [33].

Megbízhatóság és termékbiztonság

A járműiparban a megbízhatósági és biztonsági követelmények elsődleges célja a meghibásodások, a garanciális költségek és a visszahívások számának csökkentése, valamint a közlekedésbiztonsági előírások teljesítése. Ezzel szemben a hadiiparban a megbízhatóság és a termékbiztonság közvetlen hatással van a rendszer alkalmazhatóságára, az élőerő biztonságára és a műveleti képesség fenntartására. Emiatt a hadiipari követelmények nagyobb hangsúlyt helyeznek a megbízhatósági elemzésekre, a környezeti és üzemeltetési

igénybevételek figyelembevételére, valamint a rendszer teljes életciklusa során elvárt hibamentes működőképesség igazolására.

A két ágazat közös jellemzője a Crosby által megfogalmazott nulla hiba szemlélet alkalmazása [34], amely a követelményeknek való teljes megfelelésre és ezáltal a hibák megelőzésére törekszik. A járműiparban ez elsősorban a közel hibamentes sorozatgyártásban, míg a hadiiparban a hibamentes, biztonságos és megbízható működés biztosításában jelenik meg.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Az autóiipari és a hadiipari gyártás minőségügyi folyamatainak összehasonlítása azért indokolt, mert mindkét ágazat az ISO 9001 szabványra épülő, ipárgspecifikus többletkövetelményeket alkalmaz. Fejlődésük során hasonló minőségügyi eszközöket alkalmaztak a beszállítói megfelelés, a folyamatstabilitás, a kockázatkezelés és a termék megbízhatóság biztosítására. A párhuzamos fejlődés eredményeként számos hasonlóság figyelhető meg a minőségbiztosítási módszerek, valamint a beszállítói felügyeleti és megfeleléségtékelési gyakorlatok területén.

Az 1. táblázat alapján megállapítható, hogy a két rendszer alapvetően eltérő végfelhasználókat szolgál. A hadiiparban a minőségbiztosítás elsődleges célja a szerződéses követelmények teljesítése, míg az autóiiparban a vevői elégedettség biztosítása áll a középpontban. Ennek megfelelően a vevő szerepét a hadiiparban jellemzően állami vagy katonai szervezet tölti be, míg a járműiparban az OEM gyártó jelenik meg megrendelőként. Az auditálás során is eltérő megközelítés érvényesül. A hadiiparban a kormányzati minőségbiztosítás (GQA) és a vevői felügyelet dominál, míg az autóiiparban a tanúsító és OEM auditok meghatározóak.

	Hadiipar	Járműipar
Fő cél	Megrendelői szerződésnek való megfelelés	Vevői elégedettség
Vevő	Állam/Haderő	OEM
Audit	GQA, vevői felügyelet	Tanúsító audit, OEM felügyelet
Kockázat	RIAC/ISO 31000	FMEA
Tervezés	AQAP 2105	APQP
Jóváhagyás	GQA/QAR (AQAP 2070)	PPAP
Logisztika	Műveleti alkalmazhatóság	JIT/JIS
Nyomonkövethetőség	Teljes életciklus	Termékéletciklus
Hamis alkatrész	Kiemelt kockázat	Másodlagos kockázat

1. táblázat: A hadiipari AQAP és az autóiipari IATF 16949 rendszerek működési és minőségirányítási sajátosságainak összehasonlítása (saját szerkesztés)

A kockázatkezelés mindkét rendszerben kiemelt jelentőségű, azonban az alkalmazott módszerek különböznek. A hadiiparban a RIAC és az ISO 31000 alapú megközelítés jellemző, míg a járműiparban az FMEA alkalmazása terjedt el. Hasonló eltérés figyelhető meg a tervezési és jóváhagyási folyamatokban is, ahol a hadiiparban az AQAP 2105, valamint a GQA/QAR tevékenységek, míg az autóiiparban az APQP és a PPAP folyamatok biztosítják a megfelelés igazolását.

A logisztikai rendszerek céljai szintén eltérnek. A hadiiparban a műveleti alkalmazhatóság, az ellátásbiztonság és a hosszú távú üzemeltetés támogatása meghatározó, míg az autóiparban a JIT és JIS rendszerek alkalmazása a költséghatékony gyártás kiszolgálását támogatja. A nyomonkövethetőség mindkét iparágban alapvető követelmény, azonban a hadiiparban a teljes életciklusra, míg az autóiparban elsősorban a termékéletciklusra terjed ki. Jelentős különbség mutatkozik továbbá a hamis alkatrészek kezelésében, amely a hadiiparban kiemelt kockázatként jelenik meg, míg az autóiparban jellemzően másodlagos jelentőséggel bír.

Különös figyelmet érdemelnek azok a beszállítók, amelyek egyidejűleg jelen vannak az autóipari és a hadiipari ellátási láncokban. E szervezetek számára kihívást jelent az eltérő minőségügyi, dokumentációs, kockázatkezelési és megfelelőségértékelési követelmények egyidejű teljesítése, valamint az IATF 16949 és az AQAP követelményrendszerekből származó többletelvárások összehangolása.

A kutatás további bővítésének lehetőségét jelentheti a légijárműiparban alkalmazott AS9100 követelményrendszer bevonása, valamint annak összehasonlítása az AQAP és az IATF 16949 többletkövetelményekkel. További vizsgálati terület lehet a mesterséges intelligencia és a kiberbiztonság szerepe a hadiipari és autóipari minőségbiztosításban. A digitalizáció terjedésével mindkét iparágban növekszik az intelligens gyártási rendszerek, a hálózatba kapcsolt eszközök és az adatvezérelt döntéshozatal jelentősége. Ennek következtében a minőségbiztosítás és a kockázatkezelés mellett egyre nagyobb figyelmet kell fordítani az adatok védelmére, a rendszerek kibervédelmére és a mesterséges intelligencia alkalmazásából eredő kockázatok kezelésére.

Az összehasonlítás eredményei tehát igazolták, hogy az AQAP és az IATF 16949 követelményrendszerek közös ISO 9001 alapokra épülnek, ugyanakkor az eltérő alkalmazási környezet jelentősen befolyásolja a minőségbiztosítási prioritásokat és az alkalmazott módszereket.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] J. Yates and C. N. Murphy, "Introduction: Standards and the Global Economy," *Business History Review*, vol. 96, no. 1, pp. 3–15, 2022.
- [2] Z. Koczor, Ed., *Minőségmenedzsment rendszerek fejlesztése*. Budapest, Hungary: TÜV Rheinland InterCert Kft., 2010.
- [3] K. Turcsányi and E. Hegedűs, "A tűzértség szerepének átalakulása az ipari fejlődés hatására a 18–19. században I. rész," *Hadtudományi Szemle*, vol. 6, no. 3, p. 60, 2013.
- [4] S. Lowell, "The Birth of the Defense Standardization Program," *Defense Standardization Program Journal*, 50th Anniversary Issue, pp. 3–5, Jul. 2002.
- [5] NATO Standardization Office, *STANAG 4107: Mutual Acceptance of Government Quality Assurance and Usage of the Allied Quality Assurance Publications (AQAPs)*, Edition 12, Brussels, Belgium, 2023.
- [6] K. Turcsányi and L. Mikula, "A katonai minőségügy helyzete," *Hadtudomány*, vol. 10, no. 3, pp. 77–86, 2000.
- [7] J. Kovács, "A NATO szabványosítási rendszere és a STANAG-szabványok," *Repüléstudományi Közlemények*, vol. 13, no. 1, pp. 25–37, 2001.

- [8] M. Ford and A. Gould, “Military Identities, Conventional Capability and the Politics of NATO Standardisation at the Beginning of the Second Cold War, 1970–1980,” *The International History Review*, vol. 41, no. 4, pp. 775–792, 2019.
- [9] M. Pittini and K. I. Kourousis, “Harmonising and Standardising Military Airworthiness in Europe: A Review of Key Aspects and Achievements,” *The Aeronautical Journal*, vol. 128, no. 1323, pp. 911–927, 2024.
- [10] International Automotive Task Force, *IATF 16949:2016 Quality Management System Requirements for Automotive Production and Relevant Service Parts Organizations*, 1st ed., London, United Kingdom, 2016.
- [11] U.S. Department of Defense, *MIL-STD-105E: Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes*, Washington, DC, USA, 1989.
- [12] U.S. Department of Defense, *MIL-Q-9858A: Quality Program Requirements*, Washington, DC, USA, 1963.
- [13] International Organization for Standardization, *ISO 9001:2015 Quality Management Systems — Requirements*, Geneva, Switzerland, 2015.
- [14] Defence Standards, „Defence Standards”, DefStan, [Online]. Elérhető: <https://www.defstand.com/world-built-on-standards/defence-standards/> . Letöltve: 2026. augusztus 9.
- [15] British Standards Institution, *BS 5750: Quality Systems*, London, United Kingdom, 1979.
- [16] NATO Standardization Office, *AQAP 2110: NATO Quality Assurance Requirements for Design, Development and Production*, Edition D Version 1, Brussels, Belgium, 2016.
- [17] NATO Standardization Office, *AQAP 2070: NATO Mutual Government Quality Assurance (GQA)*, Edition C, Version 1, Brussels, Belgium, 2025.
- [18] NATO Standardization Office, *AQAP 2105: NATO Requirements for Quality Plans*, Edition C, Version 2, Brussels, Belgium, 2022.
- [19] NATO Standardization Office, *AQAP 2131: NATO Quality Assurance Requirements for Final Inspection and Test*, Edition C, Version 1, Brussels, Belgium, 2017.
- [20] M. Helmold, “History and Evolution in Quality Management (QM),” in *Virtual and Innovative Quality Management Across the Value Chain*, Management for Professionals Series. Cham, Switzerland: Springer, 2023, ch. 5
- [21] Chrysler Corporation, Ford Motor Company and General Motors Corporation, *QS-9000: Quality System Requirements*, 3rd ed., Southfield, MI, USA, 1998.
- [22] C. Kartha, “A Comparison of ISO 9000:2000 Quality System Standards, QS-9000, ISO/TS 16949 and Baldrige Criteria,” *The TQM Magazine*, vol. 16, no. 5, pp. 331–340, 2004, doi: 10.1108/09544780410551269.
- [23] International Organization for Standardization, *ISO/TS 16949:2009 Quality Management Systems – Particular Requirements for the Application of ISO 9001 for Automotive Production and Relevant Service Part Organizations*, Geneva, Switzerland, 2009.
- [24] F. de O. Neves, E. G. Salgado, L. A. Beijo, J. M. S. Lira and L. H. M. da S. Ribeiro, “Analysis of the Quality Management System for Automotive Industry ISO/TS 16949 in the World,” *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 32, nos. 1–2, pp. 153–176, 2021, doi: 10.1080/14783363.2018.1538776.

- [25] AIAG, “Quality Core Tools (APQP - CP - PPAP - FMEA - MSA - SPC),” AIAG. [Online]. Available: <https://www.aiag.org/expertise-areas/quality/quality-core-tools>. [Accessed: Aug. 10, 2026].
- [26] L. Khan, A. Elshennawy, E. Cudney and S. Furterer, “Critical Success Factors for Implementing Industry 4.0 in Aerospace and Defense: A Systematic Literature Review,” *Quality Engineering*, vol. 37, no. 3, pp. 369–386, 2025, doi: 10.1080/08982112.2024.2403606.
- [27] Automotive Industry Action Group, *Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan Reference Manual*, 3rd ed., Southfield, MI, USA, 2024.
- [28] Automotive Industry Action Group, *Production Part Approval Process (PPAP) Manual*, 4th ed., Southfield, MI, USA, 2006.
- [29] Automotive Industry Action Group and Verband der Automobilindustrie, *FMEA Handbook*, 1st ed., Southfield, MI, USA, 2019.
- [30] NATO, *AAP-20: NATO Programme Management Framework (NATO Life Cycle Model)*, Brussels, Belgium: NATO Standardization Office, Oct. 2015.
- [31] ISO, *ISO 31000:2018 Risk Management—Guidelines*, 2nd ed. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018.
- [32] T. Bányai, „Just-in-sequence ellátási stratégiák,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 3, no. 1, pp. 141–152, 2013.
- [33] Z. Kamyk and C. Śliwiński, “Impact of Life Cycle Cost Analysis on the Pontoon Bridge Concept Selection,” *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*, no. 40, no. 2, 2016.
- [34] K. Turcsányi, *Minőségelmélet és -módszertan*. Budapest, Magyarország: Nemzeti Közzolgálati Egyetem, 2014.

**RISKS RELATED TO HUMAN
RESOURCES MANAGEMENT
IN THE AUTOMOTIVE
INDUSTRY****A HUMÁN ERŐFORRÁS VÁLLALATI
MŰKÖDÉSEL ÖSSZEFÜGGÉSBE
HOZHATÓ KOCKÁZATAI
AZ AUTÓIPARBAN**TÓTH Georgina Nóra¹ – DRÉGELYI-KISS Ágota²**Abstract**

Over the past decade, the automotive industry has undergone such rapid and profound technological transformation that it has fundamentally reshaped the nature of human resource risks. The emergence of Industry 4.0 and Industry 5.0 has brought about the digitization and automation of manufacturing processes, giving rise to new competency requirements. Alongside increasing technological complexity, the roles of lifelong learning, flexibility, and resilience have also become increasingly prominent. The risk impact of human factors is linked not only to professional preparedness but also to challenges related to organizational operations, psychosocial stress, and technological transition. The aim of this article is to systematically explore these risks and identify the competency gaps that cause operational uncertainty in the modern automotive industry, while also highlighting the role of higher education in this context.

Keywords

automotive digitalization, human resources risks, skills gaps, engineering education, Industry 4.0/5.0, STEM

Absztrakt

Az autóipar az elmúlt évtizedben olyan gyors és mélyreható technológiai átalakuláson ment keresztül, amely alapvetően formálta át a humánerőforrás-kockázatok jellegét. Az Ipar 4.0 és az Ipar 5.0 megjelenése a gyártási folyamatok digitalizációját, automatizációját hozta magával, amellyel új kompetenciakövetelmények jelentek meg. A technológiai komplexitás növekedése mellett egyre hangsúlyosabbá vált az élethosszig tartó tanulás, a rugalmasság és a reziliencia szerepe is. A humán tényezők kockázati hatása nem csupán a szakmai felkészültséghez, hanem a szervezeti működéshez, a pszichoszociális terheléshez és a technológiai átmenethez kapcsolódó kihívásokhoz is kötődik. A cikk célja ezen kockázatok rendszerszintű feltárása, valamint azoknak a kompetenciahiányoknak az azonosítása, amelyek a modern autóipari környezetben működési bizonytalanságot okoznak, figyelmet fordítva a felsőoktatás szerepére is a témában.

Kulcsszavak

autóipari digitalizáció, humánerőforrás kockázatok, kompetenciahiány, mérnök-képzés, Ipar 4.0/5.0, STEM

¹ toth.georgina@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0007-7451-9322 | assistant lecturer, Óbuda University | egyetemi tanársegéd, Óbudai Egyetem

² dregelyi.agota@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-1622-0820 | associate professor, Óbuda University | egyetemi docens, Óbudai Egyetem

BEVEZETÉS

Az autóipar az elmúlt évtizedben olyan mélyreható technológiai és szervezeti átalakuláson ment keresztül, amely alapjaiban formálja át a humánerőforrás-kockázatok természetét. A változás elsődleges mozgatórugói az Ipar 4.0 és az Ipar 5.0 megjelenése, amelyek nem csupán technológiai innovációt, hanem új kompetencia és szaktudással összefüggő követelményeket jelentenek, továbbá hangsúlyosan megjelenik az élethosszig tartó tanulás fontossága, valamint elvárás fogalmazódott meg a rugalmassággal, rezilienciával kapcsolatban is.

Az Ipar 4.0 a gyártási folyamatok teljes digitalizációját és automatizációját hozta magával, olyan technológiákra építve, mint a kiber-fizikai rendszerek, a mesterséges intelligencia, a big data, a felhőalapú infrastruktúrák és az IoT. Az Ipar 4.0 bevezetése jelentős kompetenciaváltást eredményezett. A vállalatoknak egyszerre van szükségük fejlett technikai tudásra (adat- és rendszerelemzés, robotika, AI-alkalmazások) és olyan, nem elsősorban technikai készségekre, mint a kreativitás, a csapatmunkára való alkalmasság és a komplex problémamegoldó képesség [1].

A 2024 után megjelenő Ipar 5.0 koncepció tovább mélyítette ezt az átalakulást, mivel a technológiai innovációt az emberközpontú, fenntartható és rugalmas működéssel kapcsolja össze. Az Ipar 5.0 célja nem a további automatizáció illetve annak maximalizálása, hanem az ember szerepének tisztázása, és a technológiával való összehangba hozása. A vállalatoknak olyan munkaerőre van szükségük, amely képes együttműködni a mesterséges intelligenciával, ugyanakkor rendelkezik magas szintű kommunikációs, kreatív és együttműködési készségekkel illetve rendszerszemlélettel, amelyek lehetővé teszik, hogy az ember legyen a döntéshozó szerepben, felhasználva a rendelkezésre álló legjobb információkat [2]. A paradigmaváltás egyik legfontosabb következménye a készséghiány felerősödése. Ez szükségessé teszi a technológiai és humán kompetenciák összehangolását és újfajta képzési stratégiák alkalmazását, amelyek lehetővé teszik új készségek elsajátítását vagy meglévők fejlesztését [3].

A vállalatok és a felsőoktatás számára ez azt jelenti, hogy a képzési kialakítása során figyelembe kell venniük, hogy a kompetenciafejlesztés nem választható el a szakmai tudás átadásától, valamint a tanulási motiváció és tudatosság növelésétől. [4]

Az ipari ágazatokban a humán erőforrás nemcsak költségtenyezőként jelenik meg, hanem kritikus kockázati forrásként is. A kutatások az emberi kockázatokat egyre inkább a termelési, technológiai és szervezeti kockázatokkal összefonódó tényezőként írják le. [5], [6], [7], [8]. A technológia összetettségének növekedésével a humán tényezők kockázati hatása exponenciálisan nő [9]. A mérnöki tudással kapcsolatos problémák és az utánpótlás hiánya rendszerszintű kockázatot jelent az iparban [10].

KOMPETENCIÁK SZEREPE A MUNKAERŐPIACON AZ AUTÓIPAR TERÜLETÉN

A kompetenciák szerepe a munkaerőpiacon az elmúlt évtizedben radikálisan felértékelődött. A gyors technológiai változások, a digitalizáció, a robotok egyre elterjedtebb alkalmazása, valamint a globális gazdasági bizonytalanságok egyaránt hozzájárultak ahhoz, hogy a munkáltatók a versenyszférában egyre komplexebb kompetenciaprofilokat várnak el. A magyarországi empirikus kutatások [11],[12] egyértelműen rámutatnak arra, hogy a

kompetenciák fejlesztése, mérése, és összehangolása a munkaerőpiaci igényekkel kritikus tényezővé vált. A szerzők hangsúlyozzák, hogy a felsőoktatás továbbra is túlságosan ismeretközpontú, miközben a munkaerőpiac egyre inkább készségekre és attitűdökre épülő kompetenciákat vár el a pályakezdőktől.

A LinkedIn 'Future of Skills' és Most In-Demand Skills 2024-2025 jelentései, valamint Li [1] szerint, és az autóipari álláshirdetések alapján, a legkeresettebb kompetenciák közé tartozik a komplex problémamegoldás, a kritikus gondolkodás, a hatékony kommunikáció, a csapatmunka, az alkalmazkodóképesség, a reziliencia, a vezetői készségek és a kulturális intelligencia, különösen a multinacionális vállalatok esetében. Ezek a készségek ma már legalább olyan fontosak, mint a szakmai tudás, hiányuk komoly versenyképességi kockázatot jelent a műszaki és különösen az autóipari szektorban [12].

AZ AUTÓIPARI HUMÁNERŐFORRÁS-KOCKÁZATOK RENDSZERE

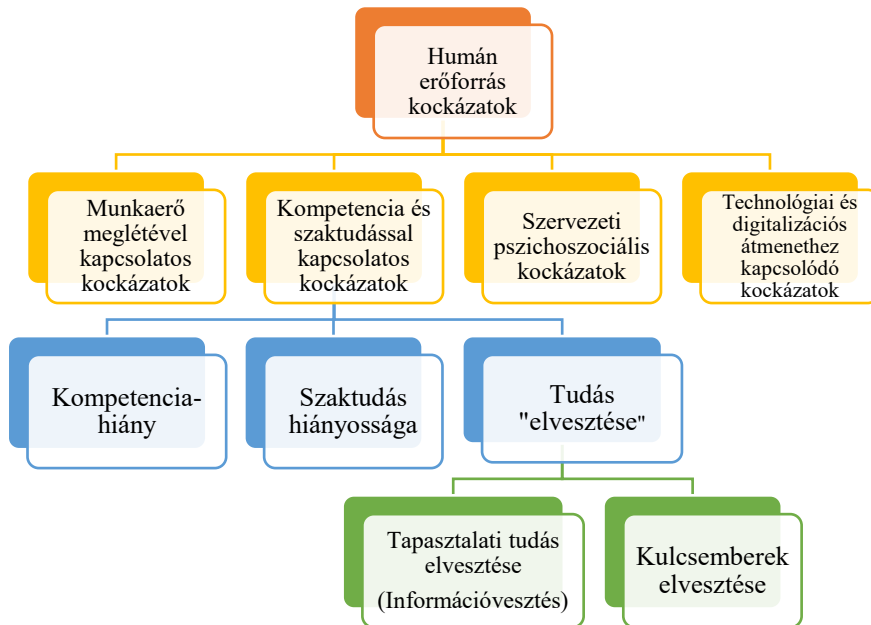
A kockázat definíciója az ISO 31073: 2019-es Kockázatmenedzsment terminológiai szabvány alapján a bizonytalanság hatása a célokra. A kockázatfelmérés -kezelés folyamata során több kockázati kategóriát is vizsgálhatunk. [13] A humán erőforrással összefüggő kockázatok, amelyeket vizsgálók a nehezebben számszerűsíthető kockázatok közé tartoznak, ráadásul kezelésük sem olyan egyszerű.

Az autóiparban működő vállalatoknak számos kihívással kellett megküzdeniük az elmúlt évtizedben. A COVID mellett, olyan technológiai, szervezeti és munkaerőpiaci változások történtek, amelyek a humán erőforrással összefüggő kockázatok a vállalati működés egyik legkritikusabb tényezőjévé tették. A humán erőforrással összefüggésben megjelenő kockázatok ma már nem elszigetelt problémák, hanem komplex, egymással összefüggő kockázati hálózatot alkotnak, amely közvetlen hatással van a termelékenységre, a minőségre, a biztonságra és a vállalati működésére és ellenálló képességére. A kockázatok rendszerszintű megértése különösen fontos az autóiparban, ahol a gyártási folyamatok magas fokú automatizáltsága és a beszállítói láncok sérülékenysége miatt az emberi tényező hibái gyorsan láncreakciót indíthatnak el [17]. Különböző kockázati csoportok hozhatóak létre, amelyek összefüggésbe hozhatók a humán erőforrással [15].

A korábbi tanulmányok [10],[14],[16],[17] alapján az autóipari humán erőforrás-kockázatok négy fő csoportba rendezhetők (1. ábra):

- munkaerő hiányából és fluktuációjából eredő kockázatok,
- kompetencia- és tudáshiányból eredő kockázatok,
- szervezeti és pszichoszociális kockázatok,
- technológiai és digitalizációs átmenethez kapcsolódó kockázatok.

A hierarchikus struktúrában szemléltetett kockázati csoportokat a továbbiakban részletesen kifejtem.



1. ábra: Humán erőforrás kockázatok elemzése

Munkaerő meglétével kapcsolatos kockázatok

Az autóiparban a munkaerőhiány és a fluktuáció az egyik leggyakrabban azonosított kockázati tényező. A 2020 utáni időszakban a globális ellátási láncok sérülékenysége, a járványhelyzet, illetve a geopolitikai konfliktusok tovább növelték a munkaerőpiaci bizonytalanságot. A magyar és nemzetközi kutatások szerint a fluktuáció elsősorban a betanított operátorok, karbantartók és technikusok körében jelentős, ugyanakkor a mérnökök állomány esetében is problémaként jelentkezik, ami közvetlenül növeli a hibázási arányt és a termelési leállások kockázatát [10],[16],[18].

A munkaerővel kapcsolatos további kritikus probléma az elöregedő dolgozói állomány, amely az autóiparban karbantartási és gépkezelői területeket érinti leginkább. A tapasztalt munkavállalók nyugdíjba vonulása tudásvesztést okoz, amelyet a vállalatok gyakran nem tudnak időben pótolni [14],[16].

Kompetencia- és szaktudással kapcsolatos kockázatok

A kompetencia- és tudáshiány az autóipar egyik legkritikusabb működési kockázati tényezőjévé vált [9],[10]. A gyártási rendszerek növekvő komplexitása, az Ipar 4.0 technológiák gyors terjedése és az ellátási láncok sérülékenysége olyan környezetet teremtett, amelyben a humán erőforrás szakmai felkészültsége közvetlenül befolyásolja a termelékenységet, a minőséget és a vállalati rezilienciát. A digitális és automatizálási kompetenciák hiánya, a mechatronikai és karbantartási tudás elégtelensége, az analitikai készségek gyengesége, valamint a rendszerszintű gondolkodás hiánya mind olyan tényezők, amelyek növelik a hibázási arányt, a termelési leállások valószínűségét és a működési zavarok láncreakció szerű kockázatát [9],[19],[20]. Emellett az elöregedő dolgozói állományból fakadó tudásvesztés és az utánpótlás hiánya tovább erősíti a kompetenciadeficit rendszerszintű jellegét, amelyet az autóipari vállalatok egyre súlyosabb stratégiai kockázatként azonosítanak.

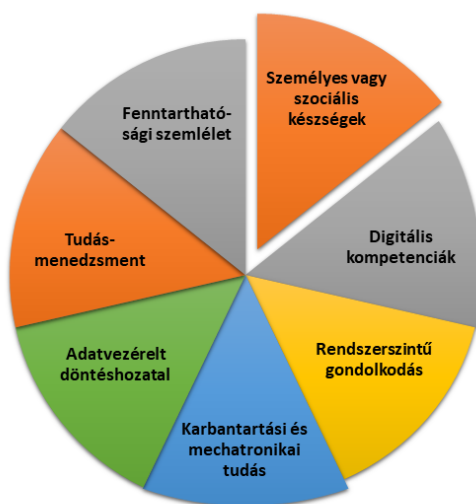
[2]. Így elmondható, hogy a munkaerő meglétével kapcsolatos kockázatok csoportja és a kompetencia- és szaktudással kapcsolatos kockázatok csoportja egymás hatását sajnos fel erősítik.

A mérnökképzés legkritikusabb hiányterületei olyan kompetenciákhoz kapcsolódnak, amelyek a modern autóiipari gyártási rendszerek működéséhez elengedhetetlenek. A digitális és automatizálási készségek, az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó technológiai ismeretek, valamint a rendszerszintű gondolkodás hiánya közvetlenül növeli a hibázási arányt és a működési zavarok kockázatát [8], [9]. A mechatronikai és karbantartási tudás hiányosságai különösen kritikusak a robotizált és kiber-fizikai rendszerekkel működő autóiipari környezetben, ahol a dolgozóknak képesnek kell lenniük komplex rendszerek diagnosztizálására és beavatkozására [6],[10].

Emellett az adatvezérelt döntéshozatalhoz szükséges analitikai és statisztikai készségek fejlesztése továbbra is indokolt a mérnökképzésben, jóllehet a digitalizált gyártási környezetben ezek a kompetenciák alapvetőek a prediktív karbantartás, a folyamatoptimalizálás és a minőségbiztosítás szempontjából [10], [19]. A soft skillek (személyes vagy szociális készségek), különösen a kommunikáció, az együttműködés, a döntéshozatal és a vezetői készségek hiánya szintén jelentős kockázati tényező, mivel a csoportokban való hatékony működés a modern autóiipari vállalatok egyik alapfeltétele a munkaerővel szemben [12], [24].

A tudásmenedzsment és a fenntarthatósági szemlélet hiányosságai tovább erősítik a kompetenciadeficitet. A tapasztalati tudás elvesztése, a nem megfelelő dokumentáció és a fenntartható technológiák ismeretének hiánya hosszú távon csökkenti a vállalatok rezilienciáját és innovációs képességét [16].

A fenti hiányterületek szemléltetése a 2. ábrán látható. Mivel a felsőoktatás biztosítja elsősorban a mérnökök utánpótlását, az ottani képzési színvonal és technológiai felkészültség korai jelzésértékkel bír a munkaerőpiacon várható HR-kockázatokra [16].



2. ábra: A leggyakrabban azonosított hiányterületek (saját szerk.)

Szervezeti és pszichoszociális kockázatok

A pszichoszociális kockázatok az autóiparban különösen erősek a nagyfokú monotonia, a több műszakos munkarend, a teljesítménykényszer és a folyamatos minőségi elvárások miatt. A stressz, a kiegész és a motivációvesztés közvetlenül növeli a hibázási arányt, ami a termelési folyamatokban jelentős kockázatot jelent [20].

A 2021 - 2025 közötti vizsgálatok alapján a pszichoszociális kockázatok három fő területen jelennek meg:

- fizikai és mentális terhelés,
- munkakörnyezet és vezetői stílus,
- elégtelen kommunikáció és visszacsatolás.

A szervezeti kultúra hiányosságai, mint például a hibák elhallgatása vagy a nem megfelelő tudásmegosztás, tovább növelik a kockázatot. [17],[21]

Technológiai és digitalizációs átmenethez kapcsolódó kockázatok

Az autóipar digitalizációja új típusú humán kockázatokat hozott létre. A robotizált gyártósorok, a cobotok, az IoT-alapú rendszerek és az elektromos hajtásláncok kezelése olyan tudást igényel, amelyet a munkaerő jelentős része még nem sajátított el. A technológiai átmenet kockázatai közé tartozik:

- a hibás rendszerhasználat,
- a nem megfelelő robotkezelés,
- az adatértelmezési hibák,
- a kiberbiztonsági incidensek emberi eredetű komponensei.

A 2024-es magyar kutatás szerint a technológiai átmenet során a legnagyobb kockázatot az jelenti, hogy a dolgozók nem értik a rendszer működését, ezért hibás döntéseket hoznak vagy nem megfelelően reagálnak rendellenességekre [18].

A humán erőforrás-kockázatok rendszerszintű összefüggései

A fenti kockázati csoportok nem különálló jelenségek, hanem egymást erősítő tényezők. A fluktuáció például növeli a kompetenciahiányt a szervezeten belül, ami növeli a hibázási arányt, ami növeli a pszichoszociális terhelést, ami tovább növeli a fluktuációt. A szakirodalom ezt kockázati spirálnak nevezi, amely öngerjesztő jellegű [5], [21],[22].

A rendszerszintű megközelítés alapján a humán erőforrás-kockázatok három fő gyökérokra vezethetők vissza:

- képzési és utánpótlási hiányosságokra,
- szervezeti működésből eredő problémákra,
- technológiai fejlődéshez való alkalmazkodási késésre.

Ezek a gyökérok együttesen határozzák meg az autóipari vállalatok biztonsági és működési kockázatait [23].

A gyökérok közül az első, a képzési és utánpótlási hiányosságok meglátásunk szerint nem elszigetelt HR-problémák, hanem olyan stratégiai kockázati tényezők, amelyek a vállalat teljes működésére hatnak. Tehát a szaktudás és kompetencia hiány a teljes vállalati működésre hatással van. A kompetenciahiány akadályozza a technológiai beruházások megtérülését, lassítja a digitalizációs átmenetet, és növeli a szervezeti sérülékenységet. A

rendszerszintű megközelítés alapján a képzési hiányosságok a humán erőforrás-kockázatok egyik legfontosabb gyökérokát jelentik, amelyek megszüntetése az oktatás területén kezdhető el.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

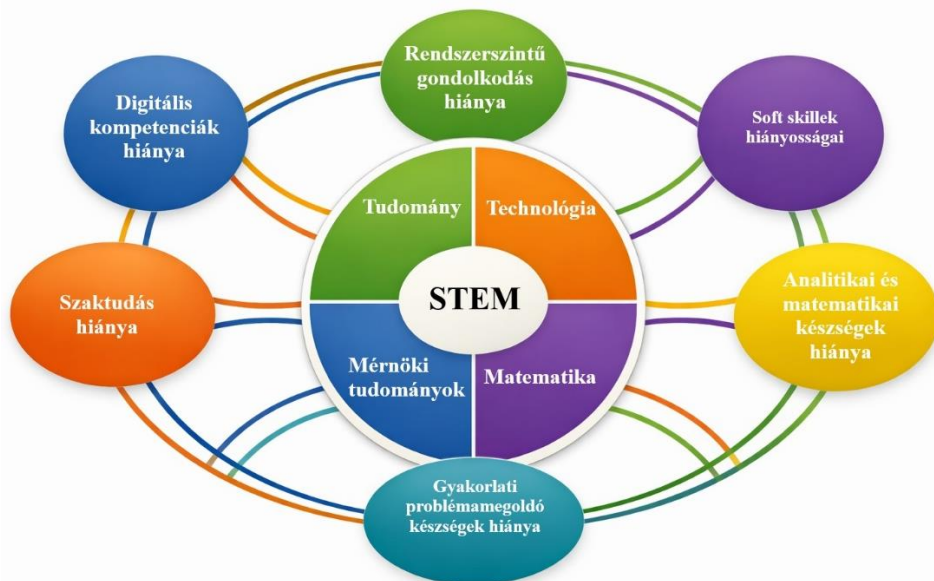
Az elemzés eredményei arra engednek következtetni, hogy az autóiparban megjelenő humán erőforrás-kockázatok szorosan összefüggenek a technológiai fejlődés ütemével és a munkavállalók felkészültségével. Az Ipar 4.0 és Ipar 5.0 technológiák terjedése olyan új kompetenciákat igényel, amelyek a jelenlegi munkaerő jelentős részénél hiányosan vannak jelen. A robotizált gyártósorok, a cobotok, az IoT-alapú rendszerek és az elektromos hajtásláncok kezelése komplex tudást és rendszerszintű megértést feltételez, amelynek hiánya növeli a hibázási arányt és a működési zavarok kockázatát. A kutatás rámutatott arra is, hogy a pszichoszociális terhelés, a vezetői stílus és a kommunikációs hiányosságok tovább erősítik ezeket a kockázatokat, és hozzájárulnak a fluktuáció növekedéséhez.

A humán erőforrás-kockázatok négy fő csoportja, a munkaerőhiány, kompetencia- és tudáshiány, a pszichoszociális tényezők, valamint a technológiai átmenetből fakadó kockázatok, egymást erősítő módon jelennek meg. A fluktuáció növeli a kompetenciadeficitet, a kompetenciadeficit és a pszichoszociális terhelés növeli a hibázási arányt, amely öngerjesztő folyamat. Ez a spirál hosszú távon gyengíti a vállalatok működési stabilitását és rezilienciáját. A felsőoktatás szerepe ebben a folyamatban meghatározó, mivel a mérnökképzés jelenlegi struktúrája nem minden esetben képes lépést tartani az ipar technológiai igényeivel. A STEM-szemlélet hiánya, különösen a rendszerszintű gondolkodás, az analitikai készségek és a gyakorlati problémamegoldás területén, közvetlenül hozzájárulnak a kompetenciahiány fennmaradásához.

A STEM-szemlélet (Science – Technology – Engineering – Mathematics) olyan integrált megközelítést képvisel, amely éppen azokat a kompetenciákat helyezi előtérbe, amelyek a mérnökképzésben és az autóipari gyakorlatban hiányterületként jelennek meg (3. ábra). A STEM egyik alapelve a rendszerszintű gondolkodás és a komplex problémamegoldás fejlesztése, amely a modern autóipari gyártási rendszerekben elengedhetetlen. A kutatások szerint a mérnökhallgatók gyakran nem rendelkeznek megfelelő képességekkel a többváltozós, összetett rendszerek értelmezésére, ami a STEM-alapú oktatás hiányosságaira vezethető vissza [12][24]. A STEM-szemlélet ugyanakkor olyan interdiszciplináris megközelítést támogat, amely a mechanika, elektronika, informatika és adatvezérelt technológiák integrációját hangsúlyozza, ez pedig pontosan az a terület, ahol a mérnökképzésben a legnagyobb kompetenciadeficit mutatkozik [9],[20],[24].

A STEM-oktatás másik kulcseleme a matematikai-analitikai gondolkodás fejlesztése, amely a modern autóipari környezetben az adatvezérelt döntéshozatal alapját képezi. A gyártási folyamatok digitalizációja és a prediktív karbantartási rendszerek elterjedése miatt a mérnököknek képesnek kell lenniük nagy mennyiségű adat értelmezésére, statisztikai elemzésére és modellezésére. A mérnökképzésben az analitikai készségek fejlesztése továbbra sem kiemelt fontosságú terület, ami közvetlenül hozzájárul a kompetenciahiányhoz [19]. A STEM-szemlélet ezen a területen is releváns, mivel a matematikai és tudományos alapok megerősítése csökkentheti a hibázási arányt és javíthatja a mérnökök döntéshozatali képességeit. [10]

A STEM-alapú oktatás hangsúlyozza a gyakorlati, projektalapú tanulást és a kísérletező problémamegoldást, amelyek a mérnökképzésben továbbra is hiányterületnek számítanak. [24] A gyakorlati készségek fejlesztése különösen fontos az autópárhazban, ahol a mérnökknek valós gyártási környezetben kell komplex technológiai rendszereket kezelniük. A kutatások szerint a STEM-szemléletű, gyakorlatorientált oktatás jelentősen csökkenti a kompetenciahiányból eredő működési kockázatokat, mivel fejleszt a hallgatók adaptivitását, technológiai jártasságát és problémamegoldó képességét [12]. A STEM tehát nem csupán oktatási megközelítés, hanem olyan stratégiai keretrendszer, amely közvetlenül hozzájárulhat az autópárhaz kompetenciadeficit mérsékléséhez.[24]



3. ábra: STEM oktatás alkalmazásának és a feltárt hiányosságok hatásábrája (saját szerk.)

A mérnökképzés számára a következő javaslatokat tartom megfontolandónak a képzések kialakítása és megvalósítása során:

1. A digitális és Ipar 4.0 kompetenciák megerősítése a képzésben
A mérnökkhallgatók jelentős része nem rendelkezik megfelelő ismeretekkel az IoT-alapú rendszerek, a robotizált gyártás, a prediktív karbantartás vagy az adatvezérelt döntéshozatal területén. A képzésben ezért nagyobb hangsúlyt kell kapnia a modern gyártási technológiák működésének, a rendszerhasználat gyakorlati elsajátításának és a digitális kompetenciák fejlesztésének. Ez közvetlenül csökkenti a technológiai átmenetből fakadó hibázási kockázatokat.
2. A rendszerszintű gondolkodás és analitikai készségek fejlesztése
A hallgatók gyakran nehezen értik a komplex gyártási rendszerek összefüggéseit, ami a későbbi munkavégzés során hibás döntésekhez vezethet. A mérnökképzésben ezért szükség van olyan tantárgyakra és projektekre, amelyek a teljes rendszer működését mutatják be, és fejlesztik a matematikai-analitikai gondolkodást. Ez különösen fontos az adatvezérelt gyártási környezetben.

3. Gyakorlatorientált, ipari együttműködésen alapuló képzési formák bővítése

A vállalatok visszajelzése szerint a friss diplomások gyakorlati problémamegoldó készségei gyakran hiányosak. A duális képzés, az ipari laborok, a valós gyártási környezetben végzett projektek és a vállalati mentorálás növelése, valamint megfelelő oktatásmódszertan alkalmazása hatékonyan csökkenti a kompetenciadeficitet. A gyakorlatorientált oktatás hozzájárul ahhoz, hogy a hallgatók jobban megértsék a technológiai rendszerek működését, és magabiztosabban kezeljék az új technológiákat.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az autóiparban vizsgáltuk az Ipar 4.0 és Ipar 5.0 technológiák elterjedésének hatására megjelenő humán erőforrással összefüggésbe hozható vállalati működésre hatással lévő kockázatokat. A gyártási folyamatok digitalizációja, a robotizáció, az IoT-alapú rendszerek és a mesterséges intelligencia alkalmazása olyan új kompetenciakövetelményeket hozott létre, amelyek a munkaerő jelentős részénél hiányosan vannak jelen.

A humán erőforrás-kockázatok négy fő csoportba rendezhetők: munkaerőhiány és fluktuáció, kompetencia- és tudáshiány, szervezeti és pszichoszociális kockázatok, valamint a technológiai átmenetből fakadó kockázatok. Ezek a tényezők egymást erősítve olyan kockázati spirált alkotnak, amely hosszú távon gyengíti a vállalatok működési stabilitását és rezilienciáját. A kompetenciahiány mára rendszerszintű problémává vált, amelyet tovább súlyosbít az elöregedő munkaerő és a tapasztalati tudás elvesztése.

A mérnökképzés során figyelembe kell venni az új kihívásokat és célszerű a megelőzésre fókuszálni, a digitális és Ipar 4.0 kompetenciák fejlesztése, a rendszerszintű gondolkodás ösztönzésére, az analitikai készségek fejlesztésére és a gyakorlati problémamegoldás oktatására. A STEM-szemlélet megerősítése, a gyakorlatorientált képzés bővítése és az ipari együttműködések erősítése kulcsfontosságú a kompetenciadeficit mérsékléséhez. A tanulmányban összességében arra a következtetésre jutottunk, hogy az autóipari vállalatok versenyképessége és működési biztonsága csak akkor tartható fenn, ha a technológiai innovációt a humán tényezők tudatos és összehangolt fejlesztése kíséri.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] L. Li, "Reskilling and upskilling the future-ready workforce for Industry 4.0 and beyond," *Inf. Syst. Front.*, vol. 26, pp. 1697–1712, 2024, doi: 10.1007/s10796-022-10318-w.
- [2] M. Brkovic, J. Culibrk, A. Rikalovic, N. Tasic, and B. Bajic, "Industry 5.0 and the skills gap: Strategies for developing a future-ready workforce," *Tech. Rep.*, Univ. Novi Sad, Serbia, 2023, doi: 10.24867/IS-2023-T6.2-2_04941.
- [3] K. Venusamy, A. Selvarani, and G. Sivanesan, "Industry 5.0: A human resource perspective on reskilling and upskilling for the industry," *Emperor Int. J. Manage.*, vol. 5, no. S1, pp. 115–119, Jan. 2025.
- [4] P. R. A. Oeij, S. Dhondt, M. van der Torre, A. van der Beek, and A. van der Meer, "A conceptual framework for workforce skills for Industry 5.0: Implications for research, policy and practice," *J. Innov. Manage.*, vol. 12, no. 1, pp. 205–233, 2024.

- [5] M. R. Endsley, S. Biller, Y. S. D. Wong, J. A. Camelio, and R. A. Shoureshi, “Human-centric Industry 5.0 manufacturing: A multi-level framework from design to consumption within Society 5.0,” *J. Appl. Manage. Entrep.*, vol. 30, no. 1, pp. 1–25, 2025, doi: 10.1080/19397038.2025.2551000.
- [6] H. Stern and T. Becker, “Development of a model for the integration of human factors in cyber-physical production systems,” *Proc. Manuf.*, vol. 9, pp. 151–158, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.030.
- [7] P. M. A. Achoki, “Upskilling and reskilling for a VUCA world: Organizational sense-response framework,” *GiLE J. Skills Dev.*, vol. 3, no. 4, pp. 34–52, 2023.
- [8] X. Xu, T. Jia, P. Zheng, and L. Wang, “Human-centric manufacturing: Re-thinking, re-justifying, and re-envisioning,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 84, pp. 259–268, 2026, doi: 10.1016/j.jmsy.2025.12.001.
- [9] A. M. Silva, “Industry 5.0: Human-centric approach for future manufacturing systems,” *Future Stud. Res. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–15, 2023, doi: 10.24023/FutureJournal/2175-5825/2023.v15n1.p1-15.
- [10] T. de Jong, “Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought,” *Instr. Sci.*, vol. 38, pp. 105–134, 2010, doi: 10.1007/s11251-009-9110-0.
- [11] K. Bajkai-Tóth, J. Garamvölgyi, and I. Rudnák, “Elvárt és valós munkavállalói kompetenciák vizsgálata a köz- és versenyszférában,” *Vezetéstudomány / Budapest Manage. Rev.*, vol. 56, no. 1, pp. 2–13, 2025, doi: 10.14267/VEZTUD.2025.01.01.
- [12] A. Leles, L. Zaina, and J. R. Cardoso, “Challenge-Based Learning for Competency Development in Engineering Education, a Prisma-Based Systematic Literature Review,” *IEEE Trans. Educ.*, vol. 67, no. 5, pp. 746–760, Oct. 2024, doi: 10.1109/TE.2024.3417908.
- [13] MSZ ISO 31073:2024 Kockázatmenedzsment. Szakszótár, Magyar Szabványügyi Testület, 2024.
- [14] M. Ghobakhloo, H. A. Mahdiraji, M. Iranmanesh, and V. Jafari-Sadeghi, “From Industry 4.0 digital manufacturing to Industry 5.0 digital society: a roadmap toward human-centric, sustainable, and resilient production,” *Inf. Syst. Front.*, 2024, doi: 10.1007/s10796-024-10476-z.
- [15] G. N. Tóth, Á. Drégelyi-Kiss, “Autóipari beszállítói lánc kockázatelemzési szempontrendszere,” in *Proc. FMTÜ XIX. Int. Sci. Conf.*, Kolozsvár, Románia: Erdélyi Múzeum Egyesület, pp. 409–412, 2014, doi: 10.36243/fmtu-2014.095
- [16] K. Bajkai-Tóth, E. Szabó, I. Rudnák, and R. Magda, “The role of human resource in organizational performance in the automotive industry,” *Vadyba J. Manage.*, vol. 1, no. 37, pp. 45–52, 2021, doi: 10.38104/vadyba.2021.1.02
- [17] R. Adattila, P. Thorvald, and D. Romero, “Assessing the psychosocial impacts of Industry 4.0 technologies adoption in the Operator 4.0: Literature review & theoretical framework,” *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 15, no. 1, pp. 59–80, Mar. 2024, doi: 10.24867/IJIE-2024-1-348.
- [18] I. Gál, Z. Hima, A. Tick, “Az autóipari termelés kockázatainak csökkentése,” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 6, no. 1, pp. 27–40, 2024.

- [19] J. Hecklau, M. Galeitzke, S. Flachs, and H. Kohl, “Holistic approach for human resource management in Industry 4.0,” *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.102.
- [20] T. Filemon, S. Lubbe, and H. Mynhardt, “The assessment of risk management in human resources practices,” *Socio-Econ. Challenges*, vol. 8, no. 2, pp. 342–359, 2024, doi: 10.61093/sec.8(2).342-359.2024.
- [21] D. Romero, J. Stahre, M. Taisch, “The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future,” *Comput. Ind. Eng.*, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.106128.
- [22] A. Chauhan, M. V. Rani, “Resilient supply chains in the automotive industry: A risk prioritization framework for electric and traditional vehicles in Industry 4.0,” *Int. J. Product. Perform. Manage.*, vol. 75, no. 2, pp. 353–379, 2026, doi: 10.1108/IJPPM-03-2024-0123.
- [23] M. T. D. Ta, T. Kim, A. H. Gausdal, “Resilient leadership style and psychosocial safety climate in high-tech manufacturing,” *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 30, no. 2, pp. 353–369, 2022, doi: 10.1080/09617353.2022.2035627.
- [24] G. N. Tóth, Á. Drégelyi-Kiss, “Bridging skill gaps through STEM: HR risk management in higher education for Industry 4.0 and 5.0,” in *Proc. IEEE 24th World Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics (SAMI)*, 2026, doi: 10.1109/SAMI68106.2026.11420348.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF
IMPACT AND VOLCANIC CRATER
GEOSITES****IMPAKT ÉS VULKÁNI KRÁTER
GEOHELYSZÍNEK ÖSSZEHASONLÍTÓ
ELEMZÉSE**REZSABEK Nándor¹**Abstract**

In the publication, the author compares the conservation and presentation solutions of 2–2 geohistorically recent, cataclysmic impact (Morasko, Steinheim) and volcanic crater (Kerið, Monte Nuovo) geosites examined as case studies. The topic is made relevant by the current earthquake events in the Campi Flegrei volcanic area in Italy, as well as the growing demand for geotourism. In situ field surveys and secondary data collection, which examined the components of the 24-item criteria framework used, revealed that the basic technical and logistical infrastructure was in place at all 4 sites studied, regardless of their origin. At the same time, significant differences are evident in the areas of visitor management, museum and commercial services: the impact craters examined during the research show a much more advanced operating model than the craters of volcanoes. Good practices that can be developed by continuing scientific work may be effectively applied in the future development of other international and even Hungarian geosites.

Keywords

impact crater, volcanic crater, geosite, geotourism, visitor infrastructure, nature conservation

Absztrakt

A publikációban a szerző 2–2 esettanulmányyszerűen vizsgált földtörténeti újidejű, kataklizmikus keletkezésű impakt (Morasko, Steinheim) és vulkáni kráter (Kerið, Monte Nuovo) geohelyszín természetvédelmi és bemutatási megoldásait hasonlítja össze. A témát az olasz Campi Flegrei vulkáni terület aktuális földrengési eseményei, valamint a geoturizmus iránt növekvő igény teszi relevánssá. Az alkalmazott 24 elemes kritériumrendszer komponenseit vizsgáló in situ terepi bejárások és szekunder adatgyűjtések rávilágítottak, hogy az alapvető műszaki–logisztikai infrastruktúra mind a 4 vizsgált helyszínen biztosított, függetlenül a keletkezési eredettől. Ugyanakkor a látogatómenedzsment, valamint a múzeumi és kereskedelmi szolgáltatások terén jelentős eltérések mutatkoznak: a kutatás során vizsgált impakt kráterek jóval fejlettebb működtetési modellt mutatnak, mint a tűzhányók krátereit. A tudományos munka folytatásával kidolgozható jó gyakorlatok hatékonyan alkalmazhatók lehetnek más nemzetközi, sőt magyarországi geohelyszínek jövőbeli fejlesztésénél.

Kulcsszavak

impakt kráter, vulkáni kráter, geohelyszín, geoturizmus, látogatói infrastruktúra, természetvédelem

¹ rezsabek.nandor@stud.uni-nke.hu | ORCID: 0009-0002-4885-4438 | PhD student, Ludovika University of Public Service, Faculty of Military Sciences and Officer Training, Doctoral School of Military Engineering | PhD hallgató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola

INTRODUCTION

Scientific problem

On 31.08.2026, a 4.7 magnitude earthquake struck the Campi Flegrei volcanic field of the Italian Peninsula Volcanic Provinces [1]. The main and aftershocks caused personal injuries and significant building damage in the vicinity of Naples, in the Pozzuoli area [2]. The post-volcanic activity of the previous eruption centers of the caldera volcano, as well as the – unprofessional – designation “supervolcano” appearing in promotional literature, make the already popular southern Italian location a prominent geosite (geotope). Today's visitors do not want to see the dusty museum displays of igneous rocks and their minerals, but rather want to visit places close to nature, even extreme ones. The Campi Flegrei has now received considerable attention, even if this “promotion” is negative this time. However, visitor traffic may still increase in the medium term as a result.

In this regard, it is worth conducting a comparative analysis of the geosites of impact craters (meteorite craters, astroblemes) and volcanic craters (calderas) as a case study, examining their nature conservation aspects and operational solutions. Formations of volcanic origin are more numerous, and they can even serve as good practice in the case of the geosite development of the barely 200 meteorite craters on Earth. However, the opposite situation may also arise, since meteorite craters receive more attention due to their uniqueness, so the geosites of volcanic formations can “learn” from the solutions applied to formations of cosmic origin. The basis of the comparative analysis is the compliance with the criteria system introduced and published by the author in the case of the Morasko meteorite crater field in Poland [3].

The literature mainly deals with the topic from a tourism geography and nature conservation perspective [4]. In these, the cataclysmic origin of the objects is typically not the subject of the studies. From an organizational perspective, the UNESCO Global Geoparks Network, with its Geohazards working group [5], and the European Geoparks Network, with its “Volcanic Areas” Working Group [6], play a significant role. However, due to their large number and geopolitical reasons, their coverage does not cover all countries and geotopes.

The author of this article is working on the topic as a sub-research for his dissertation entitled *Impact of Extraterrestrial Objects and Management of its Consequences in Critical Infrastructures*, which is currently being developed in the research area of *Military environmental security* at the *Ludovika University of Public Service, Faculty of Military Sciences and Officer Training, Doctoral School of Military Engineering*, in the research topic of the *Relationship between the environment and security*.

Research hypotheses, goals, methods

Hypothesis 1 stated that we will encounter similar solutions in the nature protection and presentation of impact and volcanic craters of comparable geomorphological size range, formed by both recent geological and cataclysmic geological processes – as geotopes.

Hypothesis 2 stated that 2/3 of the applied criteria system assume identical values for the objects examined as case studies.

The specific aim of the research was the benchmarking of the geosites of the selected impact and volcanic formations. The general aim of the research was to contribute to later developments at the given sites, and in the case of further formations, to contribute to the future establishment of good practices.

The basis of the research method was the author’s previous and current field visits to the impact and volcanic craters selected as case studies 2–2. As primary data collection, textual information was collected on site and photo documentation was prepared. For each object, this was supplemented, as necessary, by collecting secondary data from maps, professional databases and professional articles. This was followed by the determination of the relevant parameters of a total of 4 objects based on the 24-item criteria list previously established by the author. The sub-research then concluded with a comparative analysis of these.

CONDUCTED STUDIES AND PARTIAL CONCLUSIONS

Selection of the examination sample

I included 2 meteorite craters formed during impact events and 2 volcanoes formed through volcanic processes in the study (Table 1). Of the impact craters, I chose the Polish Morasko and the German Steinheim astrobleme from the 3 closest to Hungary. Of the volcanoes, I analyzed 1–1 object each from Iceland (Kerið) and Italy (Monte Nuovo) from the 3 countries characterized by active volcanism in Europe.

Object name	Object country	Object type
Morasko	Poland	impact crater(s)
Steinheim	Germany	impact crater
Kerið	Iceland	impact crater
Monte Nuovo	Italy	impact crater

Table 1: 2–2 impact and volcanic craters included in the study, own editing, own compilation

An important criterion for the selection of the sample was that the formations of states whose economic and social development are significant in European and international comparison should become the subject of study. Thus, sufficient financial resources and cultural commitment are available for nature conservation, the preservation of such objects, and the “socialization” of their values through their presentation.

The presented image material is always divided into two parts. Firstly, it visualizes the characteristic geomorphological features of the formation itself. Secondly, the applied criteria system demonstrates 1-1 elements existing at the given location.

Presentation of the objects included in the study

Morasko (Poland) meteorite crater(s) - Morasko in Poland is a meteorite crater field. The crater field includes 7 impact craters. They were formed in the Holocene geological epoch, 5000 years ago. Their diameters are 20–90 m, and their depths are between 2.1–11.5 m. Administratively, it is part of Poznań. The geotope is named “Rezerwat Przyrody Meteoryt Morasko”.

The in situ field visit and data collection took place on 02.07.2018. The status of the examined parameters is given in Table 2; its images are in Figures 1–2.



Figure 1: A lake-filled impact crater in the Morasko crater field in Poland, own photo



Figure 2: European fallow deer in the forested area of the Morasko crater field, own photo

Steinheim (Germany) meteorite crater - Steinheim in Germany is a twin crater. Impact crater. It was formed in the Miocene geological epoch (concurrent with the neighboring Ries), 15 million years ago. Its diameter is 3.8 km, and its depth is between 110 m. Administratively, it is part of Steinheim am Albuch. The geotope is named “Geopark Schwäbische Alb”.

The in situ field visit and data collection took place on 27.06.2019. The status of the examined parameters is included in Table 2; its images are in Figures 3–4.



Figure 3: The Steinheim impact crater in Germany, own photo



Figure 4: Zoological finds in the Steinheim impact crater museum, own photo

Kerið (Iceland) volcanic crater - Kerið in Iceland is one of the volcanoes of the larger Grímsnes and the narrower Tjarnarhólar volcanic area. It is a collapsed cinder cone type volcano. It has been active since the Holocene geological epoch, its last eruption occurred 6500 years ago. There is a crater lake inside. Its diameter is 170–270 m, and its depth is 55 m. Administratively, it is part of Klausturhólar. The geotope is named “Kerið Volcanic Crater”.

The in situ field visit and data collection took place on 09.06.2023. The status of the examined parameters is included in Table 2; its images are in Figures 5–6.



Figure 5: The Kerið volcanic crater in Iceland, own photo



Figure 6: General information board about the Kerið volcanic crater, own photo

Monte Nuovo (Italy) volcanic crater - Monte Nuovo in Italy is one of the eruption centers of the Campi Flegrei volcanic field. It is a cinder cone type volcano. It has been active since the Holocene geological epoch, its last eruption (and formation) occurred in 1538. Its diameter is 420 m, its depth is 100–120 m. Administratively, it is part of Pozzuoli. The geotope is named “Oasi Naturalistica di Montenuovo”.

The in situ field visit and data collection took place on 09.07.2026. The status of the examined parameters is included in Table 2; its images are in Figures 7–8.



Figure 7: The Monte Nuovo volcanic crater in Italy, own photo



Figure 8: Service building promoting the cultural maintenance of the Monte Nuovo volcanic crater, own photo

Analysis and evaluation of data sources

I characterized the operational solutions aimed at protecting and presenting natural values at the given geosite – according to the previously developed 24-element methodology – by their status. The first column of Table 2 contains their names. Columns 2–5 indicate their presence/absence (“yes” / “no”).

Operational solutions aimed at protecting and presenting natural values at the geosite	Morasko	Steinheim	Kerið	Monte Nuovo
Legal designation	yes	yes	no	yes
Nature conservation guard service	no	yes	yes	no
Asphalted access road	yes	yes	yes	yes
Public transport	yes	yes	no	yes
Parking	yes	yes	yes	yes
Cultured toilets	yes	yes	no	no
Waste collectors	yes	yes	no	yes
Educational trail	yes	yes	no	yes
Educational trail stations	yes	yes	no	yes
Designated tourist routes	yes	yes	yes	yes
Viewpoints	yes	yes	yes	yes
General information boards	yes	yes	yes	yes
Information boards of specific attractions	yes	yes	no	yes
Geotope	yes	yes	yes	yes
Geological values	yes	yes	yes	yes
Hydrogeological values	yes	yes	yes	no
Zoological values	yes	yes	yes	no
Botanical values	yes	yes	no	yes
Historical memorial sites / cultural monuments	yes	yes	no	no
Cafe	no	yes	no	no

Gift shop	no	yes	no	no
Visitor centre	no	yes	no	no
Museum	no	yes	no	no
Crater trademark product	no	yes	no	no

Table 2: Status of operational solutions aimed at protecting and presenting natural values in the case of the 2–2 impact and volcanic craters included in the study, own compilation

The comparison based on the 24-item criteria shows that the development and scope of tourism and conservation services of the examined geosites show significant differences:

- **Outstanding development (Steinheim)** The Steinheim impact crater in Germany received a positive (“yes”) rating in all (24/24) of the examined criteria. It is the only one with the highest level of visitor reception and geotourism infrastructure, including a visitor center, museum, cafeteria, souvenir shop and branded products.
- **Strong basic services (Morasko)** Morasko in Poland also has a high level of development (19/24), has excellent infrastructure (toilets, waste collection, educational trail, information boards, cultural and historical monuments). However, specifically commercial and museum-type services (cafeteria, souvenir shop, visitor center) are still missing.
- **Common basic infrastructure** All 4 geosites have in common that the basic technical-logistical conditions (paved access road, parking lot), accessibility (designated tourist trails, viewpoints), basic information (general signs) and the geotopic/geological value itself are provided without exception.
- **Deficiencies in volcanic craters (Kerið and Monte Nuovo)** The 2 volcanic craters present a more incomplete picture from an infrastructure perspective. In the case of Kerið in Iceland (since its area is privately owned), there is no formal legal designation, public transport, toilets and a network of nature trails (although it has a ranger service). Monte Nuovo in Italy has legal protection and nature trails, but it lacks a nature conservation ranger service, toilets and a more complex visitor infrastructure.
- **Summary** While basic accessibility and geological presentation are provided everywhere, in the studied sample, impact craters (especially Steinheim) show a much more advanced operating model than the studied volcanic craters in terms of geotourism experience complexity. Furthermore, the structural divergence between impact and volcanic geosites can be attributed to differing institutional and financial management models. In the case of Kerið, private landownership enables direct ticket revenue generation, yet this income is predominantly channeled into physical site maintenance and safety rather than institutional geotourism infrastructure (such as educational centers or dedicated museum facilities). Conversely, sites integrated into regional geopark structures or municipal management frameworks (e.g., Steinheim and Morasko) demonstrate a higher capacity for long-term institutional funding, enabling the establishment of standardized educational networks, official protection status, and comprehensive site interpretation. This highlights that formal environmental protection does not automatically guarantee high-level visitor infrastructure; rather, integrated governance models are critical for multi-tiered geosite development.

CONCLUSION

Summary conclusions

The benchmarking analysis of the 4 objects (the Morasko impact craters in Poland and the Steinheim impact craters in Germany, and the Kerið volcanic craters in Iceland and the Monte Nuovo volcanic craters in Italy) based on a 24-item criteria system shed light on the patterns of nature conservation and operation practices of cataclysmic geotopes.

Hypothesis 1 was partially confirmed. Confirmed elements: There are indeed uniform solutions in the field of basic technical, logistical and presentation infrastructure. All 4 sites have an asphalt access road and parking lot, designated tourist trails, viewpoints and general information boards, and each site is a well-known geotope where the presentation of geoscience values is ensured. Different elements: However, the similarity stops at the level of basic infrastructure. In terms of the presence of a nature conservation guard service, the nature trail network, the toilet and waste collection capacities, and the complex visitor reception and museum facilities, the case study already shows significant structural differences between the 2 formation types.

Hypothesis 2 was not confirmed. The 2/3 (66.7%) expectation assumed that all 4 examined objects would take the same value (“yes” or “no”) for at least 16 of the 24 examination aspects. The analysis showed that only 7 criteria (29.2%) of the 24-element matrix achieved complete agreement at all 4 geosites (access road, parking lot, tourist trails, viewpoints, general information boards, geotopic status, geological values). For the remaining 17 aspects (70.8%), the individual geosites showed different statuses, as the development levels were significantly dispersed: Steinheim 100% (24/24), Morasko 79.2% (19/24), Monte Nuovo 54.2% (13/24), while Kerið 41.7% (10/24).

The results show that it is not the more numerous and well-known volcanic craters that have a more developed nature conservation and tourism infrastructure. Based on the sample examined, it is the more unique impact craters (especially Steinheim and Morasko) that show a more complex operating model and a higher level of geotourism development.

The refutation of Hypothesis 2 underscores the structural heterogeneity of European geotopes regardless of their genetic classification. While geomorphological scale and cataclysmic origin are comparable, management intensity is governed primarily by local socio-economic drivers, accessibility to regional tourism flows, and administrative priorities. The surprisingly advanced status of impact craters reveals that their spatial rarity acts as a catalyst for targeted scientific interest and municipal branding, resulting in superior educational and museum facilities. In contrast, volcanic craters – frequently treated as conventional landscape elements or mass-tourism transit points – often lack comprehensive interpretation frameworks unless strictly embedded within active Geopark management systems. Consequently, volcanic geosites require a strategic shift toward integrated visitor management tools, structured zoning, and interactive site interpretation to fully leverage their educational potential.

Further possible directions of the research, practical applicability of the results

A further possible direction of the research is to expand the number of the study sample by significantly increasing the current – case study – number of 2-2 objects. In addition to European destinations, craters from other continents can be included in the sampling and analysis. Furthermore, we should not forget about the solutions applied to the ruin volcanoes of the Hungarian volcanic areas that are of particular importance from a touristic

and geographical point of view (e.g. Bakony–Balaton Geopark / Bakony–Balaton-felvidéki volcanic area / Hegyestű).

The practical applicability of the results assumes that we can gain a much more complete picture of the solutions for the preservation of the 2 types of formations. The data that can be extracted can serve as good practice for tourism developments and the implementation of nature and environmental protection goals in the case of additional geotopes in the given country or in other countries. They can also point out possible elements of the formations already included in the study that need to be developed.

Refining the applied criteria system would enable even more precise data collection and more sophisticated analysis. Accordingly, it is worth moving in this direction in future research. Methodologically, future iterations of this study should transition from a binary (“yes” / “no”) evaluation matrix toward a weighted, multi-criteria analysis. Assigning quantitative weights to critical parameters – such as carrying capacity, environmental vulnerability, and digital interpretation tools (e.g., QR-code trails, augmented reality) – will yield a more nuanced geosite assessment index. Ultimately, this benchmark system serves as a practical decision-support tool for protected area managers, land-use planners, and geotourism policy makers aiming to balance geoconservation with sustainable visitor capacity.

REFERENCES

- [1] “Sciame sismico ai Campi Flegrei: comunicato di aggiornamento del 1 agosto 2026,” 01 08 2026. [Online]. Available: <https://ingvterremoti.com/2026/08/01/sciame-sismico-ai-campi-flegrei-comunicato-di-aggiornamento-del-1-agosto-2026/>. [Accessed 03 08 2026].
- [2] G. Barbati, “Earthquake strikes volcanic area near Naples, injuring 21 people and causing ex-tensive damage,” 31 07 2026. [Online]. Available: <https://www.euronews.com/my-europe/2026/07/31/strongest-earthquake-in-years-strikes-volcanic-area-near-naples-injuring-four>. [Accessed 03 08 2026].
- [3] “Geohazards working group,” [Online]. Available: <https://www.globalgeoparksnetwork.org/geohazards-working-group>. [Accessed 12 08 2026].
- [4] “Working Groups,” [Online]. Available: https://www.europeangeoparks.org/?page_id=8658. [Accessed 12 08 2026].
- [5] N. Rezsabek, “Nature conservation solutions and implementation possibilities of the Morasko meteorite crater field in Poland,” *American Journal of Research Education and Development (RED)*, no. 2, pp. 26-36, 2026.
- [6] L. Laslaz, “The Crater, The Geyser and The Waterfall. Environmental protection and tourism at three of Iceland’s „Golden Circle” sites (Kerið, Geysir, Gullfoss),” *Via Tourism Review*, no. 24, 2023.

**SAFETY ISSUES OF AI-BASED
ENGINEERING ASSISTANCE IN
HUMAN-ROBOT INTERACTION****AZ MI-ALAPÚ MÉRNÖKI ASSZISZTENCIA
BIZTONSÁGI KÉRDÉSEI AZ
EMBER-ROBOT INTERAKCIÓBAN**BURAI István György¹ – KOLLÁR Csaba²**Abstract**

Artificial intelligence is playing an increasingly important role in engineering decision support, while robotic systems used in industrial and educational environments remain safety-critical and fundamentally deterministic. This paper examines the safety issues raised by AI-based engineering assistance in human-robot interaction. Its main assumption is that risk does not emerge only at the level of direct physical human-robot contact, but may also arise earlier in the decision-preparation phase, when the user relies on AI-generated suggestions. The study analyses the role of AI as an engineering assistant, with particular attention to autonomy boundaries, human supervision, and validation. It identifies the main indirect risk factors, including overreliance, insufficient verification, and lack of user competence. The paper concludes that the safe application of AI can only be ensured through mandatory human validation.

Keywords

artificial intelligence, human-robot interaction, engineering assistance, safety, human supervision

Absztrakt

A mesterséges intelligencia egyre nagyobb szerepet kap a mérnöki döntéstámogatásban, miközben az ipari és oktatási környezetben alkalmazott robotizált rendszerek működése továbbra is biztonságkritikus és alapvetően determinisztikus jellegű. A tanulmány azt vizsgálja, hogy az MI-alapú mérnöki asszisztencia milyen biztonsági kérdéseket vet fel az ember-robot interakcióban. Kiindulópontja, hogy a kockázat nemcsak a fizikai ember-robot kapcsolat szintjén jelenhet meg, hanem már a döntéselőkészítés során is, amikor a felhasználó MI által generált javaslatokra támaszkodik. A cikk elemzi az MI mint mérnöki asszisztens szerepét, különös tekintettel az autonómiahatárookra, az emberi felügyeletre és a validációra. Azonosítja a főbb közvetett kockázati tényezőket, így a túlzott bizalmat, a hiányos ellenőrzést és a kompetenciahiányt. Következtetések alapján az MI biztonságos alkalmazása csak kötelező emberi validáció mellett értelmezhető.

Kulcsszavak

mesterséges intelligencia, ember-robot interakció, mérnöki asszisztencia, biztonság, emberi felügyelet

¹ burai.istvan@bkgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0007-8988-6301 | Assistant Lecturer, Óbuda University, Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering | Tanársegéd, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

² kollar.csaba@uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-0981-2385 | senior research fellow and leader, Óbuda University Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering Artificial Intelligence Workshop | tudományos főmunkatárs és vezető, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mesterséges Intelligencia Műhely

BEVEZETÉS

A mesterséges intelligencia alkalmazása az utóbbi években a mérnöki tervezési, döntéstámogatási és oktatási folyamatokban is egyre hangsúlyosabbá vált. Az MI-alapú rendszerek már nem csupán információkeresési vagy adminisztratív feladatokban jelennek meg, hanem egyre gyakrabban nyújtanak szakmai jellegű javaslatokat technológiai, programozási vagy elemzési kérdésekben is. Ezzel párhuzamosan az ipari környezetben működő robotizált rendszerek továbbra is olyan biztonságkritikus technikai rendszereknek tekinthetők, amelyek esetében a hibás döntések vagy a nem megfelelően validált beavatkozások közvetlen fizikai kockázatot is eredményezhetnek [1].

Az ember-robot interakció biztonsági vizsgálata hagyományosan a fizikai együttműködés, a védelmi megoldások és a működés közbeni kockázatok oldaláról történik [2]. A mesterséges intelligencia megjelenésével azonban a biztonsági kérdések egy része már nem kizárólag a közvetlen ember-gép kapcsolat szintjén értelmezhető, hanem a döntés-előkészítés és a rendszerhasználat korábbi szakaszaiban is. Amennyiben a felhasználó egy MI-rendszert mérnöki asszisztensként alkalmaz, a hibás, félreértelmezett vagy nem megfelelően ellenőrzött javaslatok olyan döntésekhez vezethetnek, amelyek később a robotizált rendszer működésében biztonsági következményekkel járhatnak [3].

A tanulmány célja annak elemzése, hogy az MI-alapú mérnöki asszisztencia milyen közvetett biztonsági kockázatokat hordoz az ember-robot interakcióban, különös tekintettel az autonómiahatárok, az emberi felügyelet és a validáció szerepére. A vizsgálat nem az MI közvetlen robotvezérlési alkalmazásaira koncentrál, hanem arra a helyzetre, amikor a mesterséges intelligencia döntéstámogató vagy javaslatadó funkcióban jelenik meg, miközben a végrehajtás determinisztikus, biztonságkritikus rendszerben történik. A tanulmány emellett olyan értelmezési keret felvázolására törekszik, amely az oktatási és ipari környezetben egyaránt segítheti az MI biztonságos és felelősségteljes alkalmazásának megítélését.

AZ EMBER-ROBOT INTERAKCIÓ BIZTONSÁGI ÉRTELMEZÉSE IPARI KÖRNYEZETBEN

Az ember-robot interakció biztonsági értelmezése az ipari környezetben alapvetően abból indul ki, hogy az ember és a gépi rendszer közös működési térben, egymás tevékenységére közvetlen vagy közvetett módon hatva vesz részt a munkafolyamatban. A biztonság ebben az összefüggésben nem kizárólag a fizikai érintkezés elkerülését jelenti, hanem minden olyan műszaki, szervezési és emberi tényező együttes kezelését is, amely a működés során veszélyhelyzet kialakulásához vezethet. Ipari környezetben ez különösen fontos, mivel a robotizált rendszerek nagy mozgási energiával, előre programozott működési logikával és a kezelő által csak részben átlátható belső folyamatokkal rendelkezhetnek [4].

Az ipari ember-robot interakció biztonsági értelmezése ugyanakkor nem merül ki a fizikai elkülönítés, az ütközéselkerülés vagy a védelmi funkciók vizsgálatában. A rendszer biztonsági teljesítményét azok a döntések is befolyásolják, amelyek a fizikai végrehajtást megelőző tervezési, programozási és üzemeltetési szakaszokban születnek. Ebben a tágabb megközelítésben a veszélyforrások egy része nem közvetlenül a robot mozgásából ered, hanem abból, hogy a kezelő vagy a technológiai döntéshozó milyen információkat fogad el, hogyan értelmezi azokat, és milyen mértékben támaszkodik külső döntéstámogató rendszerre. Az MI megjelenésével ezért az ember-robot interakció biztonsági vizsgálata

kiterjeszhető a döntési lánc korábbi szakaszaira is, ahol a hibás információ vagy a nem megfelelő validáció még a végrehajtás előtt létrehozhatja a későbbi veszélyhelyzet felteleteit [3], [4].

A hagyományos ipari biztonsági megközelítés az ember-robot interakció során elsősorban a fizikai veszélyforrásokra koncentrál, így például az ütközésre, a beszorulásra, a nem várt mozgásokra vagy az elégtelen leválasztásból eredő kockázatokra. Ezek kezelése tipikusan műszaki védelmi megoldásokkal, érzékelőkkel, biztonsági logikákkal, elhatárolással és szabályozott üzemmódokkal történik [5]. Ugyanakkor a biztonság tényleges szintjét nem kizárólag a berendezés fizikai kialakítása határozza meg, hanem az is, hogy a kezelő, a programozó vagy a technológiai döntéshozó milyen információk alapján avatkozik be a rendszer működésébe.

Az ember szerepe ezért az ipari ember-robot interakcióban nem csupán a közvetlen kezelésre vagy felügyeletre korlátozódik, hanem kiterjed a rendszer értelmezésére, a működési feltételek megadására és a beavatkozási döntések meghozatalára is [6]. Ebből következően a biztonság kérdése nem választható el attól a döntési lánctól sem, amely a fizikai végrehajtást megelőzi. Ha a rendszerrel kapcsolatos emberi döntések hibás információra, hiányos ellenőrzésre vagy félreértelmezett javaslatokra épülnek, akkor a kockázat már a tényleges ember-robot kontaktus előtt kialakulhat [3].

AZ MI MINT MÉRNÖKI ASSZISZTENS AZ EMBER-ROBOT INTERAKCIÓ BIZTONSÁGI KONTEXTUSÁBAN

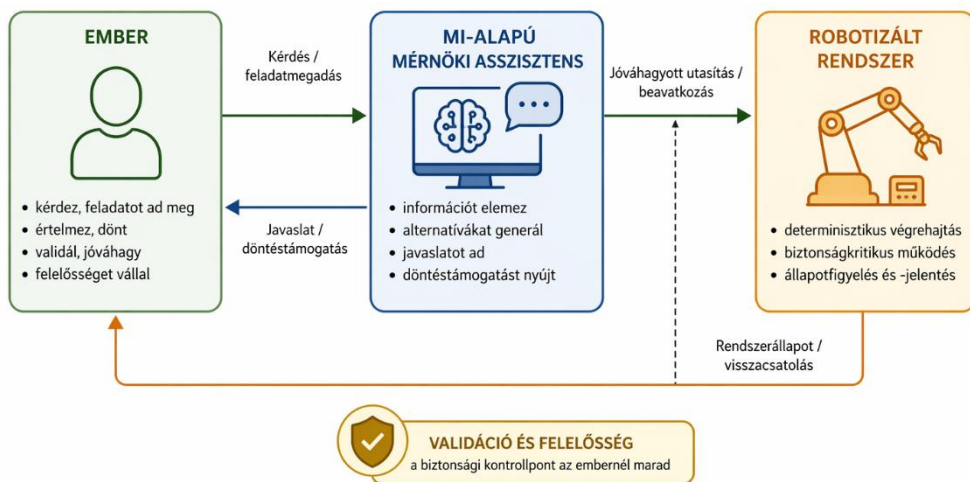
A mesterséges intelligencia mérnöki környezetben egyre gyakrabban jelenik meg asszisztív szerepkörben, ahol elsődleges feladata nem a közvetlen végrehajtás, hanem az információfeldolgozás, a javaslatadás és a döntéstámogatás [7]. Ilyen felhasználási helyzet lehet például a technológiai tervezés, a programozási feladatok előkészítése, a hibakeresés, a dokumentációk értelmezése vagy az oktatási célú szakmai támogatás. Ebben a megközelítésben az MI nem autonóm irányító rendszerként, hanem a felhasználó munkáját segítő mérnöki asszisztensként értelmezhető.

Ez a szerepkör lényegesen különbözik azoktól az alkalmazási esetektől, amelyekben a mesterséges intelligencia közvetlenül avatkozik be a gépi működésbe vagy autonóm szabályozási funkciót lát el. A vizsgált esetben az MI kimenete javaslatként jelenik meg, amely önmagában még nem eredményez fizikai beavatkozást, ugyanakkor befolyásolhatja a felhasználó döntését. Ebből következően a biztonsági kérdés nem pusztán az MI technikai megbízhatóságára vezethető vissza, hanem arra is, hogy a felhasználó miként értelmezi, ellenőrzi és alkalmazza az általa kapott információt.

Az MI-alapú mérnöki asszisztencia sajátossága, hogy működése nem azonos a klasszikus, előre meghatározott szabályok szerint működő automatizált rendszerekével. A generatív MI válaszai valószínűségi alapon jönnek létre, ezért ugyanazon vagy hasonló feladatmegadás mellett is előfordulhat eltérő tartalmú javaslat, hiányos indoklás vagy szakmailag pontatlan megoldás. Ez különösen jelentős olyan mérnöki környezetben, ahol a döntés később determinisztikus végrehajtórendszerben realizálódik. A két működési logika közötti eltérés miatt az MI kimenete nem kezelhető közvetlenül végrehajtható utasításként, hanem olyan előzetes információként vagy alternatívaként, amelynek alkalmazhatóságát a felhasználónak műszaki és biztonsági szempontból is ellenőriznie kell. Ebben az értelemben az autonómiahatár nem kizárólag technikai korlátozást jelent, hanem azt a döntési pontot is

kijelöli, ahol az MI támogatási szerepe megszűnik, és az emberi szakmai felelősség válik meghatározóvá [7].

Különösen fontos ez olyan esetekben, ahol a végrehajtás determinisztikus, biztonságkritikus rendszerben történik. Az ipari robotokhoz, CNC-rendszerekhez vagy egyéb automatizált berendezésekhez kapcsolódó mérnöki döntések esetében a hibás vagy nem megfelelően validált javaslatok következményei a fizikai működés szintjén jelenhetnek meg. Ezért az MI mérnöki asszisztensként történő alkalmazása csak akkor tekinthető biztonságosan értelmezhetőnek, ha világosan kijelölhetők azok a határok, ahol a javaslatadás véget ér, és ahol az emberi ellenőrzésnek, jóváhagyásnak és felelősségvállalásnak kell elsődlegessé válnia [8]. A vizsgált kapcsolatrendszer az 1. ábra szemlélteti, amely az ember, az MI-alapú mérnöki asszisztens és a robotizált rendszer közötti funkcionális kapcsolatokat, valamint a validáció és a felelősség helyét mutatja be.



1. ábra: Az ember, az MI-alapú mérnöki asszisztens és a robotizált rendszer kapcsolati modellje

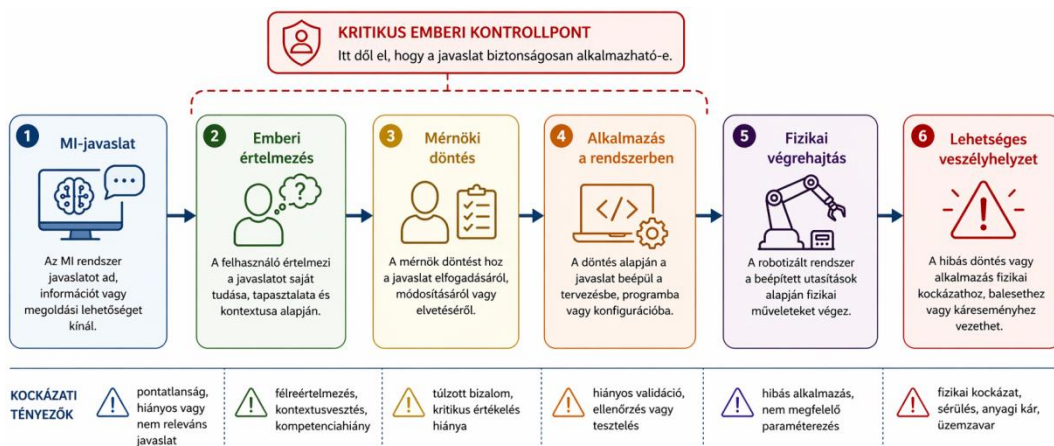
AZ AUTONÓMIAHATÁROK ÉS A KÖZVETETT BIZTONSÁGI KOCKÁZATOK KÉRDÉSE

Az MI-alapú mérnöki asszisztencia biztonsági értékelésének egyik kulcskérdése az autonómiahatárok egyértelmű kijelölése. Biztonsági szempontból alapvető különbség van aközött, hogy a mesterséges intelligencia információt rendszerez, javaslatot fogalmaz meg vagy döntést készít elő, illetve aközött, hogy közvetlenül befolyásolja a fizikai végrehajtást. Minél közelebb kerül az MI szerepe a végrehajtási szinthez, annál nagyobb jelentőséget kap annak meghatározása, hogy mely döntési pontokon marad meg a kötelező emberi felügyelet és validáció [9].

A közvetett biztonsági kockázatok abból erednek, hogy az MI által generált tartalom nem közvetlen gépmozgás formájában jelenik meg, hanem emberi döntéssel keresztül épül be a rendszer működésébe [3]. Ilyen kockázati tényező lehet a túlzott bizalom, amikor a felhasználó az MI-választ kellő ellenőrzés nélkül fogadja el, a kompetenciahiány, amikor nem képes annak műszaki értékelésére, valamint a hiányos validáció, amikor a javaslat alkalmazása előtt nem történik meg a szükséges szakmai ellenőrzés. Ezekben az esetekben a

hiba nem az MI önálló fizikai cselekvéséből, hanem az ember és az MI közötti döntési kapcsolat elégtelen kontrolljából fakad.

A közvetett kockázatok kezelése ezért olyan ellenőrzési pontok kialakítását igényli, amelyek még a fizikai végrehajtás előtt képesek megszakítani a hibás döntési láncot. Ilyen kontrollpont lehet például a műszaki paraméterek szakmai felülvizsgálata, a biztonsági feltételek ellenőrzése, a végrehajthatóság vizsgálata vagy egy kritikus döntés második személy általi jóváhagyása. Az ellenőrzés szükséges mélysége az adott feladat kockázati szintjéhez igazítható: míg egy alacsony következményű információs javaslat esetében elegendő lehet a felhasználói értékelés, addig egy fizikai végrehajtást befolyásoló mérnöki döntésnél indokolt lehet több, egymásra épülő kontroll alkalmazása. Ebből következően az MI biztonságos integrációja nem egyetlen ellenőrzési lépéshez, hanem egy rétegzett felügyeleti struktúrához kapcsolható, amelyben a kritikus döntési pontokon az emberi szakértelem és jóváhagyás elsődleges marad [3], [8]. A közvetett biztonsági kockázatok kialakulásának logikáját a 2. ábra foglalja össze, amely az MI-javaslattól a fizikai veszélyhelyzetig vezető döntési és végrehajtási láncot szemlélteti.



2. ábra: Kockázatlánc az MI-javaslattól a fizikai veszélyhelyzet kialakulásáig

Az autonómiahatárok kijelölése ezért nem csupán technikai, hanem felelősségi kérdés is. Biztonságkritikus környezetben egyértelműen rögzíteni kell, hogy mely feladatok maradhatnak az MI támogatási körében, és mely pontokon nem kerülhet meg az emberi döntés. Az ilyen határok hiánya könnyen ahhoz vezethet, hogy a felhasználó a javaslatot implicit módon hitelesnek vagy közvetlenül alkalmazhatónak tekinti, ami növeli a hibás alkalmazás és ezen keresztül a fizikai veszélyhelyzet kialakulásának valószínűségét.

OKTATÁSI ÉS IPARI KÖVETKEZMÉNYEK

Az MI-alapú mérnöki asszisztencia terjedése az oktatási és ipari környezetben egyaránt új biztonsági elvárásokat vet fel. Ipari oldalon ez azt jelenti, hogy a technológiai döntések előkészítése során nem elegendő az MI által adott javaslatok hasznosságát vizsgálni, hanem azok ellenőrizhetőségét, alkalmazhatóságát és biztonsági következményeit is értékelni kell. Oktatási oldalon pedig az válik hangsúlyossá, hogy a hallgatók ne pusztán az MI

használatát sajátítsák el, hanem annak korlátait, bizonytalanságait és a szükséges emberi validáció szerepét is megértse.

Az oktatási környezet ebből a szempontból különösen alkalmas arra, hogy az MI alkalmazásához kapcsolódó szakmai ellenőrzési kompetenciák kontrollált módon fejleszthetők legyenek. A hallgatók számára nem elegendő annak megtanulása, hogy miként kérdezzenek egy MI-rendszertől vagy hogyan használják fel az általa generált javaslatokat, hanem szükség van arra is, hogy felismerjék a válaszok korlátait, ellenőrizzék azok szakmai megalapozottságát és azonosítsák a biztonsági szempontból kritikus elemeket. Ez különösen fontos olyan mérnöki feladatok esetében, ahol a hibás döntés később közvetlenül fizikai végrehajtásban jelenik meg. A strukturált felülvizsgálati eljárások ezért nemcsak ellenőrzési eszközként, hanem fejlesztendő mérnöki kompetenciaként is értelmezhetők. Az ilyen megközelítés hozzájárulhat ahhoz, hogy az MI használata ne a szakmai kontroll csökkenését, hanem a tudatosabb döntéshozatalt támogassa [3], [7].

Az oktatás ebben a megközelítésben nem csupán ismeretátadási közeg, hanem kontrollált validációs tér is lehet, ahol a jövő mérnökei biztonságos körülmények között tanulhatják meg az MI-válaszok szakmai értelmezését és ellenőrzését. Ez különösen fontos olyan területeken, ahol a döntések később determinisztikus, fizikai végrehajtórendszerekben hasznosulnak. Ilyen esetekben a képzés egyik lényeges feladata az, hogy a hallgató felismerje: az MI által adott válasz nem tekinthető önmagában validált műszaki megoldásnak, hanem csak olyan kiindulási pontnak, amelyet szakmai és biztonsági szempontból egyaránt validálni kell.

Ipari környezetben mindez azt is jelenti, hogy az MI alkalmazását nem önálló technológiai megoldásként, hanem szabályozott emberi felügyelet mellett működő támogatási eszközként célszerű értelmezni. A biztonságos felhasználás feltétele, hogy a döntési felelősség ne mosódjon el az ember és a rendszer között, továbbá hogy egyértelműen meghatározhatók legyenek azok az ellenőrzési pontok, ahol a javaslatok műszaki és biztonsági szempontú felülvizsgálata megtörténik. Ennek hiányában az MI nem a biztonságot támogató, hanem a bizonytalanságot növelő tényezővé válhat [8].

KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány rámutatott arra, hogy az MI-alapú mérnöki asszisztencia biztonsági értelmezése az ember-robot interakcióban nem korlátozható a közvetlen fizikai kapcsolat vizsgálatára. A kockázatok egy része már a döntés-előkészítés szintjén megjelenhet, amikor a felhasználó a mesterséges intelligencia által generált javaslatokra támaszkodik. Emiatt a biztonság kérdése szorosan összekapcsolódik az autonómiahatárok kijelölésével, az emberi felügyelet fenntartásával és a validáció következetes érvényesítésével.

A vizsgálat alapján megállapítható, hogy a mesterséges intelligencia mérnöki asszisztensként való alkalmazása csak akkor tekinthető biztonságosan értelmezhetőnek, ha szerepe világosan elhatárolható a fizikai végrehajtástól, és a döntési felelősség egyértelműen az embernél marad. Ez különösen fontos olyan determinisztikus és biztonságkritikus rendszerek esetében, ahol a hibás vagy ellenőrizetlenül átvett javaslatok közvetett módon is fizikai veszélyhelyzethez vezethetnek. Az oktatási és ipari környezet közös feladata ezért az, hogy ne csupán az MI alkalmazását, hanem annak biztonság tudatos és kritikusan ellenőrzött alkalmazását is előtérbe helyezze.

A jelen tanulmány koncepcionális és elemző megközelítésben vizsgálta az MI-alapú mérnöki asszisztencia biztonsági kérdéseit az ember-robot interakció összefüggésében. A további kutatások célja egy olyan empirikus vizsgálati keret kialakítása, amely a CNC technológiai tervezés kontextusában elemzi az MI használatából eredő döntési és validációs kockázatokat. Ennek első lépéseként jelenleg előkészítés alatt áll egy kvalitatív, exploratív vizsgálat, amely az MI által generált megoldások hibáinak típusait, valamint a felhasználói validáció jellemző mintázatait kívánja feltárni. Ezt követően egy kvantitatív kutatás hasonlíthatja össze az MI nélküli, az MI-t használó, valamint a strukturált validációs protokoll mellett dolgozó csoportok teljesítményét. A tervezett kutatási irány hozzájárulhat annak pontosabb megértéséhez, hogy az MI milyen módon befolyásolja a döntéshozatalt, a hibafelismerést és a biztonságkritikus környezetekben szükséges emberi ellenőrzést.

A CNC-programozás oktatásában mindez az oktatási hangsúly részleges átrendeződését is indokolhatja. A programkód önálló előállítás mellett egyre nagyobb szerepet kaphat az MI által generált megoldások értelmezése, a hibák felismerése, a technológiai döntések indoklása és a végrehajtás előtti szakmai ellenőrzés. Ez az oktatói felkészülést is módosíthatja, mivel az előadások és gyakorlatok tervezése során célszerű olyan feladatokat kialakítani, amelyek nemcsak a helyes megoldás elkészítését, hanem annak kritikai értékelését és biztonságos alkalmazhatóságának megítélését is fejlesztik. Ez a megközelítés a tervezett kvalitatív esettanulmányban is vizsgálható, különös tekintettel arra, hogy a hallgatók milyen hibákat ismernek fel az MI által generált megoldásokban, és milyen ellenőrzési stratégiákat alkalmaznak azok értékelése során.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] National Institute for Occupational Safety and Health, “Robotics in the Workplace: An Overview,” Centers for Disease Control and Prevention, 2024.
- [2] ISO, ISO 10218-1:2025 Robotics — Safety requirements — Part 1: Industrial robots, Geneva: International Organization for Standardization, 2025.
- [3] E. Tabassi et al., Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0), NIST AI 100-1, National Institute of Standards and Technology, 2023, doi: 10.6028/NIST.AI.100-1.
- [4] ISO, ISO 10218-2:2025 Robotics — Safety requirements — Part 2: Industrial robot applications and robot cells, Geneva: International Organization for Standardization, 2025.
- [5] ISO, ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices — Collaborative robots, Geneva: International Organization for Standardization, 2016.
- [6] Cs. Kollár, „Szerethetők-e a robotok? Az ember-robot interakció humán oldalának teoretikus aspektusa,” *Hadtudomány*, vol. 26, különszám, pp. 142–154, 2016, doi: 10.17047/HADTUD.2016.26.K.142.
- [7] C. Autio et al., Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile, NIST AI 600-1, National Institute of Standards and Technology, 2024, doi: 10.6028/NIST.AI.600-1.
- [8] Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU)

2020/1828 (Artificial Intelligence Act), Official Journal of the European Union, L 1689, 12 Jul. 2024.

- [9] A. Holzinger, K. Zatloukal, and H. Müller, “Is human oversight to AI systems still possible?,” *New Biotechnology*, vol. 85, pp. 59–62, 2025.

**NEW OPPORTUNITIES IN
OCCUPATIONAL ACCIDENT DATA
PROCESSING: INVESTIGATING THE
PREREQUISITES FOR AI-BASED SUPPORT
(PART TWO)****A MUNKABALESETI
ADATFELDOLGOZÁS ÚJ
LEHETŐSÉGEI: AI-TÁMOGATÁS
ELŐFELTÉTELEINEK VIZSGÁLATA
(MÁSODIK RÉSZ)¹**HERÉNYI Zoltán²**Abstract**

The assessment of a serious or fatal occupational accident is often largely determined by the official investigation conducted immediately after the event. However, time pressure, emotional strain, and missing information may increase interpretive uncertainty. A decision-support system could help inspectors perform more consistent and comprehensive assessments by transforming previous accident experience into a machine-processable representation. Earlier research demonstrated that occupational accident case studies can be represented in a structured and quantifiable form using the Methodological Guide for the Regulatory Investigation of Occupational Accidents. Building on this framework, the present study examines whether relations between the recorded investigation criteria can reveal information only partially or implicitly represented in conventional coding.

Keywords

occupational accident, relational analysis, decision support, occupational safety awareness, artificial intelligence, accident factors

Absztrakt

Egy súlyos vagy halálos munkabaleset megítélését nagyrészt a közvetlenül az esemény után lefolytatott hatósági vizsgálat határozza meg. Az időnyomás, az érzelmi megterhelés és a hiányos információk azonban növelhetik az értelmezési bizonytalanságot. Egy döntéstámogató rendszer a korábbi baleseti tapasztalatok gépi feldolgozásra alkalmas reprezentációjával következetesebb és teljesebb értékelésben támogatná a felügyelőket. A kutatás korábbi szakasza igazolta, hogy a munkabaleseti esettanulmányok a „Módszertani útmutató a munkabalesetek hatósági vizsgálatához” alapján strukturált és számszerűsíthető formában reprezentálhatók. Erre építve a jelen tanulmány azt vizsgálja, hogy a rögzített szempontok közötti relációk feltárhatnak-e a hagyományos kódolásban csak részben vagy rejtetten megjelenő információkat.

Kulcsszavak

munkabaleset, relációelemzés, döntéstámogatás, munkavédelmi tudatosság, mesterséges intelligencia, baleseti tényezők

¹ A tanulmány első része a Biztonságtudományi Szemle 2025. évi VII. évfolyamának 3. számában olvasható.

² zoltan.herenyi@gmail.com | ORCID: 0009-0000-2583-7104 | PhD student, Doctoral School of Safety and Security Sciences, Óbuda University | doktorandusz, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Óbudai Egyetem

BEVEZETÉS

Az európai uniós országok munkavédelmi működésének alapját keretirányelvek határozzák meg [1], [2]. Ezek a dokumentumok az alapvető munkavédelmi normákat rögzítik, ugyanakkor lehetőséget adnak arra, hogy az egyes tagállamok saját munkavédelmi stratégiáikat a nemzeti sajátosságokhoz és a hatósági visszacsatolásokhoz igazítsák. Ahhoz azonban, hogy ezek a visszajelzések a jogalkotás és a megelőzés számára valóban hasznosíthatók legyenek, az ellenőrzésekből és balesetkivizsgálásokból származó információknak egy-egy, következetes és minél kisebb mértékben torzított formában kell megjelenniük.

Magyarországon az egységes ellenőrzési és balesetkivizsgálási gyakorlat támogatására több módszertani dokumentum is készült. Ezek közül kiemelt jelentőségű a Nemzetgazdasági Minisztérium, az Országos Munkavédelmi és Munkaügyi Főfelügyelőség, valamint a Munkavédelmi Kutatóintézet közreműködésével kidolgozott Módszertani útmutató a munkabalesetek hatósági vizsgálatához című dokumentum. Az útmutató létrehozása a GINOP-5.3.4-16-2016-00001 projekt keretében megvalósuló, munkabaleseti vizsgálati módszertan megújítását célzó folyamatba illeszkedett [3]. A dokumentum részletesen rögzíti, hogy a munkabalesetek hatósági vizsgálata során milyen eljárási logikát és vizsgálati szempontokat szükséges követni.

A módszertani keret meglelte önmagában azonban nem zárja ki a balesetkivizsgálások során jelentkező szakmai és értelmezési bizonytalanságokat. A súlyos vagy halálos munkabalesetek vizsgálata gyakran időnyomás alatt, érzelmileg és pszichésen megterhelő környezetben zajlik, miközben a felügyelőnek számos személyi, tárgyi, szervezési, környezeti és dokumentációs tényezőt kell mérlegelnie. Ilyen körülmények között különösen fontosá válik, hogy a vizsgálati szempontok ne csupán különálló ellenőrzési elemekként, hanem egymással kapcsolatban álló, értelmezhető információs rendszerként is kezelhetők legyenek.

A mesterséges intelligenciával támogatott döntéstámogató rendszerek fejlesztése ebben az összefüggésben új lehetőségeket kínálhat. A szakirodalom alapján az ember és a mesterséges intelligencia együttműködésére épülő megközelítések különösen akkor lehetnek eredményesek, ha a gépi rendszer nem helyettesíteni, hanem strukturált adatokkal és következtetési lehetőségekkel támogatni kívánja az emberi döntéshozatalt [4]. A munkabaleseti kivizsgálások területén ez csak akkor valósítható meg, ha a felügyelői tudás és az esettanulmányokban megjelenő szakmai megállapítások gépi feldolgozásra alkalmas formába rendezhetők. Ebben az értelemben a módszertani útmutató nemcsak eljárási segédletként, hanem egy későbbi döntéstámogató rendszer strukturált tudásbázisának kiindulópontjaként is értelmezhető [5]. A jelen tanulmány a kutatás első részében kialakított, munkabaleseti esettanulmányokra alkalmazott strukturált vizsgálati keretrendszer továbbvizsgálatára épül. Az első rész igazolta, hogy a módszertani útmutató szempontjai alapján a munkabaleseti esettanulmányok jelentős része számszerűsíthető formában reprezentálható; a jelen vizsgálat ennek folytatásaként már nem az alapvető strukturálhatóságot, hanem a rögzített szempontok közötti relációkat, eltéréseket és rejtett összefüggéseket helyezi előtérbe. A vizsgálat külön figyelmet fordít a balesetek közvetlen kiváltó okai, a feltárt szabálytalanságok és a balesethez vezető tényezők közötti eltérésekre, mivel ezek az eltérések fontos információt hordozhatnak a szempontrendszer alkalmazhatóságáról, korlátairól, redundanciáiról és továbbfejlesztési lehetőségeiről.

A kutatás főbb kérdései

K1. Milyen relációk tárhatók fel a strukturált munkabaleseti vizsgálati rendszer egyes szempontjai között, különösen a közvetlen baleseti okok, a feltárt szabálytalanságok és a balesethez vezető tényezők viszonyában?

K2. Azonosíthatók-e olyan reprezentációs hiányok, redundanciák vagy rejtett tényezők, amelyek a balesetek hagyományos, különálló vizsgálati szempontok szerinti értelmezését korlátozzák?

K3. A feltárt relációk és összefüggések milyen módon járulhatnak hozzá egy későbbi, mesterséges intelligenciával vagy fuzzy logikai módszerekkel támogatott munkabaleseti döntéstámogató rendszer megalapozásához?

SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A munkabalesetek és foglalkozási megbetegedések megelőzése az európai munkavédelmi szabályozás egyik alapvető célkitűzése. Ennek keretét az Európai Unió 89/391/EGK számú irányelve határozza meg, amely a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségének javítását szolgáló alapelveket rögzít [6]. A tagállamok, köztük Magyarország, e keretek között alakítják ki saját munkavédelmi stratégiáikat és ellenőrzési gyakorlataikat. A téma jelentőségét jól mutatja, hogy a munkavégzéssel összefüggő balesetek és megbetegedések továbbra is jelentős társadalmi és gazdasági terhet jelentenek hazai és nemzetközi szinten egyaránt [7], [8], [9]. Az EU-OSHA becslése szerint ezek költsége évente legalább 476 milliárd euró az Európai Unióban, míg Magyarországon a Makronóm Intézet 2023-as tanulmánya 382,1 milliárd forintos nemzeti gazdasági költséget jelzett a 2022-es évre vonatkozóan [10], [11]. A munkavédelem hatékonysága szempontjából nemcsak a jogszabályi háttér megléte meghatározó, hanem az is, hogy a hatósági ellenőrzések és balesetkivizsgálások során keletkező információk mennyire egységesen, visszakereshetően és értelmezhetően kerülnek rögzítésre. Magyarországon a munkavédelmi normák érvényesülésének ellenőrzése a munkavédelmi hatóság feladata, amelynek működése közvetlenül kapcsolódik a nemzeti munkavédelmi politika megvalósításához [12]. A hatósági ellenőrzések és jelentések alapján keletkező visszacsatolások a munkavédelmi rendszer fejlesztésének fontos információforrásai, ezért különösen lényeges, hogy a baleseti események vizsgálata egységes szempontok szerint, szakmailag követhető módon történjen. Ezt a célt támogatja a Nemzetgazdasági Minisztérium által 2016-ban kiadott *Módszertani útmutató a munkabalesetek hatósági vizsgálatához*, amely részletes eljárási és tartalmi keretet biztosít a munkabalesetek hatósági kivizsgálásához. A dokumentum nemcsak a vizsgálati gyakorlat egységesítésének eszközeként értelmezhető, hanem olyan strukturált szakmai tudásforrásként is, amely megfelelő átdolgozással gépi feldolgozásra alkalmas adatszerkezet alapját képezheti. Ez a megközelítés illeszkedik azokhoz a munkavédelmi digitalizációs törekvésekhez, amelyek az Európai Unió és Magyarország stratégiai dokumentumaiban is megjelennek [13], [14], [15]. A munkavédelem digitalizációja és módszertani támogatása nem új jelenség: különböző oktatási, kockázatértékelési, ergonómiai ellenőrzési és szakmai információs rendszerek már korábban is megjelentek a területen, például a Napo, az OSHwiki vagy az OiRA platform formájában [16], [17], [18]. A hazai szakirodalomban Szabó munkái az ergonómiai ellenőrzések, a szoftverergonómiai értékelés, valamint a munkavédelmi kockázatkezelés módszertani kérdései felől kapcsolódnak ehhez a témakörhöz [19], [20].

Ezek azonban elsősorban tudásmegosztási, ellenőrzési, ergonómiai vagy kockázatértékelési támogatást nyújtanak, míg a jelen kutatás szempontjából a hangsúly a baleseti esettanulmányokból kinyerhető strukturált és relációs tudás feldolgozásán van. A mesterséges intelligencia fejlődése, valamint az ember–gép együttműködésre épülő döntéstámogatási megközelítések új lehetőséget teremtenek arra, hogy a munkavédelmi tapasztalatok ne csak dokumentált megállapításokként, hanem értelmezhető adatkapcsolatokként is hasznosuljanak [21], [22], [23]. A mesterséges intelligencia munkavédelmi és ipari alkalmazhatóságának kérdéséhez több hazai munka is kapcsolódik. Kollár és szerzőtársai gyakorlati oldalról az objektumfelismerés lehetőségeit, szakértői megközelítésből pedig a mesterséges intelligencia fejlődésének és alkalmazhatóságának tágabb kérdéseit vizsgálták [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]. A döntéstámogató rendszerek munkavédelmi alkalmazása ugyanakkor csak akkor lehet szakmailag megalapozott, ha a rendszer nem pusztán adatokat tárol, hanem képes azok közötti kapcsolatok, visszatérő mintázatok és értelmezési bizonytalanságok kezelésére is. Ezt támasztják alá azok a kutatások is, amelyek a munkavédelmi megfigyelések, mesterséges intelligenciával támogatott kockázatértékelések és döntéstámogató megoldások gyakorlati lehetőségeit vizsgálják. [31], [32], [33]. A jelen tanulmány szakirodalmi háttere alapján ezért a munkabaleseti adatfeldolgozás következő lépése nem csupán a vizsgálati szempontok digitalizálása, hanem azok relációs értelmezése. A baleseti tényezők közötti kapcsolatok, redundanciák és rejtett összefüggések feltárása olyan tudásreprezentációs irányt jelöl ki, amely később mesterséges intelligenciával vagy fuzzy logikai módszerekkel támogatott döntéstámogató rendszerek alapjául is szolgálhat.

KUTATÁSMÓDSZERTAN

A kutatás jellege és adatforrása

A jelen tanulmány egy korábbi kutatási szakasz folytatásaként értelmezhető. Az alapkutatás 29 halálos munkabaleseti esettanulmány kvalitatív tartomelemzésére épült, amelynek eredményeként strukturált vizsgálati keretrendszer jött létre. A kvalitatív kutatási módszerek alkalmasak összetett jelenségek, emberi viselkedések, döntési helyzetek és társadalmi interakciók mélyebb értelmezésére, ezért megfelelő alapot biztosítottak a munkabaleseti esettanulmányok tartalmi feldolgozásához [34].

Az elemzés alapját a Munkavédelem Foglalkoztatás-felügyelet hivatalos oldalán közzétett esettanulmányok képezték. A Nemzetgazdasági Minisztérium által kiadott *Módszertani útmutató a munkabalesetek hatósági vizsgálatához* 8–12. fejezetei alapján az alapkutatásban öt vizsgálati csoportból álló táblázatos szempontrendszer készült, amely 70 fő vizsgálati szempontot és 152 tényezőt tartalmazott.

Bár a jelen vizsgálat a korábbi kutatási szakasz eredményeire épít, fókusza nem az alapkeretrendszer újbóli igazolása, hanem annak vizsgálata, hogy a már létrehozott struktúra relációs szemléletű elemzése milyen új értelmezési lehetőségeket, többletinformációkat és döntéstámogatási irányokat tárhat fel. Ennek megfelelően a tanulmány a korábbi adatfeldolgozásból csak azokat az elemeket ismerteti röviden, amelyek a jelen elemzés logikájának megértéséhez szükségesek, így a bemutatott módszertani elvek a kutatás első szakaszának részletes ismerete nélkül is értelmezhetők.

A jelen vizsgálati szakasz értelmezését szintén a grounded theory megközelítés támogatta, mivel ez lehetőséget biztosít arra, hogy az elemzési szempontok és következtetések az empirikus adatokból kiindulva, azokkal folyamatos kölcsönhatásban formálódjanak. A grounded theory olyan kutatási megközelítésként értelmezhető, amelyben az elméleti felismerések nem előzetesen rögzített modellből, hanem az adatok fokozatos elemzéséből és értelmezéséből bontakoznak ki [35], [36].

A strukturált adatok relációs továbbvizsgálata

A jelen feldolgozási szakaszban a korábban kialakított vizsgálati szempontok nem kizárólag önálló előfordulási adatokként kerültek értelmezésre, hanem egymáshoz viszonyított kapcsolatuk alapján is. A cél annak vizsgálata volt, hogy a már rögzített adatokból milyen további következtetések nyerhetők ki a szempontok közötti eltérések, egyezések és átfedések elemzésével.

Ennek érdekében három kiemelt elemzési szempont került összevetésre:

- „A baleset bekövetkezésére közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma”,
- „A feltárt szabálytalanságok száma”,
- „A balesethez vezető tényezők száma”.

Az első mutató a felügyelő által közvetlen baleseti okként azonosított szabálytalanságokat jelöli. A második az adott esetben feltárt összes szabálytalanságot foglalja magában, függetlenül attól, hogy azok közvetlenül hozzájárultak-e a baleset bekövetkezéséhez.

A harmadik mutató, vagyis „A balesethez vezető tényezők száma” ennél szélesebb értelmezési keretet alkalmaz. Nemcsak a felügyelő által megjelölt szabálytalanságokat veszi figyelembe, hanem az esettörténet ok-okozati láncolatában azonosítható további tényezőket is. Ilyenek lehetnek például a kritikus munkáltatói vagy munkavállalói döntések, valamint azok a kedvezőtlen körülmény-együttállások, amelyek önmagukban nem mindig jelennek meg külön vizsgálati szempontként, mégis szerepet játszhattak a baleset bekövetkezésében.

E mutató bevezetésére azért volt szükség, mert több esettanulmány esetében a baleset nem volt teljes mértékben leírható kizárólag a korábban rögzített szabálytalanságok alapján. „A balesethez vezető tényezők száma” ezért azt fejezi ki, hogy az adott eseménylánc értelmezéséhez hány olyan tényező volt szükséges, amely a baleset kialakulásában érdemi szerepet játszott, függetlenül attól, hogy az a hagyományos szempontrendszerben önállóan kódolható volt-e. A hagyományos kódolással nehezen kezelhető tényező például az, hogy egy burkolat nélküli veszélyes gép önmagában még nem feltétlenül okoz balesetet; az esemény bekövetkezéséhez az is szükséges lehet, hogy a munkavállaló a veszélyes térbe nyúljon. Ugyanígy szerepet játszhatnak olyan kedvezőtlen körülmény-együttállások is, amelyek előzetes megjelenésével a munkahelyi kockázatértékelés során nem számoltak.

Mivel egy baleseti eseménylánc több egymásra épülő mozzanatból állhat, ugyanazon tényezőitípus – például egy hibás döntés vagy kedvezőtlen körülmény-együttállás – egy eseten belül több ponton is megjelenhetett és ezek összessége adta a balesethez vezető tényezők számát.

A relációk értelmezési logikája

A három elemzési szempont közötti relációk két fő irányból kerültek értékelésre. Az első vizsgálati irány a baleset bekövetkezésére közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok és az összes feltárt szabálytalanság viszonyát elemezte. Ez a kapcsolat arra adhat

választ, hogy a balesethez közvetlenül kapcsolódó hiányosságok elszigetelt jellegűek voltak-e, vagy egy szélesebb munkavédelmi problémakör részét képezték.

Amennyiben a két érték megegyezik, az arra utalhat, hogy a felügyelő a baleset közvetlen okaival összefüggő szabálytalanságokon túl nem azonosított további munkavédelmi hiányosságokat. Ez nem feltétlenül jelenti azt, hogy a munkáltató működése minden tekintetben megfelelő volt, de jelezheti, hogy a dokumentált probléma elsősorban az adott munkafolyamathoz, konkrét helyzethez vagy szereplői magatartáshoz kapcsolódott. Ha ezzel szemben a feltárt szabálytalanságok száma meghaladja a balesethez közvetlenül kapcsolódó szabálytalanságok számát, az már szélesebb munkavédelmi hiányosságokra utalhat. Ilyen esetben a baleset nemcsak egy konkrét munkafolyamat hibájaként, hanem az adott munkáltatói működés, munkaszervezés vagy munkavédelmi kultúra általánosabb problémájaként is értelmezhető.

A második vizsgálati irány a baleset bekövetkezésére közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok és a balesethez vezető tényezők viszonyát értékelte. Ez a reláció azt vizsgálta, hogy a hagyományos munkabaleseti kivizsgálási szempontrendszer mennyiben képes leképezni a baleset teljes ok-okozati szerkezetét.

Amennyiben a közvetlen baleseti szabálytalanságok száma alacsonyabb, mint a balesethez vezető tényezők száma, az arra utalhat, hogy az eseményláncban olyan tényezők is szerepet játszottak, amelyek a hagyományos szempontrendszerben nem, vagy csak részben jeleníthetők meg. Ezek lehetnek például kritikus döntési helyzetek, kedvezőtlen körülmény-együttállások, információhiányok vagy más, nehezen formalizálható tényezők.

Ha a két érték megegyezik, az azt jelezheti, hogy az adott baleset ok-okozati szerkezete a vizsgálati szempontrendszerrel viszonylag jól leképezhető volt. Ebben az esetben a balesethez vezető tényezők és a közvetlenül azonosított szabálytalanságok között nem mutatkozott jelentős reprezentációs eltérés.

Amennyiben a közvetlen baleseti szabálytalanságok száma magasabb, mint a balesethez vezető tényezők száma, az értelmezési átfedésre vagy redundanciára utalhat. Ilyenkor előfordulhat, hogy ugyanaz a valós probléma több vizsgálati szempont alatt is megjelen, vagy egyes szabálytalanságok a kódolásban nagyobb súllyal jelennek meg, mint amekkora szerepet az ok-okozati láncolatban ténylegesen betöltöttek.

A két vizsgálati irány önmagában is hasznos információkat nyújt a balesetek tényezőszámának alakulásáról, a munkavédelmi hiányosságok kiterjedtségéről és a reprezentáció pontosságáról. Együttes értelmezésük azonban további következtetések levonását is lehetővé teszi.

Példa a két vizsgálati irány eredményeinek kombinált értelmezésére:

A két vizsgálati irány együttes értelmezése további következtetési lehetőségeket nyithat meg. Amennyiben az első reláció szerint a balesethez közvetlenül kapcsolódó szabálytalanságok száma megegyezik az összes feltárt szabálytalanság számával, az arra utalhat, hogy a vizsgálat nem tárt fel a baleseti eseményen túlmutató, általánosabb munkáltatói hiányosságokat. Ha ezzel egyidejűleg a második relációban a közvetlen baleseti szabálytalanságok száma és a balesethez vezető tényezők száma közel azonos, akkor az adott esemény inkább egy konkrét munkafolyamathoz, döntéshez vagy szereplői magatartáshoz kötődő szabálytalanságként értelmezhető, nem pedig szélesebb munkavédelmi rendszerproblémaként. Ilyen esetben óvatosan felvethető, hogy a baleset kialakulásában a munkavállalói

döntés, magatartás vagy munkavédelmi tudatosság hiányossága erősebben jelenhetett meg, amennyiben ezt az esettanulmány tartalma is alátámasztja.

Ettől eltérő értelmezési irányt jelezhet, ha az első reláció alapján nem mutatható ki szélesebb körű munkáltatói hiányosság, ugyanakkor a második reláció szerint a balesethez vezető tényezők száma meghaladja a közvetlenül azonosított szabálytalanságok számát. Ebben az esetben a baleset nem feltétlenül vezethető vissza kizárólag dokumentálható szabályszegésekre, hanem nagyobb szerepet kaphattak benne a kedvezőtlen körülmények együttállásai, kritikus döntési helyzetek vagy más, nehezebben formalizálható tényezők. Ez az értelmezés nem a felelősség kizárását jelenti, hanem annak jelzését, hogy az esemény kialakulása a hagyományos szabálytalansági kódoláson túlmutató tényezőket is tartalmazhatott.

Bizonytalanságok és módszertani korlátok kezelése

A vizsgálat során kizárólag olyan szempontok kerültek megjelölésre, amelyek relevanciája az esettanulmányok alapján egyértelműen alátámasztható volt. A jelölések minden esetben a felügyelői megállapításokhoz vagy az esettörténetből egyértelműen levezethető összefüggésekhez kapcsolódtak. A „Tudott róla” kiegészítő szempont a munkáltatói vagy munkavállalói tudatosság rögzítését szolgálta, amennyiben annak ténye az esettanulmányból egyértelműen kiolvasható volt.

A kutatás egyik korlátját az jelenti, hogy a felhasznált esettanulmányok rövidített formában álltak rendelkezésre. Emiatt nem minden esetben állapítható meg teljes bizonyossággal, hogy a dokumentációban nem szereplő tényezők ténylegesen hiányoztak-e a kivizsgálásból, vagy csupán az összefoglaló nem tartalmazta azokat. További módszertani korlátot jelent, hogy egyes szabálytalanságok több vizsgálati szempont alatt is megjelenhetnek, ami redundanciát és értelmezési átfedést eredményezhet.

A vizsgálat további korlátja, hogy a feldolgozás kizárólag a magyar munkavédelmi hatósági gyakorlatból származó esettanulmányokra épül, ezért eredményei elsősorban a hazai kivizsgálási és dokumentációs rendszer keretei között értelmezhetők. A tanulmány nem kíván merőben új balesetvizsgálati módszert bevezetni, hanem annak feltárására törekszik, hogy a magyar hivatalos munkabaleseti esettanulmányok strukturált feldolgozása során milyen, eddig kevésbé vizsgált tényezők, relációk és értelmezési hiányok válhatnak láthatóvá. E megközelítés egyúttal lehetőséget ad arra is, hogy a hazai tapasztalatok később összevethetők legyenek a nemzetközi szakirodalomban megjelenő döntéstámogatási, relációelemzési vagy fuzzy logikai irányokkal.

A jelen tanulmány ezért nem végleges, validált döntéstámogató modellt mutat be, hanem annak vizsgálatára vállalkozik, hogy a strukturált munkabaleseti adatok relációs értelmezése milyen többletinformációkat tárhat fel. A módszer további finomítása szakértői validációval, a szempontok közötti átfedések pontosabb kezelésével, a rejtett tényezők következetesebb azonosításával, valamint a hazai eredmények nemzetközi gyakorlattal való összevetésével valósítható meg.

KUTATÁSI EREDMÉNYEK

A következőkben bemutatott eredmények a 29 halálos munkabaleseti esettanulmány strukturált feldolgozásából származnak. Az elemzés alapját az a vizsgálati mátrix képezte, amely a munkavédelmi hatósági útmutató szempontcsoportjai szerint rendszerezte az esetekben feltárt tényezőket. A jelen fejezet azokra az eredményekre fókuszál, amelyek a

szempontrendszer relációs értelmezése, a reprezentációs hiányok és a baleseti tényezők közötti összefüggések szempontjából meghatározók.

A vizsgálati rendszer nemcsak a balesetek közvetlen kiváltó okait, hanem az egyéb munkavédelmi hiányosságokat, valamint a munkáltatói és munkavállalói tudatosságra utaló megállapításokat is rögzítette. Ez lehetővé tette, hogy az egyes esettanulmányok ne csupán különálló szabálytalanságok halmazaként, hanem egymással összefüggő baleseti tényezők rendszereként legyenek értelmezhetők.

A balesetek közvetlen kiváltó tényezőinek számszerű eloszlása

Az 1. ábra a balesetek kialakulásához vezető közvetlen tényezők szám szerinti megoszlását tartalmazza. Az esettanulmányokban meghatározott közvetlen tényezők alapján rögzítésre került, hogy hány esetben volt egyetlen tényező felelős a balesetért, és hány esetben voltak összetettebb, több tényezőtől álló ok-okozati láncolatok. Az ábra lehetőséget biztosít a balesetek komplexitásának általános megítélésére. A balesethez vezető tényezők száma elsősorban a felügyelők által közvetlenül a baleset bekövetkezésével összefüggésbe hozott, kódolt munkavédelmi szempontokból adódik. Ezeket egészítik ki azok a nyilvánvaló, de a hivatalos kivizsgálási rendben önállóan nem szereplő mozzanatok, amelyek a szabálytalanságokat ok-okozati láncá kapcsolják össze. Ilyen lehet például az a munkavállalói cselekvés, amikor a veszélyes térbe nyúlás nélkül a baleset nem következett volna be. E tényezők azonosítása mélyebb betekintést adhat a balesetek hátterébe, és hozzájárulhat a megelőzés hatékonyságának növeléséhez.

A balesetek kialakulásához hozzájáruló közvetlen tényezők szám szerinti megoszlása	Az előfordulások száma	Az előfordulások százalékos aránya a teljes esetszámmra vonatkoztatva
A baleset kialakulását 1 közvetlen tényező okozta	1	3%
A baleset kialakulását 2 közvetlen tényező okozta	13	44%
A baleset kialakulását 3 közvetlen tényező okozta	13	44%
A baleset kialakulását 4 közvetlen tényező okozta	1	3%
A baleset kialakulását 5 közvetlen tényező okozta	0	0%
A baleset kialakulását 6 közvetlen tényező okozta	1	3%

1. ábra: A balesetekhez hozzájáruló közvetlen tényezők szám szerinti előfordulása

Forrás: Saját szerkesztésű

A baleseti tényezők közötti relációk statisztikai értelmezése

A 2. ábra a 29 halálos munkabaleseti esettanulmány alapján két relációs elemzési irány eredményeit mutatja be. Az első elemzési irány a baleset bekövetkezésében közvetlenül közrejátszó munkavédelmi szabálytalanságok számát veti össze az adott esetben feltárt összes szabálytalanság számával. Ez arra adhat előzetes képet, hogy a balesethez kapcsolódó hiányosságok elszigetelt eseményként jelentek-e meg, vagy egy tágabb munkavédelmi működési probléma részét képezték. Ennek alapján az is értelmezhető, hogy a munkahely általános munkavédelmi kultúrája milyen mértékben kapcsolódhatott a baleset kialakulásához.

A második elemzési irány a közvetlen baleseti szabálytalanságok számát a baleset-hez vezető tényezők számával hasonlítja össze. Ez azokat a mozzanatokat is figyelembe veszi, amelyek nélkül a baleset nem következett volna be, de amelyek a hivatalos kivizsgálási szempontrendszerben nem mindig jelennek meg önálló szabálytalanságként. Ilyen lehet például a munkavállaló döntése, amikor a védőburkolat nélküli gép veszélyes terébe nyúl.

A baleseti elemzési szempontok közötti relációk statisztikai megoszlása						
1. Elemzési szempont	Azon esetek száma, ahol „A baleset bekövetkezéséhez közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma” nem éri el „A feltárt szabálytalanságok száma” értékét.	Az előforduló legnagyobb különbség	Azon esetek száma, ahol „A baleset bekövetkezéséhez közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma” megegyezik „A feltárt szabálytalanságok száma”-val.	Az előforduló legnagyobb különbség		
	17	11	12	0		
Kapcsolatok összesített aránya a teljes esetszámhoz képest	58%		41%			
2. Elemzési szempont	Azon esetek előfordulási száma, ahol „A baleset bekövetkezéséhez közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma” kisebb volt, mint „A balesethez vezető tényezők száma”	Az előforduló legnagyobb különbség	Azon esetek száma, ahol „A baleset bekövetkezéséhez közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma” és „A balesethez vezető tényezők száma” megegyezik.	Az előforduló legnagyobb különbség	Azon esetek előfordulási száma, ahol „A baleset bekövetkezéséhez közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma” több volt, mint „A balesethez vezető tényezők száma”	Az előforduló legnagyobb különbség
	16	5	8	0	5	4
Kapcsolatok összesített aránya a teljes esetszámhoz képest	55%		27%		17%	
Relációk összesített darabszáma	58	Vizsgált esetek száma	29	Relációs vizsgálatok száma esetenként	2	Egy esethez átlagosan kapcsolódó relációk száma
						2

2. ábra: A baleseti elemzési szempontok közötti relációk statisztikai megoszlása
Forrás: Saját szerkesztésű

A kutatási eredmények összegzése és értelmezése

Az 1. ábra adatai alapján az egytényezős és a hattényezős balesetek fordultak elő a legalacsonyabb arányban. Ez arra utal, hogy a vizsgált esetekben ritkán vezetett egyetlen elkülöníthető hiba halálos kimenetelű balesethez, ugyanakkor az sem volt jellemző, hogy

nagyszámú tényező együttes fennállása legyen szükséges az esemény bekövetkezéséhez. A balesetek többsége tehát inkább néhány, egymással kedvezőtlenül összekapcsolódó tényező együttes hatásaként értelmezhető.

A 2. ábra első elemzési irányának eredményei szerint 17 esetben a baleset bekövetkezésére közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma alacsonyabb volt, mint az összes feltárt szabálytalanság száma. Ez a feldolgozott esettanulmányok 58%-át jelenti. Az eredmény arra utal, hogy a felügyelők az esetek több mint felében a baleset közvetlen okával összefüggő szabálytalanságokon túl további munkavédelmi hiányosságokat is azonosítottak. A legnagyobb eltérés egy esetben 11 olyan további szabálytalanság volt, amely nem kapcsolódott közvetlenül a baleset bekövetkezéséhez, de a munkáltatói munkavédelmi működés általánosabb állapotáról fontos információt hordozhat.

A második elemzési irány eredményei alapján 16 esetben a balesethez vezető tényezők száma meghaladta a baleset bekövetkezésére közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok számát. Ez a vizsgált esetek 55%-a, ami arra utal, hogy az esetek több mint felében olyan tényezők is szerepet játszhattak a baleseti eseményláncban, amelyek a hagyományos munkavédelmi értékelési szempontokkal csak részben, vagy egyáltalán nem voltak reprezentálhatók. A két érték 8 esetben, vagyis az esetek 27%-ában egyezett meg; ezekben az esetekben a baleseti ok-okozati láncolat a vizsgálati szempontrendszerrel viszonylag jól leképezhető volt. Öt esetben, azaz az esetek 17%-ában a közvetlen baleseti szabálytalanságok száma meghaladta a balesethez vezető tényezők számát. Ez értelmezési átfedésre vagy redundanciára utalhat, vagyis arra, hogy ugyanaz a valós munkavédelmi probléma több vizsgálati szempont alatt is megjelent a feldolgozás során.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Az 1. ábra alapján a leggyakoribb mintázatot a két- és háromtényezős balesetek jelentették. Ez gyakorlati szempontból arra utal, hogy a balesetek jelentős része nem egyetlen elkülöníthető hibából, hanem egy már meglévő veszélyes állapot és egy hibás döntés vagy cselekvés összekapcsolódásából alakul ki. Példaként említhető egy védőburkolat nélküli gép veszélyes tere, amelybe a munkavállaló benyúl, vagy az az eset, amikor a munkavállaló eltávolítja a védőburkolatot, majd ezt követően kerül kapcsolatba a veszélyes géprésszel. Ezekben az esetekben a baleseti eseménylánc nem pusztán egyetlen hiányosságból áll, hanem egy veszélyes helyzet és egy kritikus döntési mozzanat együttállásából.

A vizsgált adatok alapján tehát a halálos munkabalesetek jellemzően nem teljesen egyszerű, egyetlen okra visszavezethető események, de nem is feltétlenül rendkívül soktényezős, átláthatatlan eseményláncok. Inkább olyan köztes szerkezetet mutatnak, amelyben néhány meghatározó tényező kedvezőtlen összekapcsolódása vezet a baleset bekövetkezéséhez.

Ez a veszélymodell alapvetően kétféle módon jelenhet meg. Az egyik esetben a munkavállaló saját cselekvésével hoz létre veszélyes helyzetet, majd egy további hibás döntés vagy mozdulat vezet a balesethez. A másik esetben a veszélyes állapot már eleve jelen van, és ehhez kapcsolódik egy kritikus munkavállalói döntés vagy cselekvés. A 2. ábra első elemzési iránya alapján a két értelmezési lehetőség közel azonos arányban jelent meg a vizsgált esetekben.

A 2. ábra második elemzési irányának eredményei ugyanakkor arra utalnak, hogy az esetek több mint felében olyan, a baleset szempontjából érdemi tényezők is szerepet játszottak, amelyek a hagyományos munkavédelmi kivizsgálási szempontrendszerrel csak

részben ragadhatók meg. Ezek egy része helytelen emberi döntésekhez, téves helyzetfelismeréshez vagy nem megfelelő munkavédelmi tudatossághoz kapcsolódott, más részük pedig olyan kedvezőtlen körülmény-együttállásként értelmezhető, amellyel az adott munkahely a kockázatok előzetes értékelésekor feltehetően nem számolt.

Ebben az értelemben az eredmények arra mutatnak rá, hogy a baleseti ok-okozati láncolatok jelentős részében nem kizárólag önálló, elszigetelt szabálytalanságok jelennek meg, hanem azok egymásra hatása, a döntési helyzetek minősége és az előre nem látott körülmények kombinációja is meghatározó lehet. Ez indokoltá teszi a baleseti tényezők árnyaltabb, relációs szemléletű vizsgálatát, valamint olyan módszerek bevonását, amelyek képesek a bizonytalan, részben szubjektív és többtényezős összefüggések kezelésére. Ilyen lehetséges irányt jelenthet a fuzzy logikai megközelítés, amely a munkavédelmi döntéstámogatásban alkalmas lehet a merev kategóriák helyett fokozatosabb értékelési formák alkalmazására.

A további kutatások szempontjából kiemelt jelentőségű az emberi tényező részletesebb vizsgálata is, mivel a munkavállalói döntések, helyzetfelismerések, kockázatesztelések mintázatok és munkavédelmi tudatossági szintek a vizsgált balesetek jelentős részében közvetlenül vagy közvetetten hozzájárultak az eseménylánc kialakulásához.

ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja annak vizsgálata volt, hogy egy korábban kialakított, munkabaleseti esettanulmányokra alkalmazott strukturált vizsgálati keretrendszer milyen mértékben alkalmas a baleseti tényezők közötti relációk, reprezentációs hiányok és értelmezési átfedések feltárására. A tanulmány nem az alapkeretrendszer újbóli igazolására törekedett, hanem annak bemutatására, hogy a már számszerűsített és egységes szerkezetbe rendezett adatokból milyen további következtetések nyerhetők ki a vizsgálati szempontok egymáshoz viszonyított elemzésével.

A vizsgálat a 29 halálos munkabaleseti esettanulmány feldolgozott adataira épült. Az elemzés középpontjában három kiemelt mutató állt: a baleset bekövetkezésére közvetlenül hatást gyakorló szabálytalanságok száma, a feltárt szabálytalanságok száma, valamint a balesethez vezető tényezők száma. E mutatók összevetése lehetővé tette annak vizsgálatát, hogy a balesetek közvetlen okai milyen viszonyban állnak az adott esetben feltárt további munkavédelmi hiányosságokkal, illetve mennyiben képes a hagyományos szempontrendszer leképezni a baleseti eseménylánc teljesebb ok-okozati szerkezetét.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált esetek jelentős részében a baleset közvetlen okain túl további munkavédelmi hiányosságok is azonosíthatók voltak. Emellett több esetben olyan tényezők is szerepet játszottak a baleset kialakulásában, amelyek a hagyományos munkabaleseti kivizsgálási szempontrendszerrel csak részben vagy egyáltalán nem voltak reprezentálhatók. Ilyen tényezők lehetnek például a kritikus döntési helyzetek, a helytelen helyzetfelismerés, a munkavállalói vagy munkáltatói döntések, valamint a kedvezőtlen körülmények együttállásai. A vizsgálat arra is rámutatott, hogy bizonyos esetekben ugyanaz a valós munkavédelmi probléma több vizsgálati szempont alatt is megjelenhet, ami redundanciát és értelmezési átfedést eredményezhet.

A kutatás fő tanulsága, hogy a strukturált munkabaleseti adatok nemcsak gyakorlati vagy leíró elemzésre használhatók, hanem relációs értelmezés révén mélyebb baleseti összefüggések feltárására is alkalmasak lehetnek. Ez a megközelítés hozzájárulhat olyan

döntéstámogató rendszerek megalapozásához, amelyek nem kívátni kívánják a munkavédelmi felügyelő szakmai döntését, hanem a baleseti tényezők rendszerezésével, a rejtett összefüggések jelzésével és a reprezentációs hiányok feltárásával támogatják azt.

A további kutatások szempontjából indokolt a szempontrendszer szakértői validálása, a relációk pontosabb formalizálása, valamint az emberi tényező, a döntési helyzetek és a munkavédelmi tudatosság részletesebb vizsgálata. A feltárt eredmények alapján különösen ígéretes lehet olyan módszerek alkalmazása, amelyek képesek a bizonytalan, részben szubjektív és többtényezős összefüggések kezelésére. Ebből a szempontból a fuzzy logikai megközelítés a jövőbeni munkavédelmi döntéstámogatás egyik lehetséges kutatási irányát jelentheti.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] European Agency for Safety and Health at Work, “Munkahelyi biztonsági és egészségvédelmi stratégiák.” Accessed: May 14, 2026. [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/hu/safety-and-health-legislation/osh-strategies>
- [2] European Commission, “Health and safety at work.” Accessed: May 14, 2026. [Online]. Available: https://employment-social-affairs.ec.europa.eu/policies-and-activities/rights-work/health-and-safety-work_en
- [3] Széchenyi Terv Plusz / Pályázati portál, “GINOP-5.3.4-16 A munkahelyi egészség és biztonság fejlesztése.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.palyazat.gov.hu/programok/szechenyi-2020/ginop/ginop-534-16>
- [4] A. Correia et al., “Designing for Hybrid Intelligence: A Taxonomy and Survey of Crowd-Machine Interaction,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, p. 2198, Feb. 2023, doi: 10.3390/APP13042198.
- [5] S. Maheronnaghsh, H. Zolfagharnasab, M. Gorgich, and J. Duarte, “Machine learning in Occupational Safety and Health - a systematic review: Review,” *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, vol. 7, no. 1, pp. 14–32, Aug. 2023, doi: 10.24840/2184-0954_007-001_001586.
- [6] Council of the European Communities, A Tanács 89/391/EGK irányelve (1989. június 12.) a munkavállalók munkahelyi biztonságának és egészségvédelmének javítását ösztönző intézkedések bevezetéséről. 1989. Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:31989L0391>
- [7] Munkavédelem Foglalkoztatás-felügyelet, “Munkabaleseti statisztika.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: https://mvff.munka.hu/#/munkabaleseti_statisztika
- [8] Eurostat, “Accidents at work statistics.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics
- [9] European Agency for Safety and Health at Work, “Occupational safety and health in Europe: state and trends 2023,” Luxembourg, 2023. doi: 10.2802/56459.
- [10] D. Elsler, J. Takala, and J. Remes, “An international comparison of the cost of work-related accidents and illnesses,” Bilbao, 2017. Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/en/publications/international-comparison-cost-work-related-accidents-and-illnesses>

- [11] Makronóm Intézet, “A munkabalesetek és foglalkozási megbetegedések nemzetgazdasági költségei,” 2023. Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://makronomintezet.hu/2023/12/14/a-munkabalesetek-hataselemzese/>
- [12] Munkavédelem Foglalkoztatás-felügyelet, “A munkavédelem nemzeti politikája.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: https://mvff.munka.hu/#/a_munkavedelem_nemzeti_politikaja
- [13] European Commission, “Strategic policy documents.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: https://employment-social-affairs.ec.europa.eu/policies-and-activities/rights-work/health-and-safety-work/strategic-policy-documents_en
- [14] European Agency for Safety and Health at Work, “Digitalisation and occupational safety and health – An EU-OSHA research programme,” Dec. 2019. Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://osha.europa.eu/en/publications/digitalisation-and-occupational-safety-and-health-eu-osha-research-programme>
- [15] Nemzetgazdasági Minisztérium, “A Munkavédelem Nemzeti Politikája,” Budapest, 2024. Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://kormany.hu/dokumentumtar/a-munkavedelem-nemzeti-politikaja>
- [16] Napo Consortium, “Napo – Safety with a smile.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.napofilm.net/en>
- [17] European Agency for Safety and Health at Work, “OSHWiki.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://oshwiki.osha.europa.eu/en>
- [18] European Agency for Safety and Health at Work, “Online interactive Risk Assessment.” Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://oira.osha.europa.eu/en>
- [19] G. Szabó, Munkahelyek ergonómiai ellenőrzése. Budapest: Óbudai Egyetem, 2014. Accessed: May 13, 2026. [Online]. Available: <https://dtk.tan-konyvtar.hu/handle/123456789/12133>
- [20] G. Szabó, “A munkavédelemi kockázatkezelés sajátosságai,” *Bánki Közlemények*, vol. 3, no. 1, pp. 5–12, 2020, doi: 10.12700/bk.2020.3.1.100.
- [21] S. Amershi et al., “Guidelines for Human-AI Interaction,” in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, May 2019, pp. 1–13. doi: 10.1145/3290605.3300233.
- [22] J. Sevilla, L. Heim, A. Ho, T. Besiroglu, M. Hobbhahn, and P. Villalobos, “Compute Trends Across Three Eras of Machine Learning,” in *2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Padua, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 1–8. doi: 10.1109/IJCNN55064.2022.9891914.
- [23] S. Herath Pathirannehelage, Y. R. Shrestha, and G. von Krogh, “Design principles for artificial intelligence-augmented decision making: An action design research study,” *European Journal of Information Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 207–229, Mar. 2025, doi: 10.1080/0960085X.2024.2330402.
- [24] C. Kollár and B. Nagy, “A mesterséges intelligencia felhasználási lehetőségei az objektumfelismerésben (első rész),” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 3, no. 1, pp. 123–140, Mar. 2021, Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/126>
- [25] C. Kollár and B. Nagy, “A mesterséges intelligencia felhasználási lehetőségei az objektumfelismerésben (második rész),” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 3, no. 2, pp.

- 115–129, Jun. 2021, Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/160>
- [26] M. Heitlerné Lehoczky and C. Kollár, “On the Road to Human-Scale Artificial Intelligence, as Seen by Our Experts,” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 1. Ksz., pp. 5–21, Oct. 2022, Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/254>
- [27] M. Heitlerné Lehoczky and C. Kollár, “A mesterséges intelligencia múltja, jelene és jövője a senior és a junior szakértők szemszögéből (1. rész),” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 1, pp. 117–129, Mar. 2022, Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/208>
- [28] M. Heitlerné Lehoczky and C. Kollár, “A mesterséges intelligencia múltja, jelene és jövője a senior és a junior szakértők szemszögéből (2. rész),” *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 2, pp. 87–101, Jun. 2022, Accessed: May 15, 2026. [Online]. Available: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/231>
- [29] E. González-Sarmiento, J. Roa-Perez, and L. Ortiz-Ospino, “Big Data and Artificial Intelligence in the Development of Industry 4.0; A Bibliometric Analysis,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1154, no. 1, p. 012008, Jun. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1154/1/012008.
- [30] A. Kelemen-Erdős and É. Beke, “Műszaki végzettségű pályakezdők transzverzális kompetenciái a digitalizáció korában,” *Iskolakultúra*, vol. 33, no. 8, pp. 52–66, Aug. 2023, doi: 10.14232/iskkult.2023.8.52.
- [31] A. Kułakowska, E. Frankowska, and B. Sadzińska, “Implementation of the Behavioural Observation Programme as Part of the Work Safety Strategy,” *Safety & Fire Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 156–175, 2020, doi: 10.12845/SFT.56.2.2020.10.
- [32] B. U. Ayhan and O. B. Tokdemir, “Safety assessment in megaprojects using artificial intelligence,” *Saf. Sci.*, vol. 118, pp. 273–287, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.05.027.
- [33] M. Pishgar, S. F. Issa, M. Sietsema, P. Pratap, and H. Darabi, “REDECA: A Novel Framework to Review Artificial Intelligence and Its Applications in Occupational Safety and Health,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 13, p. 6705, Jun. 2021, doi: 10.3390/ijerph18136705.
- [34] J. W. Creswell and C. N. Poth, *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches*, 4th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2017. Accessed: May 14, 2026. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=gX1ZDwAAQBAJ>
- [35] A. Z. Mitev, “Grounded theory, a kvalitatív kutatás klasszikus mérföldköve,” *Vezetéstudomány - Budapest Management Review*, vol. 43, no. 1, pp. 17–30, 2012, doi: 10.14267/VEZTUD.2012.01.02.
- [36] V. Sallay and T. Martos, “A Grounded Theory (GT) módszertana,” *Magyar Pszichológiai Szemle*, vol. 73, no. 1, pp. 11–28, Mar. 2018, doi: 10.1556/0016.2018.73.1.2.

THE IMPACT OF OCCUPATIONAL SAFETY REQUIREMENTS ON RADIATION SHIELDING DESIGN IN A 155 MM AMMUNITION MANUFACTURING NDT SYSTEM**A MUNKAVÉDELMI KÖVETELMÉNYEK HATÁSA A SUGÁRVÉDELMI ÁRNYÉKOLÁS TERVEZÉSÉRE EGY 155 MM-ES LŐSZERGYÁRTÓ NDT RENDSZER ESETÉN**RÁTKAI Ákos¹ – BODOR Károly² – RÁCZ Ervin³ – ZAGYVAI Péter⁴**Abstract**

In modern military production, non-destructive testing (NDT) technologies used in the production of large-caliber artillery shells have played a key role in ensuring production safety and product quality. Therefore, high-energy linear accelerator-based X-ray equipment is used in modern production. The main topic of the article is the analysis of how occupational safety and ergonomic considerations can override the original radiation protection design concept and its underlying assumptions. The study points out that radiation protection design in modern military is not an exclusive and dose calculation issue, but an integrated engineering-design task, where explosion protection (e.g. shrapnel protection), radiation protection, occupational safety, and ergonomics and operational management aspects must be taken into account together.

Keywords

155 mm artillery shell, industrial radiography, shielding design, occupational safety, ergonomics, multidisciplinary

Absztrakt

A modern hadiipari termelésben a nagy kaliberű tüzérségi lövedékek gyártása során alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálati (NDT) technológiák kiemelt szerepet kezdtek el betölteni a gyártásbiztonság és a termékminőség biztosításában. A modern gyártás során ezért nagy energiájú lineáris gyorsító alapú röntgenberendezéseket alkalmaznak. A cikk központi témája annak elemzése, hogy miként írhatják felül a munkavédelmi és ergonómiai szempontok az eredeti sugárvédelmi tervezési koncepciót, annak elképzeléseit. A tanulmány rámutat arra, hogy a sugárvédelmi tervezés a modern hadiiparban nem kizárólag fizikai és dózisszámítási kérdés, hanem integrált mérnök-tervezői feladat, ahol a robbanásvédelmi (például repeszvédelem), sugárvédelmi, illetőleg munkavédelmi, azon belül is ergonómiai és üzemviteli szempontokat együttesen szükséges figyelembe venni.

Kulcsszavak

155 mm-es lövedék, ipari radiográfia, árnyékolástervezés, munkavédelem, ergonómia, multidiszciplinaritás

¹ ratkai.akos@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0009-0000-5368-7852 | Technical Manager, HUN-REN Centre for Energy Research | műszaki menedzser, HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

² bodor.karoly@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0000-0002-1612-8207 | Radiation protection expert, Centre for Energy Research | Sugárvédelmi szakértő, Energiatudományi Kutatóközpont

³ racz@uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-7692-1397 | full professor, Obuda University, Kando Kalman Faculty of Electrical Engineering, Institute of Electrophysics | egyetemi tanár, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Elektrofizika Intézet

⁴ zagyvai.peter@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0000-0002-8121-8452 | Radiation protection advisor, Centre for Energy Research | Sugárvédelmi tanácsadó, Energiatudományi Kutatóközpont

BEVEZETŐ

A modern hadviselés többek között rendkívül nagy hangsúlyt helyez a folyamatos hadianyag-utánpótlás gördülékeny biztosítására. A harcászati tapasztalatok igazolták, hogy a kellő méretekkel rendelkező, jól képzett haderő, továbbá a megfelelő mennyiségű és minőségű lőszer, illetőleg különféle harcászati kiegészítők rendelkezésre állása alapvetően meghatározza a hadműveletek sikerességét. A jelenleg is tartó orosz–ukrán háború ismételten rámutatott arra, hogy a nagy intenzitású, elhúzódó szárazföldi összecsapások során a tüzérségi rendszerek, harcászati infrastruktúra és a hozzájuk tartozó lőszerkészletek stratégiai jelentőséggel bírnak.



1. ábra: A 155 mm-es lövedék alaki kinézete [1]

A jelenleg használt, modern NATO kompatibilis tüzérségi rendszerek egyik legfontosabb szabványos lőszertípusa a 155 mm-es standard lövedék (1. ábra). Bár a kaliber kifejlesztése több, mint százötven éves múltra tekint vissza, napjainkban is közkedvelt lőszertípusnak számít, és kiemelt szerepet játszik a modern hadviselésben. [1]

A 155 mm-es kaliber története az 1870–1871-es francia–porosz háborút követő időszakra vezethető vissza. A francia hadvezetés a háborús tapasztalatok alapján felismerte, hogy a korszerű erődítmények és nagy távolságú célpontok ellen nagyobb kaliberű tüzérségi rendszerekre van szükség. Az 1874-ben összehívott francia tüzérségi bizottság végül a 155 mm-es kaliber mellett döntött. Az első jelentős rendszer Charles de Bange nevéhez köthető, ezután világszerte elterjedt ez a kaliber. [2]

Az első világháború alatt a 155 mm-es tüzérség kiemelt jelentőséggel bírt a lövészárók-hadviselésben, majd a második világháború során tovább fejlődött. Az amerikai eredetű „Long Tom” rendszerek, illetve azok továbbfejlesztett, átalakított változatai később NATO szabványként rendszeresültek. A hidegháború időszakában ezen kaliber jelentősége tovább nőtt, mivel képes volt taktikai nukleáris lövedékeket is hordozni, különleges kialakítása révén. [2]

A 2020-as évekre a 155 mm-es lövedék ismét központi szerepet tölt be a modern hadviselésben. A jelenlegi harcászati konfliktusok következtében megugrott a különféle lőszeres kereslete, a napi felhasználási igény rendkívül magassá vált, ezért a hadiipari gyártás

kapacitása és megbízhatósága stratégiai kérdéssé alakult át. Ukrajna jelenleg 250.000 darab/hó (166 lövés/egység/nap) igénnyel rendelkezik a 155 mm-es lövedék kapcsán, ez egyben egy megközelítőleg 875 milliárd forint értékű megrendelés, azonban a szövetséges Európai országok csak 5000 darab/hó lövedéket tudnak az ukrán haderő rendelkezésére bocsátani. Ez a jelenség elősegítette, hogy a harcászati lövedékek gyártása ismét nagymennyiségben újra induljon. Fontos kiemelni a gazdasági vonatkozásokat, hisz egy klasszikus 155 mm-es lövedék piaci értéke megközelítőleg 3-5 millió forint, így gazdasági szempontból is elvárható, hogy a megvásárolt áru megfelelőképpen, az elvárásokhoz igazodva működjék. [2], [6]

Az esetleges hibákkal rendelkező lövedékek eladásának elkerülése érdekében a modern hadiiparban lineáris gyorsító alapú röntgenvizsgálati rendszereket alkalmaznak. Ezek a nagy energiájú NDT (non-destructive test, azaz roncsolásmentes vizsgálat) rendszerek lehetővé teszik a lövedékek belső szerkezeti hibáinak roncsolásmentes vizsgálatát. [3]

A sugárvédelmi tervezés nem kizárólag fizikai számításokon alapul. A valós ipari környezetben a munkavédelmi, ergonómiai és üzemeltetési szempontok jelentősen módosíthatják az eredeti sugárvédelmi koncepciót. Jelen tanulmány ezt a problémakört mutatja be a Várpalota Védelmi Ipari Komplexumban kialakított 155 mm-es lőszergyártó rendszer példáján keresztül.

A 155 MM-ES LÖVEDÉK TÖRTÉNELMI FEJLŐDÉSE

Az első, 155 mm-es tüzérségi lövedékeknek definiálható rendszer a Charles de Bange által fejlesztett 155 mm-es löveg volt (2. ábra), amelyet 1877-ben rendszeresítettek Franciaországban. Bár az első világháború idejére a rendszer részben elavulttá vált, a francia hadsereg továbbra is széles körben alkalmazta megbízhatósága révén, különösen ellenütegi feladatokra.



2. ábra: Az 188-es 155 mm-es Bange-modell, [4]

A XX. század elején Filloux ezredes (3. ábra) továbbfejlesztette a rendszert, amelynek eredményeként megszületett a Canon de 155 Grande Puissance Filloux (GPF). Ez a konstrukció jelentős hatást gyakorolt a későbbi amerikai fejlesztésekre is. Az Egyesült Államok az első világháború során átvette a francia konstrukciót, majd továbbfejlesztette azt. Az 1938-ban tervezett amerikai „Long Tom” rendszer már a modern 155 mm-es tüzérségi lövegek egyik alapjának tekinthető. [2]



3. ábra: Filloux ezredes [5]

A második világháborút követően a 155 mm-es kaliber széles körben elterjedt mind a NATO, mind a szovjet blokk országaiban. A hidegháború idején taktikai nukleáris lövedékek fejlesztése is történt erre a kaliberre, amely tovább növelte stratégiai jelentőségét, például az M65 típusú atomágyú (melyet gyakorta „Atomic Annie”-nek is neveznek) is ide tartozik, amely képes volt akár egy 280 mm-es atomtöltetet is célba juttatni 30 kilométeres hatótávban, ami 15 kilotonnás pusztító erővel bírt (4.a és 4.b ábra). Napjainkban a 155 mm-es löszerek ismét kiemelt szerepet töltenek be a modern hadviselésben. Az orosz–ukrán konfliktus során mindkét fél nagy mennyiségben alkalmaz ilyen típusú löszereket, ami jelentősen növelte a gyártási kapacitások iránti igényt. [2]



4.a ábra: Dr. Bodor Károly Sugárvédelmi Szakértő egy Atomic Annie társaságában az USA-ban, [saját szerkesztés]



4.b ábra: Atomtüzérségi kísérlet [6]

A MODERN LŐSZERGYÁRTÁS STRATÉGIAI JELENTŐSÉGE

A modern háborúk egyik meghatározó tényezője a hadianyag-utánpótlás biztosítása. A történelem során számos konfliktus bizonyította, hogy a logisztikai és ipari háttér legalább olyan fontos szerepet játszik a hadviselésben, mint maga a harctéri technológia.

Egy 155 mm-es tüzérségi lövedék előállításához összetett technológiai folyamat, amely során több egymást követő hőkezelési, alakítási és minőségellenőrzési lépést kell végrehajtani. A gyártás során a fém szerkezetében hajszáltrepedések, belső anyaghibák vagy robbanóanyag-homogenitási problémák alakulhatnak ki.

A hibás lövedékek komoly veszélyt jelentenek:

- a lövedék még a csőben felrobbanhat,
- a löveg kezelőszemélyzete életveszélybe kerülhet,
- a harcállás megsemmisülhet,
- a lövedék célterületen kifejtett hatása jelentősen csökkenhet.



5. ábra: A Rheinmetall Hungary Zrt. várpalotai telephelye [7]

A modern hadiipar számára ezért kulcsfontosságú a nagy mennyiségű, ugyanakkor megbízható minőségű lőszergyártás fenntartása, annak érdekében, hogy a lőszerutánpótlás

folyamatosan biztosított legyen. Az elvárás az, hogy a harci állás (pl. tank, tarack) megbízható legyen, azaz folyamatosan képes legyen az ellenállásra, illetve előre nyomulásra, különben felszakad a védelmi vonal. [6]



6. ábra: A Rheinmetall által fejlesztett legújabb RCH 155 mm-es önjáró kerekes tüzérségi rendszere [8]

Nyugat-Európában a fegyvereket különféle szervezetek állítják elő, akik csak hosszútávú, nagy mennyiségű megrendelés esetén hajlandóak fejleszteni, azaz hiába nagy a harc-
térén a kereslet, a fegyvergyártó cégeknek fontos a pénzügyi megtérülés is, hiszen nem állami vállalatok. Magyarországon a Várpalota Védelmi Ipari Komplexum keretében valósult meg a Rheinmetall Hungary Munitions Zrt. gyártóközpontja, amely a magyar és NATO kompatibilis hadianyag-ellátás egyik meghatározó eleme lehet (5.ábra). A Rheinmetall Hungary Munitions Zrt., egy német-magyar közös vegyesvállalat, a beruházás kiemelt beruházásnak tekinthető a Várpalota Védelmi Ipari Komplexum megvalósításával (5. ábra). [7], [9]

A 155 MM-ES LÖVEDÉK GYÁRTÁSI FOLYAMATA

A 155 mm-es lövedék gyártása több lépcsőből álló, rendkívül precíz technológiai folyamat. A lövedéktest általában speciális, körülbelül 2 cm vastagságú acélötvözetből készül, amelyet többszöri hevítésnek, alakításnak, hűtésnek és hőkezelésnek, azaz edzési eljárásnak vetik alá.

A gyártási folyamat során:

- a lövedéktestet nyújtják és formázzák,
- hőkezelik és edzik,
- kialakítják a geometriai méreteket,
- ellenőrzik az anyagszerkezeti hibákat,
- végül megtöltik robbanóanyaggal.
- teljeskörű NDT (roncsolásmentes) vizsgálatnak vetik alá
- a kész lövedékeket szakszerűen csomagolják és szállításra kész állapotba helyezik

A gyártás egyik kritikus eleme a minőség-ellenőrzés, mert a lövedékekben a gyártás során kialakuló mikroszkopikus repedések vagy a robbanóanyagban létrejövő légzárványok a későbbi alkalmazás során súlyos meghibásodást eredményezhetnek, amit egy gyártóvállalat nem feltétlenül engedhet meg magának.

A modern gyártásban ezért széles körben alkalmaznak roncsolásmentes anyagvizsgálati (NDT) technológiákat, amelyek lehetővé teszik a hibák korai felismerését.

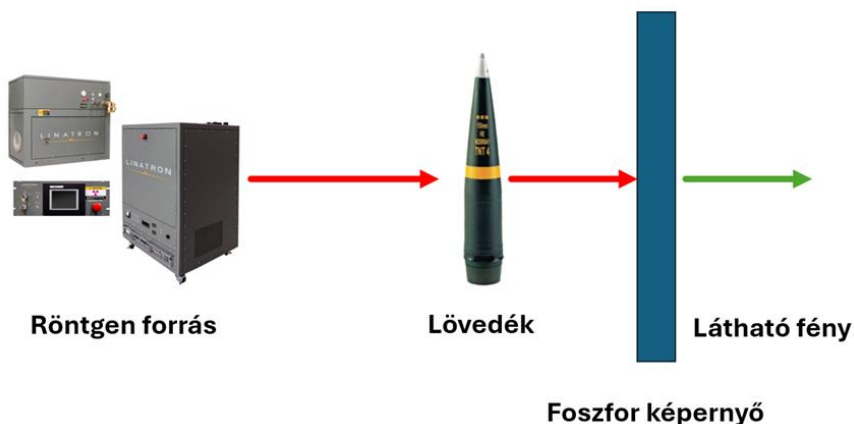
A GYORSÍTÓ ALAPÚ RÖNTGENVIZSGÁLATOK SZEREPE

A modern löszergyártás során alkalmazott egyik legfontosabb ellenőrzési technológia a lineáris gyorsító alapú ipari radiográfia.

A rendszer működési elve szerint:

- Az elektronágyú elektronokat állít elő.
- A magnetron rádiófrekvenciás energiát generál.
- A gyorsítóüregben az elektronok nagy energiára (3 MeV) gyorsulnak.
- Az elektronok egy volfrám céltárgyba csapódnak.
- A fékezés során nagy energiájú (MeV nagyságrendű) röntgensugárzás keletkezik.
- A kollimátor a sugárzást megfelelő irányba tereli. [3]

Mivel a 155 mm-es lövedék fala körülbelül 2 cm vastag acélból készül, hagyományos röntgenberendezések alkalmazása nem lenne elegendő, ezért szükséges a nagy energiájú gyorsító alapú rendszer használata (7. ábra). A Várpalotán alkalmazott rendszer esetében egy 3 MeV energiájú lineáris gyorsító működik, amely alkalmas akár a vastagabb falú acélszerkezetek átvilágítására is, mely a fent részletezett gyártási hibákat hivatott feltárni.



7. ábra: Az NDT vizsgálat elve [6]

JOGSZABÁLYI HÁTTÉR ÉS ENGEDÉLYEZÉSI KÖVETELMÉNYEK

A sugárveszélyes technológiák alkalmazása szigorú jogszabályi környezetben történik: a 438/2022. Kormányrendelet értelmében a Várpalotai Védelmi Ipari Komplexumban végzett tevékenység honvédségi veszélyes tevékenységnek minősül. Ennek megfelelően a sugárvédelmi hatósági feladatokat a Honvédelmi Minisztérium látja el. [9]

A rendszer működtetésére többek között az alábbi főbb jogszabályok vonatkoznak:

- 2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről
- 166/2018. (IX. 17.) Kormányrendelet a honvédelmi ágazat sugárvédelmi hatósági feladatairól

- MSZ 836:2017 szabvány a sugárzás elleni védelem röntgenberendezést és/vagy gamma-sugárforrást alkalmazó ipari radiográfiai munkahelyeken
- MSZ 62-2:2017 szabvány az Ionizáló sugárzás elleni védelem. Béta-,gamma-, és röntgensugárzás elleni védelem
- 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről
- ISO 45001 nemzetközi szabvány a Munkahelyi Egészségvédelem és Biztonság Irányítási Rendszerének (MEBIR) tanúsítása
- 5/1993. (XII. 26.) MüM rendelet a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról

Az engedélyezési folyamat több lépcsőből áll:

1. Forgalomba hozatali (Típus) engedély

A forgalomba hozatali engedély, vagyis típusengedély minden olyan berendezésre vonatkozik, mely használatba vételre kerül. A 2/2022 OAH rendelet [10] 55. § (1) értelmében engedélyezni szükséges

- a radioaktív anyag alkalmazását,
- az ionizáló sugárzást létrehozó berendezés üzemeltetését,
- az ionizáló sugárzást létrehozó berendezés, valamint radioaktív sugárforrást tartalmazó készülék forgalomba hozatalához vagy első magyarországi üzembe helyezését (típusengedély). [10]

A forgalomba hozatali engedély azt jelenti, hogy Magyarország elismeri az engedély alapját képező berendezést, készüléket, munkaeszközt, egyben engedélyezik, hogy az adott eszköz Magyarország területére bekerüljön. Fontos, hogy az adott berendezésre akkor is kell típusengedélyt kérni, ha egy másik országban (legyen szó akár Uniós országról) azt már megkapta, mert az engedély alapvetően Magyarországra vonatkozik és a magyar hatóságok (például az OAH, vagy a Munkavédelmi Főosztályok) ekképpen ismerik el az eszköz létezését is. A fenti felsorolásból jól látható, hogy az NDT készülékre is mindenképpen szükséges rendelkeznie típusengedéllyel, amit a munkavédelmi szempontú előzetes vizsgálat (5. pont) során is ellenőriz a felelős munkavédelmi szakember. A típusengedélyben fel kell tüntetni a vonatkozó sugárvédelmi részleteket és az engedély része kell, hogy legyen a készülék Uniós szabályoknak megfelelő típusvizsgálati tanúsítványa is, az úgynevezett CE tanúsítvány, mely az alapvető vizsgálatok sikeres elvégzését igazolja, úgymint érintés elleni védelem, villamos-biztonság technika, mágneses kompatibilitás stb. A CE tanúsítványban a gyártó aláírásával igazolja, és felelősséget vállal, hogy az adott termék megfelel az Európai unió összes vonatkozó biztonsági, egészségügyi és környezetvédelmi előírásainak, lehetővé téve a termék szabad forgalmazását. Ennek hitelt érdemlő jelölése az úgynevezett CE jelölés, amit minden ilyen CE nyilatkozattal rendelkező termékre jól látható helyen feltüntetnek. Mindent egybevetve jól látható, hogy a típusengedély a komplett alkalmazási eljárások egyik legfontosabb alapidokumentuma, ami nélkül az egész engedélyezési eljárás összeomlik. [11]

2. Létesítési engedély

A civil szférában a 2/2022. (IV.29.) OAH rendelet [10] 56. § (1) bekezdés szerint kiemelt, valamint I. sugárvédelmi kategóriába sorolt tevékenységek, illetve erre szolgáló létesítmények engedélyezése két ütemben történik. Az első ütemben a létesítmény kialakítása előtt a

létesítésre irányuló engedélyezést kell folytatni az 55. § (1) bekezdés 1. vagy 2. pontja szerinti eljárásban. A második ütemben a létesítmény üzembe helyezésére vonatkozó engedélyezést kell lefolytatni az 55. § (1) bekezdés 1. vagy 2. pontja szerinti ismételt eljárás kezdeményezésével. Mivel a rendszer részecskegyorsítót alkalmaz, illetőleg ipari radiográfiai rendszernek minősül, ezért az ionizáló sugárzást létrehozó berendezések I-es kategóriájába tartozik a vonatkozó jogszabály (2/2022. (IV.29.) OAH rendelet 5. melléklete) értelmében. Ennek megfelelően azt is számításba kell venni, hogy az ott dolgozóknak legalább bővített fokozatú sugárvédelmi képe-sítésben kell részesülniük (2/2022. (IV.29.) OAH rendelet 19§ 2)). [10]

A Rheinmetall esetében a folyamat némiképp eltér a civil engedélyeztetési folya-mattól, mivel a 438/2022. (XI.2.) Korm. rendelet [9] értelmében a várpalotai beruházás ki-emelt beruházásnak minősül. Továbbá mivel katonai létesítmény, ezért a 166/2018 (IX. 17.) Korm. rendelet [20] értelmében a létesítési és üzemeltetési engedélyt a Honvédelmi Minisz-terium adja meg, ugyanakkor megjegyzendő, hogy a Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzat (MSSz) és Sugárvédelmi Leírás (SL) tartalmi követelményei megegyeznek a 2/2022 (IV. 29.) OAH rendeletben foglaltakkal. [10]

3. Valós sugárvédelmi mérések igazolása,

Az engedélyeztetésnél a 2/2022 (IV.29) OAH rendelet megköveteli a valós mérések elvégzését, mely visszaigazolja, hogy a sugárvédelmi árnyékolás tervezés és tényleges meg-valósítása megfelelő volt.

4. Üzemeltetési/alkalmazási engedély

A 2/2022 (IV.29.) OAH rendelet értelmében a 8. és 7. melléklet alapján az üzemel-tetési engedélyezésnél szükséges a munkahelyi sugárvédelmi szabályzat (MSSZ) és a su-gárvédelmi leírás (SL) és ahhoz tartozó táblázatok, valamint a 11.-es melléklet szerinti be-rende-zés adatlap bemutatása. Az üzemeltetési és alkalmazási engedélyt a Honvédelmi Mi-niszterium adja meg: Honvédelemért felelős miniszter, Munkavédelmi és Sugárvédelmi Ha-tósági Osztály.

5. Munkavédelmi szempontú előzetes vizsgálat veszélyes munkaeszköz üzembhelye-zése esetén

Minden munkaeszköz első üzembhelyezése alapvetően kétféleképpen történhet munkavédelmi szempontból, aszerint, hogy az adott munkaeszköz veszélyesnek, vagy nem veszélyesnek minősül. Veszélyes munkaeszköznek minősül az a munkaeszköz, mely a 1993. évi XCIII. törvény 21§ 2) pontja szerint:

- Az 5/1993. (XII. 26.) MüM rendelet (foglalkoztatáspolitikáért felelős miniszteri rendelet) 1/a számú mellékletében [13] nevesítve van
- Egyéb jogszabály, vagy munkáltató által veszélyesnek minősített
- Hatósági felügyelet alá tartozó munkaeszköz

Ezek alapján kijelenthető, hogy az adott munkaeszköz veszélyesnek minősül már csak abból kifolyólag is, mert hatósági felügyelet alá tartozik (ionizáló sugárzást kibocsátó berendezés esetén OAH felügyelet), de ebben az esetben a munkáltató is veszélyesnek mi-nősítette az adott berendezést, így elengedhetetlen a munkavédelmi szempontú előzetes vizsgálat megtartása. A vizsgálat azt kívánja igazolni, hogy a vizsgált munkaeszköz betartja az előírt biztonsági előírásokat, a biztonsági funkciók valós gyakorlati körülmények között is az előírások szerint működnek, tehát összességében a berendezés megfelel az egészséget

nem veszélyeztető, biztonságos munkavégzés követelményeinek. A munkavédelmi szempontú előzetes vizsgálat munkavédelmi szaktevékenységnek minősül, annak elvégzését csak szakirányú képzettséggel és munkavédelmi szakmai képesítéssel rendelkező személy, vagy szakirányú munkabiztonsági szakértő, vagy jogszabályban erre feljogosított személy, vagy erre akkreditált intézmény végezheti a 1993. évi XCIII. törvény 21.§ (8) bekezdése értelmében. A veszélyes technológia vizsgálatának személyi feltétele a jogszabályban elkülönül, veszélyes technológia vizsgálatát csak szakirányú munkabiztonsági szakértői engedéllyel rendelkező személy végezheti. [12], [13]

A SUGÁRVÉDELMI ÁRNYÉKOLÁS TERVEZÉSE

A nagy energiájú ipari radiográfiai rendszerek egyik legfontosabb tervezési feladata a megfelelő árnyékolás kialakítása.

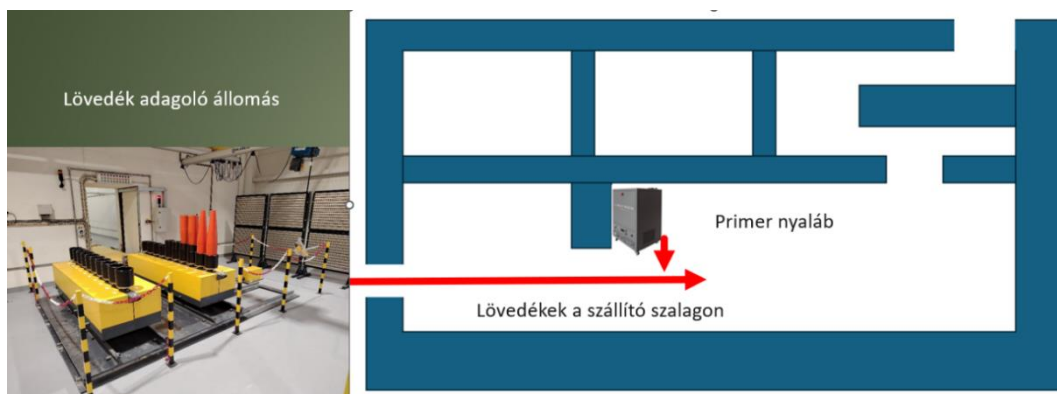
Az árnyékolástervezés során az alábbi fő szempontokat szükséges figyelembe venni:

- A sugárforrás paraméterei,
- A munkavállalók tartózkodási helyei,
- Az üzemidő,
- A megengedhető dózisterhelés (célérték),
- A primer és szórt sugárzás viselkedése.

A tervezés során meghatározásra kerültek:

- a primer sugárzás gyengítési tényezői,
- a szivárgó sugárzás mértéke,
- a szórt sugárzás intenzitása,
- a szükséges beton- és ólomárnyékolás vastagságai
- a várható foglalkozási és lakossági dóziskövetkezmény.

A számítások alapján a primer röntgensugárzást a 2 méter vastag betonfal több mint nyolc nagyságrenddel gyengíti. A szórt sugárzás és a szivárgó sugárzás azonban további tervezési kihívásokat jelentett. [6]



8. ábra: A lövedék adagoló és az NDT állomás [6]

Az NDT bunker (ahol a röntgenberendezés található, 8. ábra) anyagforgalmi nyílásának védelmére eredetileg 10 cm vastag acélajtó került betervezésre, amely sugárvédelmi

szempontból körülbelül 3,5 cm ólomnak megfelelő árnyékolást biztosított. A megfelelő árnyékolás biztosítása érdekében acélt használtak fel, mert az ólom alapvetően nem rendelkezik olyan repeszálló tulajdonságokkal, mint az acél, tehát egy esetleges robbanás esetén nem lenne képes kellő védelmet biztosítani a repeszek ellen. [14]

A TERVEZÉS SPECIALITÁSAI ÉS KIHÍVÁSAI

A sugárvédelmi árnyékolás eredeti tervezése során abból a műszaki és üzemviteli feltételezésből indultak ki, hogy a munkavállalók a lövedékbetöltő állomás belső terében nem tartózkodnak huzamosabb ideig. A koncepció szerint a dolgozók a betöltőállomás külső pereméről végezték volna a munkát, a 40 kg-os lövedékeket pedig egy híddaru segítségével illesztették volna be a betöltő nyílásba, miközben a gyorsítóberendezés folyamatos üzemmódban működik. Későbbiekben azonban kiderült, hogy a betöltőnyílásba való beillesztés a betöltőállomás pereméről, - pusztán a daru használatával - nem lehetséges, ennek megfelelően szükségessé vált a munkavállalóknak a betöltőállomáson belül tartózkodva, kézi anyagmozgatással hozzáigazítani a daruról lógó lövedéket a betöltőnyíláshoz, ami újfajta, főként ergonómiai szempontokat vetett fel. [6], [15]

A munkavédelmi szempontú előzetes vizsgálatot, majd üzembe helyezést és a technológiai folyamatok gyakorlati kipróbálását követően így világossá vált, hogy a valós munkavégzés jelentősen eltér az eredeti feltételezésektől. Kézi anyagmozgatásra vonatkozó konkrét határszámokat a jogszabály nem definiál, így ezek nem állnak rendelkezésre. Mindazonáltal a bevett gyakorlat szerint jellemzően egy átlagos férfi 25-30 kg-ot emelhet meg napi rendszerességgel, míg nők esetében ez az érték 15-20 kg között mozog. A 155 mm-es tüzérségi lövedékek tömege töltött állapotban közel 40 kg, amely egyértelműen meghaladja a maximális 30 kg bevett határértéket, ezt súlyosbítja, hogy a tömeget a munkavállalóknak munkarendjük alatt rendszeresen, akár több tucadszor meg kellene emelniük, ami súlyos egészségi rendellenességeket is okozhat a munkaállomálynak hosszútávon, ráadásul a lövedékek pontos illesztése és behelyezése rendkívül precíz munkát igényel, amelyet a dolgozók a betöltőállomás külső széléről nem tudtak kellő biztonsággal és hatékonysággal elvégezni. [16]

A gyakorlatban gyorsan kiderült, hogy a külső peremről történő munkavégzés nemcsak fizikailag megterhelő, és jelentős hátgerinc, deréktáji és nyaki rendellenességeket okozhat hosszú távon, hanem jelentős munkabiztonsági kockázatot is hordoz. A lövedékek mozgatása során a dolgozóknak kedvezőtlen testhelyzetben kellett volna dolgozniuk, miközben a nehéz lövedéket pontosan kellett volna a szállítórendszerbe illeszteniük. Ez jelentősen növelte annak valószínűségét, hogy a munkavállalók a közel 40 kg-os lövedéket leejtik. Egy ilyen esemény nemcsak a gyártott termék sérülését okozhatta volna, hanem súlyos, akár életveszélyes munkabalesetet is eredményezhetett volna. [17]

Az ergonómiai és munkavédelmi szempontok ezért a gyakorlatban felülírták az eredeti sugárvédelmi tervezési koncepciót, hisz világossá vált, hogy a biztonságos és hatékony munkavégzés érdekében elengedhetetlen, hogy a dolgozók a betöltőállomás belső terébe beléphessenek, és ott akár huzamosabb ideig is tartózkodhassanak. Ez a változás azonban alapvetően módosította a sugárvédelmi kiindulási feltételeinket is.

Az eredeti rendszerben a betöltő állomás szélén 5 $\mu\text{Sv/h}$ volt mérhető, míg a töltő állomás belső térben kialakuló dózisteljesítmény-szint ($\sim 2,7 \mu\text{Sv/h}$) megfelelt annak az üzemviteli elképzelésnek, hogy a munkavállalók csak rövid ideig tartózkodnak a töltő

állomás belső terében. Az új munkaszervezési és munkavédelmi igények mellett azonban már olyan sugárvédelmi célértékeket ($0,5 \mu\text{Sv/h}$) kellett meghatároznunk, amelyek huzamos bent tartózkodás esetén is biztosítják a munkavállalók éves dózismegszorításának teljesülését. [6]

A sugárvédelmi értékelést ezért teljes egészében újra kellett készítenünk. Az új elemzés során már figyelembe vettük a megváltozott tartózkodási helyeket, a hosszú idejű bent tartózkodást, valamint a **folyamatos** üzemviteli körülményeket is. Az ipari radiográfiában használatos szabvány alapvetően a „szokásos” radiológiai felvétel készítéssel számol, azaz a teljes munkafolyamat csak kis részében van ionizáló sugárzás, míg esetünkben a gyártás folyamatos. Emiatt az ionizáló berendezés szinte folyamatosan működik, azaz kis dózisteljesítmény szintek is jelentős dózis járulékot adhatnak a 8-10, akár 12 órás műszakokban. A célunk alapvetően az volt, hogy a betöltőállomás belső terében is teljesüljön a $0,5 \mu\text{Sv/h}$ tervezési dózisteljesítmény szint, így a falakon és bejáratokon - főként az anyagforgalmi ajtón, lásd 10. és 11. ábra - lévő árnyékolást eszerint módosítottuk, amely hosszú távon is biztosítja a munkavállalók megfelelő sugárvédelmét. [18], [19]

A végleges árnyékolás kialakítása során valós méréseket is végeztünk, a mérések célja volt a rendeleti megfelelés mellett:

- a számítások ellenőrzése, azok igazolása,
- a szórt sugárzás viselkedésének vizsgálata,
- a dinamikus üzemviteli környezet modellezése,
- a szükséges árnyékolási tartalékok meghatározása.

A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy a lövedékek fizikai jelenléte növeli kb. $0,5 \mu\text{Sv/h}$ -val a szórt sugárzás mértékét. Ezért a tervezési számításokat kiegészítettük mérési eredményekkel is. [6]

A gyakorlati tapasztalataink alapján:

- a szabványokban előírt értékek önmagukban nem elegendők,
- konzervatív, az általánosabb jellegű előírásoknál szigorúbb tervezési megközelítés szükséges,
- a későbbi üzemviteli módosításokra tartalékot érdemes hagyni,
- a munkavédelmi ergonómiai szempontokat integrálni kell a sugárvédelmi tervezésbe.

KÖVETKEZTETÉSEK

A modern hadiipari gyártás során alkalmazott nagy energiájú NDT rendszerek sugárvédelmi tervezése rendkívül összetett mérnöki feladat. A vizsgált eset jól szemlélteti, hogy a sugárvédelmi számítások és szabványi előírások önmagukban nem elegendők a végleges rendszer kialakításához.

A 155 mm-es tüzérségi lövedékek gyártása során a munkavédelmi és ergonómiai szempontok alapvetően módosíthatják az eredeti sugárvédelmi koncepciót. Bizonyítottuk, hogy a munkavédelem felülírhatja a meglévő sugárvédelmi elképzeléseket, intézkedéseket, amennyiben a munkavédelmi szempontú vizsgálatok során feltárássra kerül, hogy a technológiai folyamat az élő munkaerő egészségét és/vagy biztonságos munkavégzését közvetetten vagy közvetlenül veszélyeztetheti.

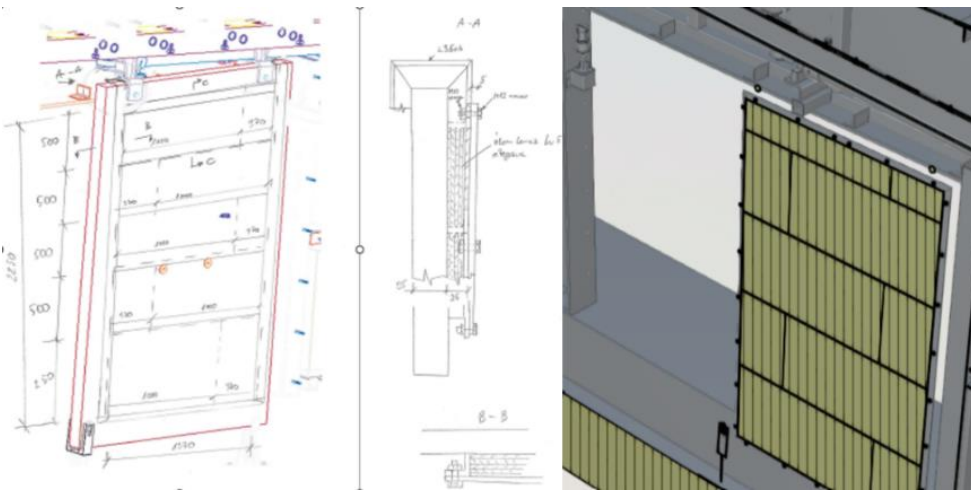
Az eredeti tervezési modell abból indult ki, hogy a munkavállalók nem tartózkodnak huzamosabb ideig a betöltőállomás belső terében. A valós gyártási környezet azonban igazolta, hogy a közel 40 kg tömegű lövedékek biztonságos és hatékony kezelése kizárólag úgy valósítható meg, ha a dolgozók beléphetnek a betöltőállomás területére (9. ábra).



9. ábra: A betöltőállomáson belül dolgozó munkavállalók a Rheinmetall cégcsoport egy másik telephelyén [Saját szerkesztés]

A külső peremről történő munkavégzés:

- ergonómiailag kedvezőtlen volt,
- csökkentette a munkahatékonyságot,
- növelte a munkabalesetek kialakulásának kockázatát,
- fokozta a lövedék leejtésének veszélyét.



10. ábra: A kiegészített anyagforgalmi ajtó, aszimmetrikus formában telepített ólomdarabokkal [6]

Az általunk feltárt munkavédelmi szempontok ezért közvetlenül felülírták az eredeti sugárvédelmi feltételezéseket. A megváltozott munkavégzési körülmények miatt a sugárvédelmi értékelést újra kellett készítenünk, új dózisteljesítmény célértékeket kellett meghatározni, valamint szükséges volt továbbfejlesztenünk a rendszer árnyékolását is.



11. ábra: A végleges kialakítású anyagforgalmi ajtó, összesen 9,5 cm ólomegyenértékkel [saját szerkesztés]

A végleges megoldásunk során az anyagforgalmi ajtó eredeti árnyékolását végül összesen 6 cm vastag (oldalanként 3-3 cm) (10. és 11. ábra) ólomréteggel egészítettük ki. Elmondható, hogy alapvetően 1 cm az ekvivalens tervezés ($0,5 \mu\text{Sv/h}$ a betöltő állomás belső terében), az ajtó teherbírásának vizsgálata során azonban arra jutottunk, hogy ennél sokkal vastagabb ólomréteget is képes elbírní. Ezen kiegészítés lehetővé tette:

- a hosszú idejű bent tartózkodást,
- a biztonságos, egészséget nem veszélyeztető munkavégzést,
- akár a lakossági sugárvédelmi dóziskorlátok teljesítését (1 mSv/év),
- a folyamatos akár napi 12 órában történő kiemelt jelentőséggel bíró hadiipari termelés fenntartását.
- a munkavédelmi, azon belül is ergonómiai követelményeknek való megfelelést
- a repeszállóság biztosítását az acél megtartásával.

A tanulmány egyik legfontosabb következtetése, hogy a modern sugárvédelmi tervezés során multidiszciplináris szemlélet szükséges. A sugárvédelmi, munkavédelmi, ergonómiai és technológiai szempontokat együttesen kell kezelni, ezáltal integrált módon, a különféle szakterületek egymásra gyakorolt hatását is kell tanulmányozni az ehhez hasonló ipari létesítményekben történő munkavégzés során. Ennek következtében a felelős sugárvédelmi szakértőnek és a munkavédelmi szakembernek közösen, hatékony, egzakt és gördülékeny kommunikáció használatával kell együttműködniük.

A hadiipari környezetben különösen fontos:

- a valós munkafolyamatok pontos megismerése,
- a tényleges tartózkodási helyek figyelembevétele,
- pontos munkafolyamatok, munkafázisok definiálása
- az üzemviteli változások lehetőségének betervezése,
- a megfelelő mérnöki tartalékok kialakítása.

A vizsgált rendszer jól példázza, hogy a munkavédelem szakterülete a megfelelően kialakított sugárvédelmi infrastruktúra fontos támogató eleme lehet a hosszú távú, stratégiai jelentőségű hadiipari termelésnek.

A hadiipari létesítményekben sokszor nem feltétlen minden információ ismert (katonai titok), illetve nem feltétlen vannak más szakemberek tisztában azzal, ha csak kicsit is változtatnak a feltételeken az sugárvédelmi szempontból igen releváns is lehet. Ezért is fontos megfelelő mérnöki rezervet (tartalékot) képzeni: prognosztizálható ugyanis, hogy később változhatnak a feltételek és emiatt a sugárvédelmi rendszer is megváltozhat, ehhez azonban kellően robusztus kialakítás szükséges még a tervezési fázis során, illetőleg másik a megoldás az lehet, hogy eleve úgy tervezzük a rendszert, hogy később az viszonylag kis költség ráfordításával jól kiegészíthető legyen.

ÖSSZEFOGLALÁS

A modern hadiiparban a minőségbiztosítás és a sugárvédelem szorosan összekapcsolódik. A nagy energiájú gyorsító alapú röntgenrendszerek lehetővé teszik a kritikus hibák gyors és megbízható felismerését, ugyanakkor alkalmazásuk csak megfelelő sugárvédelmi és munkavédelmi infrastruktúra mellett lehetséges.

A Várpalota Védelmi Ipari Komplexumban alkalmazott megoldások jól szemléltetik, hogy a hadiipari környezetben a sugárvédelmi tervezésnek túl kell mutatnia a hagyományos ipari gyakorlaton és figyelembe kell vennie a különféle munkavédelmi szempontú, munkavédelmi oldalról feltárt szempontokat is a tervezés során. A megfelelően kialakított árnyékolási rendszer továbbá nemcsak a jogszabályi megfelelést biztosítja, hanem hosszú távon hozzájárul a stratégiai jelentőségű hadiipari termelés fenntarthatóságához is.

Főbb következtetéseink:

- Kiemelten fontos megismerni a gyártás sugárvédelmi és munkavédelmi szempontból releváns részegységeit.
- Identifikálni szükséges, hogy hol lesznek és pontosan mit csinálnak a munkavállalók a munkaidejük nagy részében.
- Szintén fontos pontosan ismerni a munkavállalók távolságát az árnyékolástól. (pl. 20 $\mu\text{Sv/h}$ esetén min. 6 m távolság kell, olyan területen, ahol hosszú ideig tartózkodnak).
- az MSZ 836:2017 szabvány irányadó szintjei (20 $\mu\text{Sv/h}$, 7,5 $\mu\text{Sv/h}$) korlátozottan alkalmazhatóak, mivel a hosszú távú időtöltés részein a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ szint garantálja, hogy a 2 mSv/év dózismegszorítást nem fogják túllépni. Azaz ezt érdemes tervezési célértéknek választani.
- Nélkülözhetetlen a pontos kommunikáció a különféle szakterületek között
- A sugárvédelmi tervezés során érdemes rezervet meghatározni, vagy könnyen kiegészíthetővé tenni a rendszert.
- Amennyiben nem minden paraméter ismert a kialakítás során (pl. dinamikus szóródás), - szintén érdemes némi rezervet, tartalékot betervezni a rendszerbe.
- A tervezés és kialakítás folyamata integrált, multidiszciplináris tervezői szemléletet követel.
- Az ajtó árnyékolás tervezésénél a repeszállóságot is biztosítani kell, ezért nem lehet csak ólomból megépíteni az ajtót.

- A pontos méretezést mérésekkel is meg lehet állapítani, amennyiben a szabványban ismertetett tervezéstől eltérő paraméterek is vannak.
- Az anyagforgalmi ajtót érdemes a fallal egyenértékűre tervezni, mivel a gyártási igény folyamatos.
- Az ergonómia bizonyos esetekben felülírhatja a sugárvédelmet: töltő állomáson való hosszú távú tartózkodás (persze a cél nem pusztán a hátfájás elkerülése, hanem a bomba leejtés minimalizálása is)
- A szabványtól el lehet térni, amennyiben igazolni lehet az egyenértékűséget, vagy ha a szabványtól eleve konzervatívabb megoldással dolgozunk.
- A szabvány alapú tervezés még egy bonyolultabb rendszer esetén is megfelelő lehet, de szintén be kell kalkulálni a lehetséges eltérések mértékét, ha ez nem ismert akkor tartalékot kell betervezni.
- Érdemes több scenárióra is megtervezni a rendszert, hogy lehessen látni az egyes megoldások várható költség-haszon arányait.
- Kiemelten fontos a tervezési célértékek meghatározása, akár többféle scenárióra is (pl. gyártás akár többféle paramétere megváltozik pl. röntgen nyaláb szélessége, energiája stb.), így kellően robusztussá tehető az árnyékolás, hogy minden lehetséges változtatás esetén se legyen a sugárvédelem limitáló tényező egy stratégiailag fontos gyártás esetén.
- Ehhez kapcsolódhat egy sugárvédelmi stressz teszt, vagy paraméterérzékenység vizsgálat, amiből kiderül mely paraméter változására a legérzékenyebb a rendszer.
- A tervező az eredeti rendszerre megfelelően méretezte az árnyékolást és az ajtó teherbírására megfelelő mennyiségű mérnöki rezerv lett kialakítva. A megrendelő kérésére + 6 cm ólom árnyékolás került felhelyezésre az ajtóra.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] G. P. Kovács, „NATO csúcs: várható a 155 mm-es lövedékek szabványosítása,” Védelmi Ipar Blog, 2024. júl. 7. [Online]. Elérhető: <https://vedelmiiparblog.hu/blog/nato-csucs-varhato-a-155-mm-es-lovedek-szabvanyositasa/> (2026.05.11.)
- [2] F. Vauvillier and P. Touzin, *Les canons de la victoire 1914–1918, Tome 1: L'artillerie de campagne*. Paris, France: Histoire & Collections, 2006. ISBN 978-2-35250-022-3.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Radiation Protection and Safety in Industrial Radiography*, Safety Reports Series No. 13. Vienna, Austria: IAEA, 1999. pp.1-25.
- [4] Passion & Compassion 1914–1918, „Canon n° 454.” [Online]. Elérhető: https://www.passioncompassion1418.com/Canons/Eng_AfficheCanonGET.php?Id-CanonAffiche=454 (2026.05.27)
- [5] BAS'ART, „Base documentaire Artilleire”. [Online]. Elérhető: https://artillerie.asso.fr/basart/article.php3?id_article=1367 (2026.05.27)
- [6] K. Bodor, „Sugárvédelem a modern, minőségi, nagy kaliberű tüzérségi lőszergyártásban,” konferencia-előadás, Budapest, 2025.
- [7] Rheinmetall Hungary Zrt., „Rheinmetall Hungary Munitions Zrt. várpalotai telephelye.” [Online]. Elérhető: <https://www.rheinmetall.com/hu/ceg/leanyvallalatok/hu-rheinmetall-hungary-zrt> (2026.05.13)

- [8] Financial Times, „Rheinmetall to start producing cruise missiles as early as this year,” 2026. [Online]. Elérhető: <https://www.ft.com/content/bfbc7310-0696-4248-b424-10ca6e7b5256?syn-25a6b1a6=1> (2026.05.12)
- [9] „438/2022. (XI. 8.) Korm. rendelet a Várpalotai Védelmi Ipari Komplexum megvalósításával összefüggő közigazgatási hatósági ügyek nemzetgazdasági szempontból kiemelt jelentőségű üggyé nyilvánításáról, valamint egyes kapcsolódó kormányrendeletek módosításáról,” Nemzeti Jogszabálytár. [Online]. Elérhető: <https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2022-438-20-22>. (2026.05.18)
- [10] „2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről,” Nemzeti Jogszabálytár. [Online]. Elérhető: <https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/2022-2-20-8L>. (2026.05.13)
- [11] K. Bodor, „ELI ALPS engedélyeztetési menete,” belső szakmai dokumentáció, HUNREN Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest, 2026.
- [12] „1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről,” Nemzeti Jogszabálytár. [Online]. Elérhető: <https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/1993-93-00-00.58#NR>. (2026.05.13)
- [13] „5/1993. (XII. 26.) MüM rendelet a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról,” Nemzeti Jogszabálytár. [Online]. Elérhető: <https://njt.jog.gov.hu/jogszabaly/1993-5-20-39.32#NR>. (2026.05.10)
- [14] National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP): „Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities”. NCRP Report No. 151, Bethesda, Maryland, 2005.
- [15] International Atomic Energy Agency, Radiation Safety in Industrial Radiography, IAEA Safety Standards Series No. SSG-11. Vienna: IAEA, 2011. [Online]. Elérhető: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1466_web.pdf (2026.05.13)
- [16] ISO 6385:2016. Ergonomics Principles in the Design of Work Systems. International Organization for Standardization, Geneva, 2016.
- [17] International Labour Office and International Ergonomics Association, Ergonomic Checkpoints: Practical and Easy-to-Implement Solutions for Improving Safety, Health and Working Conditions, 2nd ed. Geneva, Switzerland: International Labour Office, 2010.
- [18] Sugárzás elleni védelem röntgenberendezést és/vagy gamma-sugárforrást alkalmazó ipari radiográfiai munkahelyen, MSZ 836:2017. Budapest: Magyar Szabványügyi Testület, 2017.
- [19] A foton- és elektronsugárzás elleni védelem, MSZ 62-2:2017. Budapest: Magyar Szabványügyi Testület, 2017.
- [20] 166/2018. (IX. 17.) Korm. rendelet a honvédelmi ágazat sugárvédelmi hatósági feladatairól. Nemzeti Jogszabálytár. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1800166.kor> (2026.06.13)

**DEVELOPMENT OF DRONES FOR
RADIATION PROTECTION APPLICATIONS****SUGÁRVÉDELMI ALKALMAZÁSOKRA
HASZNÁLHATÓ DRÓNOK FEJLESZTÉSE**

BODOR Károly¹ – VÖLGYESI Péter² – ZAGYVAI Péter³ – GULYÁS Attila⁴ –
PÁL Károly⁵ – MARSÍ Balázs⁶ – RÁTKAI Ákos⁷

Abstract

The article introduces the prototype drone suitable for the exploration of radioactive radiation sources. This drone is under development in the Nuclear Security Department (HUN-REN CER SBL) of the HUN-REN Centre for Energy Research. The article will talk as well about further development directions. In recent years, the use of drone technology has become available. However, the search for radioactive materials requires a device that meets certain special conditions. The HUN-REN EK, in cooperation with DoubleRingWings (DRW) Ltd., has begun the development of a drone that meets special requirements. The article presents the steps of this development.

Keywords

Virtual radioactive source, Training site, Radiation protection, Work protection, Drone

Absztrakt

A cikk bemutatja a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratóriumában (HUN-REN EK SBL) építés alatt álló, radioaktív sugárforrás felderítésére alkalmas prototípus drónját, valamint az ezzel kapcsolatos fejlesztéseket. Az elmúlt években elérhetővé vált a drón technika alkalmazása. Ugyanakkor a radioaktív anyagok felkutatásához olyan eszközre van szükség, mely bizonyos speciális feltételeknek megfelel. A HUN-REN EK a DoubleRingWings (DRW) kft. közreműködésével elkezdte egy speciális igényeknek megfelelő drón kifejlesztését. A cikk ezen fejlesztés lépéseit mutatja be.

Kulcsszavak

Virtuális sugárforrás, Tanpálya, Sugárvédelem, Munkavédelem, Drón

¹ bodor.karoly@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0002-1612-8207 | Radiation protection expert, Centre for Energy Research | Sugárvédelmi szakértő, Energiatudományi Kutatóközpont

² volgyesi.peter@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0001-6607-7383 | Head of Nuclear Security Department, Centre for Energy Research | Sugárbiztonsági Laboratórium vezető, Energiatudományi Kutatóközpont

³ zagyvai.peter@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0002-8121-8452 | Radiation protection advisor, Centre for Energy Research | Sugárvédelmi tanácsadó, Energiatudományi Kutatóközpont

⁴ gulyas.attila@ek-cer.hu | ORCID: 0000-0002-1100-1880 | Developmental physicist, Centre for Energy Research | Fejlesztő fizikus, Energiatudományi Kutatóközpont

⁵ karoly.pal@doublingwings.com | ORCID: 0000-0001-6674-6532 | Drone pilot-expert, Doublingwings | Drón pilótaszakértő, Doublingwings

⁶ marsi.balazs@tek.gov.hu | ORCID: 0009-0000-4137-7355 | CBRN deputy leader of CBRN unit, Counter Terrorism Centre | CBRN egység helyettes vezető, Terrorrelhárítási Központ

⁷ ratkai.akos@ek.hun-ren.hu | ORCID: 0009-0000-5368-7852 | Technical manager, Centre for Energy Research | Műszaki menedzser, Energiatudományi Kutatóközpont

BEVEZETŐ

A 490/2015. (XII. 30). Kormány rendelet a hiányzó vagy talált radioaktív és nukleáris anyagokkal kapcsolatos intézkedéseket tárgyalja [1]. A nukleáris anyagok felderítésére, beazonosítására a rendelet a HUN-REN EK SBL-t jelölte ki, továbbá más szervezeteket is bevon az eljárásba (például: OAH: Országos Atomenergia Hivatal, Katasztrófavédelem, Rendőrség stb.) Az elmúlt években a HUN-REN EK a Készenléti Rendőrséggel kialakított egy eljárásrendet a bűnügyi helyszínen feltételezhető jelenlévő radioaktív anyag kezelésére [2], [3], [4]. Az elveszett radioaktív sugárforrás keresésénél az SBL, bűnügyi helyszín esetén pedig a rendőrséggel kiegészült ún. Mobile Expert Support Team (MEST) végzi a felderítést (lásd 1. ábra). A közös eljárásrendet a HUN-REN EK az INCLUDING Európai Unió projekt keretében is bemutatta a HUN-REN EK-ban létrehozott/épült tanpályán [5], [14] (lásd 2. ábra).

A radioaktív sugárforrás felderítésének kezdő lépése jelenleg a dózisteljesítmény mérése egy teleszkópikus rúdra elhelyezett GM szonda segítségével. Ezt a műveletet a MEST csapat egyik tagja végzi el (lásd 3. ábra). Már a bemutatók során felmerült az elsődleges felderítés robotokkal, pl. drónnal vagy UGV-vel (Unmanned Ground Vehicle) történő megvalósításának az igénye.



1. ábra: MEST radioaktív sugárforrás-felderítési bemutató a Nemzetközi Atomenergia Ügynökségnél (NAÜ), [3], (saját szerkesztés)



2. ábra: Felderítési bemutató az INCLUDING EU projekt résztvevői számára, (saját szerkesztés), [5]



3. ábra: Sugárforrás-felderítéshez használt dózisteljesítmény-mérő készülék (az említett rúdra elhelyezett GM szonda), [4]

A NAPJAINKBAN ELÉRHETŐ DRÓN TECHNOLÓGIÁK ISMERTETÉSE

A dróntechnológia az elmúlt években jelentős fejlődésnek indult, például a drónok hasznos teherviselése (payload) megnőtt. Ezzel párhuzamosan a hasznos repülési idő is megnövekedett a nagy teljesítményű kompakt akkumulátorok megjelenésével. A drónos technológiák esetén egy igen speciális területnek számít a sugárforrás-felderítés, ezért a detektorokat gyártó cégeknél általában nem volt elérhető sugárforrás keresésére alkalmas drón. Ennek megfelelően egyes cégek is elkezdték ezen drón fejlesztését (pl. Gamma Zrt.). A HUN-REN EK és a DRW szakemberei részt vettek több drónnal történő sugárforrás-felderítési gyakorlaton, valamint a NAÜ által e témában szervezett konferencián.

A különféle sugárforrások drónnal történő felderítése a sugárvédelmi szempontok mellett munkavédelmi aspektusból is kiemelkedő jelentőséggel bír, hisz az eljárás révén akár nullára tudjuk mérsékelni a sugárzás okozta kockázati faktort. Sugaras munkahelyek esetében a munkáltatónak kötelező felmérnie a sugárzásból eredő kvalitatív és kvantitatív kockázati tényezőket, majd erre különféle kockázatmérséklő intézkedéseket tennie. Ilyen mérséklő intézkedés lehet a drónnal való sugárforrás felderítése is.

A drónokon a gyártók a detektorokat szinte kivétel nélkül a drónra szerelik. Ezek a detektorok többségében egy mozdulattal könnyen leszerelhetőek, és a drón elektronikájától függetlenül működnek (4. ábra).



4. ábra: Sugárforrás felderítő drónok, [6], [7]

A drónok mérete a 10-20 cm-től kezdve az igen komoly, akár kisebb autó méretig változhat. Ennek megfelelően áruk is igen változó, azonban általában a mérettel egyenes arányosság figyelhető meg.

A felderítés elvégzéséhez minimálisan egy dózisteljesítmény mérő készülékre, egy nagy felbontású kamerára és a rendszerhez csatlakoztatott jelküldő elektronikára van szükség. A fedélzeti műszerpark kiegészíthető izotópazonosító készülékkel, elektronikus személyi dózismérővel (EPD), levegő aktivitáskoncentráció-mérővel, LED világítással, lézeres távolságmérővel stb. Ilyen felszerelés mellett a drón képes lehet a megtalált forrás beazonosítására (azaz izotóp vizsgálatra). A dózisteljesítmény és távolság értékek alapján meghatározható a forrás aktivitása, valamint ezen értékből az alábbi egyenletek felhasználásával meghatározható a forrás kockázati indexe és fizikai védelmi kategóriája:

$$D = k_\gamma \cdot A / r^2 \quad (1)$$

ahol:

- D: a mért dózisteljesítmény [$\mu\text{Sv/h}$]
- A: sugárforrás aktivitása a mérés időpontjában [MBq]
- r: a sugárforrás és detektor közötti távolság [cm]
- k_γ : Adott izotópra jellemző dóziskonverziós tényező [$\text{cm}^2 \cdot \mu\text{Sv/h/MBq}$]

Az aktivitás meghatározható a fenti egyenlet átrendezésével:

$$A = D \cdot r^2 / k_\gamma \quad (2)$$

A sugárforrás rizikó indexe:

$$R = A / D \quad (3)$$

ahol:

- R: a forrás kockázati indexe [dimenzió nélküli]
- A: sugárforrás aktivitása a mérés időpontjában [TBq]
- D: a sugárforrásra jellemző ún. veszélyességi tényező [TBq] (A „D” értékek megtalálhatóak a 3/2022. (IV. 29.) rendeletben [8].

A sugárforrás kategóriája és a szállításhoz, tároláshoz szükséges fizikai védelmi szint a meghatározott „R” értékkel és a fizikai védelmi rendelet felhasználásával megállapítható [9].

Láthatóan a drón komplexebb felszereltségével nő a felderítés során a sugárforrásra jellemző meghatározható paraméterek száma. Ugyanakkor a mérőeszközök növelik a drón terhelését, emiatt a drón kapacitását is meg kell növelni, ami további súlygyarapodást eredményez. Emiatt a sugárforrások felderítésére a közepes és nagy méretű drónok lehetnek alkalmasak.

A hatékony felderítéshez szükséges a használt mérőeszközök nagy érzékenysége és a minimum félórás repülési idő. A nagy érzékenységet nagyméretű detektorok alkalmazásával lehet elérni, ami szintén növeli a drónra eső terhelést. A felhajtó erőt a drónok rotorjai által a földfelszín irányába cirkulált levegő szolgáltatja. A drón súlyának növekedése erősebb rotorok használatát teszi szükségessé. Ezek igen jelentős talaj irányú légmozgást generálhatnak, ami akár 5 m magasságból is képes például faleveleket szétfújni a felszínen.

A FELDERÍTENDŐ RADIOAKTÍV ANYAGOK JELLEMZŐI

A radioaktív sugárforrások között nyílt és zárt forrásokat különböztetünk meg. A zártsgot a sugárforrás kapszulájának ellenálló képessége határozza meg. Nyílt forrás esetén a kapszula ellenállása minimális, vagyis akár kisebb behatásokra is felnyílik. Ilyen tárolók például az üveg ampullák. A nyílt tárolókból a radioaktív anyag kikerülhet a környezetbe, ahol szétoszlik és ennek hatására a tereptárgyakon ún. felületi szennyezettség alakul ki (kontamináció). A zárt sugárforrások kapszulája értelemszerűen erősebb behatásoknak is képes ellenállni. Jellemzően minél nagyobb egy forrás aktivitása annál erősebb kapszulába zárják. A nagy aktivitású források kapszulája akár igen extrém körülmények mellett (pl. magas hőmérséklet, nyomás) is megtartja az integritását.

A sugárforrások általában fizikailag kis méretűek, kiterjedésük pár cm és a tömegük jellemzően nem éri el a 200 g-ot. Ennek ellenére magas fajlagos aktivitás esetén nagy aktivitással rendelkezhetnek, és árnyékolás nélkül magas dózisteljesítményű tereket hozhatnak létre. A sugárforrás aktivitásának növekedésével nagyobb árnyékolású forrástartó konténereket vagy nagy méretű berendezéseket használnak. A megfelelő árnyékolásnak segítségével a dózisteljesítmény a forrástartó körül nem haladja meg az előírásokat, pl. a közúti fuvarozási szállítás esetén a konténer felületétől 1 m távolságban a megengedett legnagyobb dózisteljesítmény 10 mSv/h.

A DRÓNNAL TÖRTÉNŐ RADIOAKTÍV SUGÁRFORRÁS-FELDERÍTÉS KRITÉRIUMAI

Személyi feltételek

A radioaktív sugárforrás felderítése olyan munkafolyamat, mely során a felderítő sugárforrással dolgozik. A fő hazai sugárvédelmi rendeletben (2/2022. IV.29.) jelenleg nincs említve a sugárforrás felderítése robotok felhasználásával, de a rendelet 19.§ (2) pontjába sorolhatóak azon szakemberek, akik sugárforrás-felderítésben részt vehetnek. Emiatt indokolt a rendelet szerinti bővített sugárvédelmi tanfolyam elvégzése [10].

A drónpilóta szervezett munkavégzés keretében végzi a repülést, munkavédelmi, tűzvédelmi, továbbá katasztrófavédelmi oktatásban is részesülnie kell az első munkavégzés megkezdése előtt. Az oktatás lebonyolításra és a visszakérdezésre való megfelelés összeállítása a munkáltató felelőssége.

Az elveszett források megtalálásához mindezekeken felül szükséges egy speciális elméleti tananyag elsajátítása. Ezt követően a keresést a HUN-REN EK SBL által kifejlesztett virtuális sugárforrás segítségével lehet begyakorolni. A nagy tanpályáján lehetőség van az ún. 4 - 5. kategóriájú valódi sugárforrásokkal való gyakorlatozásra is.

A drón operátornak tapasztalt pilótának kell lennie, mivel a sugárforrások épségét tilos veszélyeztetni 2/2022. IV.29. rendelet 41.§ (3) [10].

A sugárforrás felderítő drónnal szemben állított követelmények:

A drónnak a rá szerelt mérőeszközökkel minimum fél órán át a levegőben kell tartózkodnia. A fedélzeti számítógépen nem szabad adatot tárolni kiber biztonságtechnikai okokból. A drón nem közelítheti meg annyira a felszínt, hogy az általa keltett légörvény a talajon lévő esetleges szennyezést széthordja, illetve a kistömegű sugárforrást arrébb lökje.

A méretének növekedésével a minimális magasság is nő. A drón elektronikáját, irányíthatóságát nagyobb dózisteljesítményű terekben kell tesztelni, mivel az elektronika érzékeny. Emiatt a nagy dózisteljesítményű terekben a drón irányíthatósága részlegesen megszűnhet. Emiatt érdemes egy a drónra közvetlenül felszerelt dózisteljesítmény mérő által mért adat esetén figyelmeztetési, illetve riasztási szintet beállítani, hogy a pilóta elkerülje a kontroll esetleges elvesztését. Amennyiben ez megtörténik, akkor egy beépített automatika segítségével úgy kell beprogramozni a drónt, hogy ilyen esetben visszatérjen a bázisra. A drónnak a manuális felderítés mellett képesnek kell lennie egy előre beállított séma szerint automatikusan mozogni.

Munkavédelmi szempontból fontos továbbá, hogy a használni kívánt drón rendelkezzen érvényes vonatkozó dokumentumokkal, úgymint típusvizsgálati tanúsítvány, a munkavállaló által értett nyelven használati útmutatóval (ami helyszínen rendelkezésre is van bocsátva) továbbá a drón műszaki dokumentációjával. Ezen kívül a munkavégzés környezetét úgy kell kialakítani, hogy az ne veszélyeztesse a munkavállaló saját és más, hatókörben lévő személyek testi épségét és biztonságát, sem a le és felszállás alkalmával, sem pedig a manuális vagy akár automatikus repülés során.

A felderítő drónra szerelt mérőeszközök követelményei:

A mérőeszközöknek a lehető legérzékenyebbnek kell lenniük, mivel így lehet minél nagyobb távolságból már kis dózisteljesítmény esetén is észlelni a forrást. Sokszor ez azzal jár, hogy a mérőeszköz mérete és tömege megnövekszik, ami kedvezőtlen a drónos alkalmazáshoz. Lehetőség szerint automatikusan kell működniük, emellett szükséges az előre beállítható figyelmeztető és riasztási szintek elérhetősége. A mért értékeket a földi kiszolgáló felé digitálisan kell továbbítani. Fontos továbbá, hogy a mérőeszközök hitelesített műszerek legyenek, amit jellemzően egy független akkreditált szervezet által lehet megszerezni.

AZ EK ÉS A DRW KÖZÖS DRÓN FEJLESZTÉSE

A korábbiakban ismertetésre kerültek a jelenleg jellemzően elérhető sugárforrás-felderítésre kifejlesztett drónok tulajdonságai. A fejlesztések során sajnos nem vették kellően figyelembe az elveszett források tulajdonságait. A piacon kapható drónok csak nagy magasságban használhatóak, mivel alacsonyabb repülés mellett valószínűsíthetően a rotorkok által keltett légörvény széthordhatja a sugárforrást. Emiatt a detektorok érzékenysége drasztikusan lecsökken, ugyanis az (1) egyenlet alapján látható, hogy a mért dózisteljesítmény a távolság négyzetével fordítottan arányos. Emiatt egy nagy aktivitású árnyékolt forrást már nem képes kimutatni a detektor. Amennyiben a drón a sugárforrás közelébe repül és belép annak nagy dózisterébe, akkor megnő annak a valószínűsége, hogy a drón irányíthatatlanná válik. Ekkor a drón gyakorlatilag bárhova zuhanhat, akár élő személyre, akár magára a forrásra is, ami értelemszerűen nagy veszélyforrás, a teszteleseknél, bemutatóknál emiatt szükséges a forrás megfelelő védelme. A 2/2022 (IV.29.) OAH rendelet 41.§ értelmében:

„(3) A radioaktív sugárforrás zártságát veszélyeztetni (nem rendeltetésszerű mechanikai behatással, hevítéssel, és egyéb módokon) tilos.”

Például egy 40 MBq-es árnyékolatlan ^{137}Cs forrás dózisteljesítménye 5 m távolságban a természetes háttér értékkel megegyező, vagyis 0,12 $\mu\text{Sv/h}$. Ha ugyanezt a forrást 10

cm-re tudnánk megmérni a mért érték a következő lenne: $305 \mu\text{Sv/h}$. A számokból látható, hogy az emelkedés igen szignifikáns, nagyjából 2541-szer magasabb érték mérhető 10 cm-ről (5. ábra) [11].

5. ábra: Sugárforrás várhatóan mérhető dózisteljesítménye, [11]

Az ADR (közúti veszélyesanyag szállítási kódex) értelmében a nagy aktivitású forrásokat árnyékolt sugárforrás tartóban kell szállítani. III-as értékű, sárga bárcát (ADR szerinti sugárveszélyt jelző tábla) kell a sugárforrás tartóra felhelyezni, ebben az esetben a tartó felületi dózisteljesítménye maximálisan 2 mSv/h lehet. Amennyiben egy nagy aktivitású ($A=19 \text{ GBq}$) ^{60}Co sugárforrást szállítanak 10 cm vastagságú ólom konténerben, akkor annak felületi dózisteljesítménye épp a maximálisan megengedett 2 mSv/h .

A bűnügyi szcenárió értelmében, ha a forrás egy baleset vagy rablás során kikerül a környezetbe, akkor a felderítésnél annyi tudható, hogy a forrás maximális felületi dózisteljesítménye 2 mSv/h . A számítást a Radpro kalkulátorral elvégezve 5 m távolságban a forrás dózisteljesítmény járuléka $0,94 \mu\text{Sv/h}$, azaz a természetes háttér nagyjából 9-szerese. Ebben az esetben a drónra közvetlenül felszerelt detektorral egyértelműen kimutatható a sugárforrás jelenléte. Ugyanakkor amennyiben a drón erdős terület felett repül, akkor pl. 15 m repülési magasságon a drón által mért dózisteljesítmény a háttérrel megegyező érték kb. $0,1 \mu\text{Sv/h}$ és ekkor már nem kimutatható a sugárforrás.

Ugyanezt a számítást elvégezve II-es sárga bárcára, ahol a maximálisan megengedett felületi dózisteljesítmény $0,5 \text{ mSv/h}$ látható, hogy ekkor ugyanebben a forrástartóban maximum 4771 MBq ^{60}Co forrás szállítható. Ennek a forrásnak árnyékolással együtt 5 m távolságban a dózisteljesítmény járuléka $0,24 \mu\text{Sv/h}$, azaz kb. a háttér 2-szerese. Ebben az esetben már igen nehéz egyértelműen kimutatni a sugárforrást, mivel a példában feltételezzük, hogy a drón pont a sugárforrás felett halad el kis sebességgel. Nagyobb sebesség esetén pásztázó üzemmódban, amikor a két repülési pont távolsága 10 m és a sugárforrás épp a két

elhaladási útvonal közé esik (5 m) akkor a tényleges forrás-detektor távolság 7 m. Ekkor a mért dózisteljesítmény $0,12 \mu\text{Sv/h}$, azaz a természetes háttér érték.

A fenti példából látható, hogy a közvetlen drónra szerelt dózisteljesítmény mérővel csak a legnagyobb aktivitású sugárforrások észlelhetőek.

Az általunk tervezett fejlesztésben a drónt olyan dózisteljesítmény mérővel kívánjuk ellátni, ami nincs a drónra rögzítve, hanem repülés közben leereszthető egy csörlő segítségével, így a fent említett sugárvédelmi problémák kiküszöbölhetőek és ezáltal a drón tényleges bevetethetősége, használhatósága megnő (6. ábra).



6. ábra: Drónról leereszthető mérőeszköz, illusztráció, (saját szerkesztés MI felhasználásával)

A felderítő drónra szerelt mérőeszközök tesztelése:

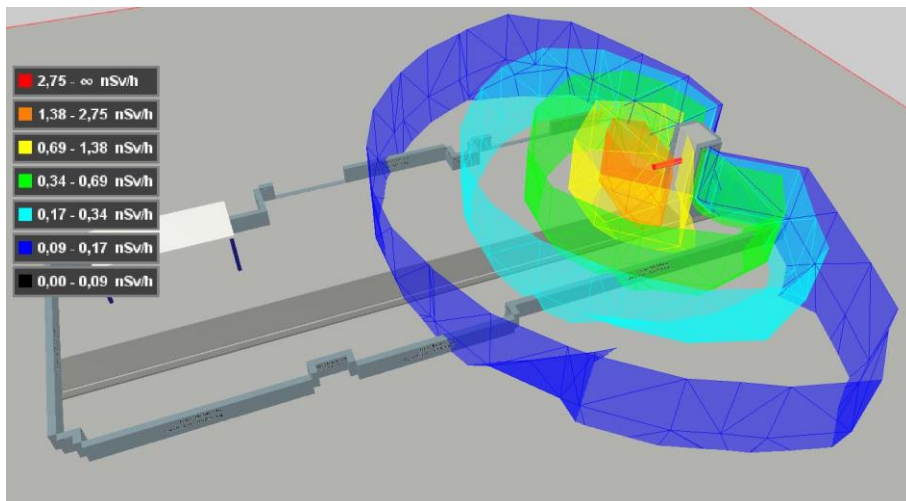
A korábbi drónos felderítési tapasztalatokból láthattuk, hogy a fejlesztők sokszor kihagyják a mérőeszközök tesztelését. A mérőeszközök sokszor egyénileg fejlesztett eszközök. Amennyiben a tesztelés hiánya miatt nem ismert a mérőeszköz mérési tartománya, úgy könnyen előfordulhat, hogy a drón a sugárforrás felett repül el nagy dózisteljesítményű térben, akkor a készülék méréshatárát túllépheti a mérendő dózisteljesítmény szint. Ekkor a szonda nem a megfelelő értéket jelzi, hanem az emelkedett háttérrel. Ebben az esetben a forrástól távolodva pl. egy körgyűrűn a szonda már bejelez, de több hamis jelzést ad. Ilyenkor a földi felderítő nem egy nagy sugárforrást észlel, amit kellene a valóságban, hanem attól távol több mérési pontban azt a következtetést lehet levonni, hogy több kisebb sugárforrás van kb. körgyűrű szerűen szétszóródva az adott felderítési zónában.

Az általunk a drón fedélzetére szánt dózisteljesítménymérő GM szondát az EK SBL tesztlaboratóriumában teszteltük. A tesztekben három fő mérési tulajdonságra koncentráltunk:

- A mérőeszköz mérési pontossága alacsony dózisteljesítményű terek esetén
- A mérőeszköz mérési dinamikájának vizsgálata

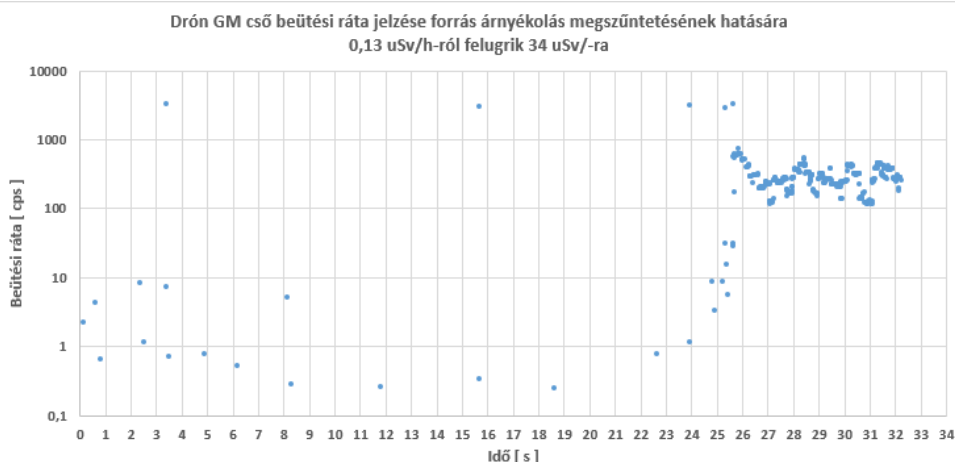
- A dózisteljesítmény mérő reakciója hirtelen dózisteljesítmény növekedés esetén
- Ismételt mérési tesztek.

Amennyiben egy pontszerű, árnyékolatlan sugárforrás dózisterébe lép a drón, akkor az (1)-es egyenlet értelmében a dózisteljesítmény lassan, majd egyre gyorsabban kezd el emelkedni (7. ábra).



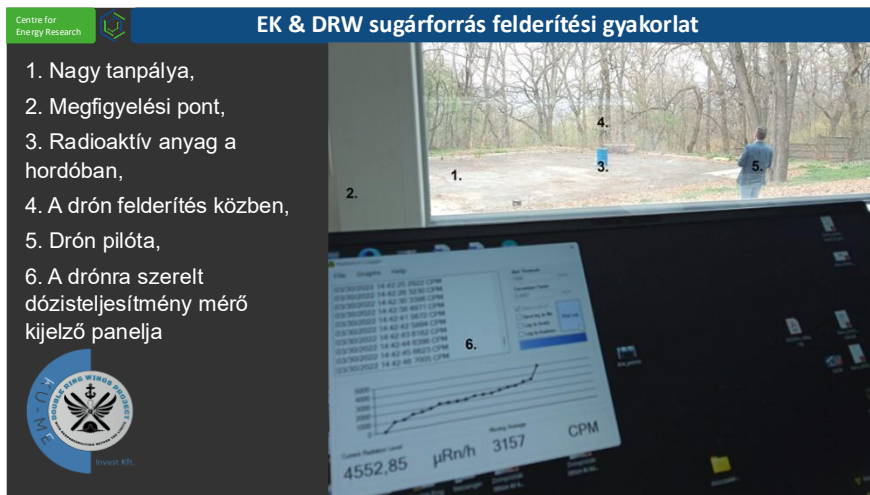
7. ábra: Pontszerű sugárforrás dózisteljesítmény tere, (saját szerkesztés)

Fontos tisztában lenni a mérőeszköz érzékenységevel, vagyis a kis dózisteljesítményű terek mérési képességeiről. Tesztjeinkben megvizsgáltuk a fedélzetre tervezett mérőeszköz mérési képességét. Például az adott sugárforrás árnyékolását megszüntettük, így a készüléket a természetes háttérhez képest 261-szer magasabb dózisteljesítménynek tettük ki. A természetes háttérrel a 8. ábrán is láthatóan igen nagy szórással méri a készülék. Emiatt kis dózisteljesítményt létrehozó kis aktivitású vagy nagy aktivitású, de megfelelően árnyékolott sugárforrások keresésére nem alkalmas. Ugyanakkor a hirtelen dózisteljesítmény növekedésre megfelelően reagál a detektor, és emellett nagyságrendben is megfelelően mér a mérőeszköz.



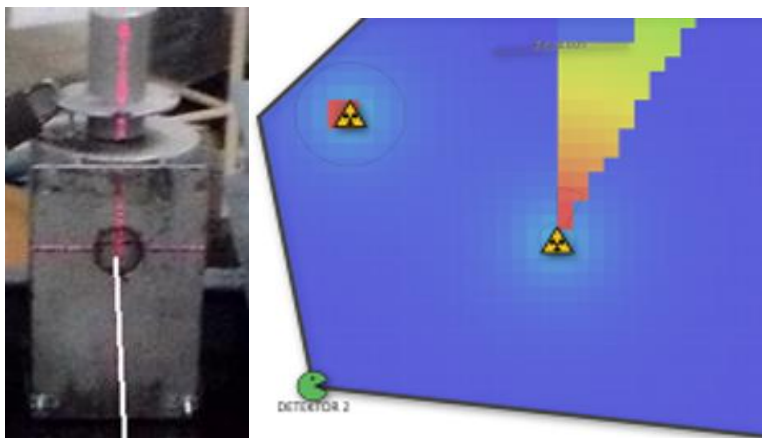
8. ábra: A drónra szerelt dózisteljesítmény mérő teszt eredményei, (saját szerkesztés)

A fejlesztett drón dózisteljesítmény növekedés-csökkenés dinamikáját is megvizsgáltuk. A lassan reagáló eszköz nem használható, vagy csak igen korlátozottan alkalmazható felderítésre, mivel a drón felderítés közben eleve alacsony sebességgel mozog. Ilyen esetben a mérőeszköz dózistérbe lépésekor nem mér, ezért nem tudja kimutatni a radioaktív anyag jelenlétét. A teszt során a HUN-REN EK nagy tanpályáján egy hordóba helyeztük a sugárforrást. A drónt a forrás felett reptettük és a kijelzett értékek alapján megfigyeltük a mért dózisteljesítmény időbeli változását. A drón sugárforrás közelébe érésakor a dózisteljesítmény azonnal elkezdett emelkedni, és a forrást elhagyva már másodpercek alatt a mért érték a természetes háttér értékre tér vissza. Így elmondható, hogy a detektor megfelelt a dinamikus teszt elvárásainak (lásd 9. ábra).



9. ábra: A drónra szerelt dózisteljesítmény mérő tesztelése, (saját szerkesztés)

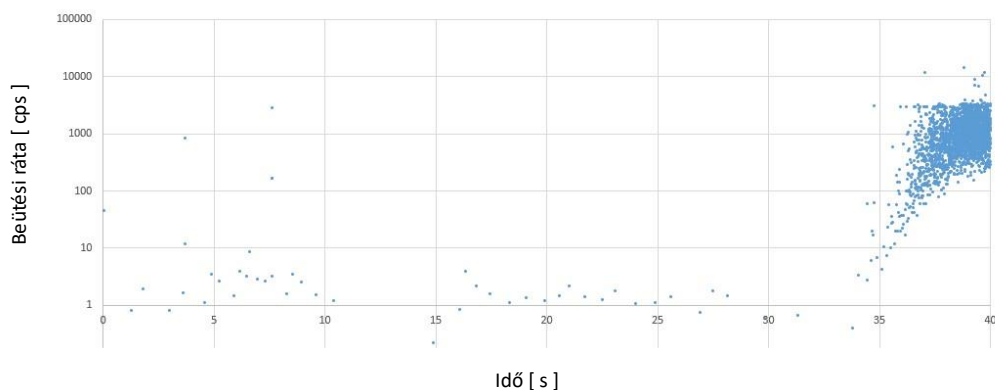
Előfordulhat olyan szcenárió, hogy egy nagy aktivitású sugárforrás a forrástartóban marad, azonban annak mechanikája nem a zárt pozícióban helyezkedik el, hanem a sugárforrás kivezérelt állapotban tartózkodik. Így egy nyaláb irányú nagy dózisteljesítményű tér jön létre, és a nyalábon kívül a dózisteljesítmény természetes háttér értékű (10. ábra).



10. ábra: Részlegesen árnyékolt radioaktív sugárforrás dózisteljesítmény tere, (saját szerkesztés)

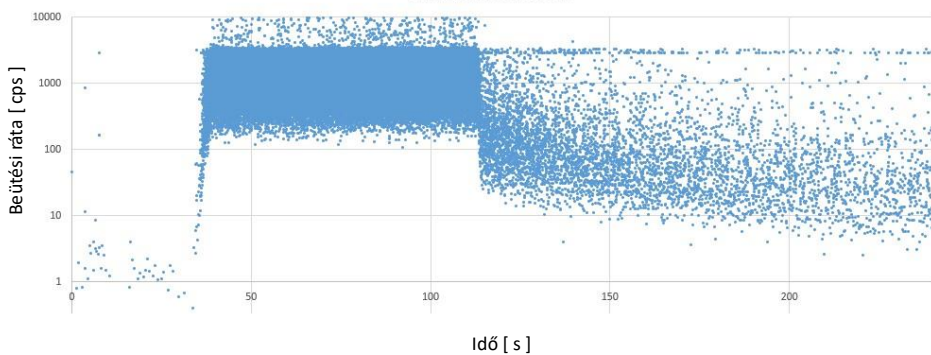
Ilyen esetben a drónos felderítés során a dózisteljesítmény mérőkészülék beléphet a nagy dózisteljesítményű térbe. Ilyen esetben a dózisteljesítmény magasabb volt, mint a készülék kimutatási határa, illetve a hirtelen növekedést nem tudta a mérőeszköz megfelelően kezelni. Így természetes háttér értéket jelzett, míg a forrástól távolabbi mérési pontokon pedig bejelezett a készülék. Ez megtévesztheti a földi megfigyelőket.

A fenti esetet szimulálva a HUN-REN EK Teszt Laboratóriumában végeztünk tesztek, melyek során a természetes háttér értékét hirtelen megemeltük 1 mSv/h értékre és megvizsgáltuk a mérőeszköz detektáló képességét (11. ábra). Itt megjegyzendő, hogy bizonyos GM szondáknak van olyan tulajdonsága, miszerint túlterhelés esetén a készülék a természetes háttérre jelzi, ami szintén megtévesztheti az operátort.



11. ábra: A drónra szerelt dózisteljesítmény mérő túlterhelése, (saját szerkesztés)

A többszörös mérési teszt során a sugárforrást leárnyéktoltuk és megvizsgáltuk, milyen gyorsan áll vissza a detektor a háttér értékre (12. ábra).



12. ábra: A dózisteljesítmény mérő mért értékei a sugárforrás leárnnyékolását követően, (saját szerkesztés)

A 12. ábra alapján látható, amennyiben a drón megtalálja a nagy dózisteljesítményű sugárforrást, és elhalad a tér felett, akkor a készüléknek szükséges pár perc, mire visszaáll a természetes háttér érték jelzésére.

Megállapítható, hogy a drón fedélzetére tervezett GM szonda korlátozottan megfelel a felderítési elvárásoknak, azaz csak nagy dózisteljesítmény mérésére alkalmas és relaxációja időbe telik. Egy ilyen GM szonda olyan olcsóbb felderítő drónokra lehet ideális, amivel megvizsgálható, hogy az adott területen van-e nagy dózisteljesítményű zóna.

A DoziMobil mérőrendszer:

A HUN-REN EK által kifejlesztett DoziMobil rendszer is felszerelhető a drónra. Ez a készülék képes online továbbítani a mért jeleket és az értékek megjeleníthetők egy térképen (13. ábra).



13. ábra: A HUN-REN EK által fejlesztett „DoziMobil” dózisteljesítmény térkép megjelenítésre alkalmas felderítő mérőeszköze, (saját szerkesztés)

DRÓN PILÓTÁK OKTATÁSA A VIRTUÁLIS SUGÁRFORRÁS RENDSZER SEGÍTSÉGÉVEL

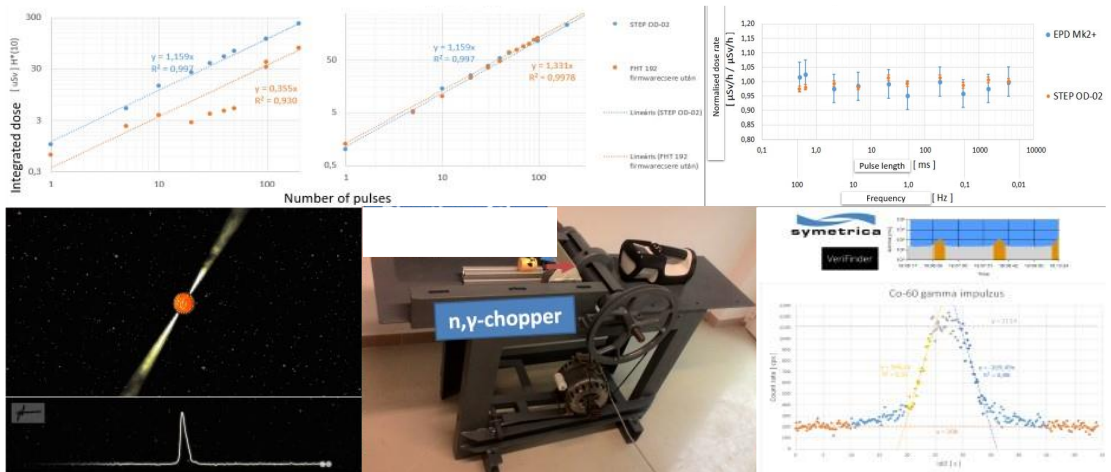
A HUN-REN EK SBL-ben kifejlesztettünk egy ún. virtuális sugárforrás rendszert, mely egy adó-vevő egységből áll és képes a radioaktív sugárforrás-dózisteljesítményt mérő mérőeszköz valósághű szimulálására. A rendszer folyamatosan méri az adó (virtuális forrás)-vevő (virtuális dózisteljesítménymérő készülék) közötti távolságot, és az (1)-es egyenlet alapján másodpercenként kiszámolja a virtuális dózisteljesítmény értékét, a beprogramozott nuklid aktivitása alapján. A rendszer valósághűen imitálja a sugárforrást és a dózisteljesítmény mérő készüléket, ugyanakkor teljesen biztonságos. Ezért a drónpilóta-képzésben is felhasználható a rendszer (14. ábra).



14. ábra: A virtuális radioaktív rendszer „dózisteljesítmény mérő” egysége, (saját szerkesztés)

DÓZISTELJESÍTMÉNY MÉRÉS PULZÁLT TEREKBE DRÓN SEGÍTSÉGÉVEL

Speciális részecskegyorsítók esetén felmerült az igény (MonRob: Radiation Monitoring based on a ROBot Fleet), hogy a gyorsítási folyamat során keletkező pulzált tereket mérni lehessen drónra szerelt speciális mérőeszközzel. A HUN-REN EK SBL tesztlaboratóriumában kifejlesztésre került egy ún. Gamma-chopper, mely segítségével lehetséges detektor teszteket elvégezni ismert pulzált térben (15. ábra).



15. ábra: A HUN-REN EK által fejlesztett Gamma-chopper, (saját szerkesztés)

Az eddigi tesztek alapján a STEP OD-02 kézi műszer alkalmas pulzált terekben való mérésre, ezen eszköz felszerelhető a HUN-REN EK-DRW drónjára (16., 17. ábra).

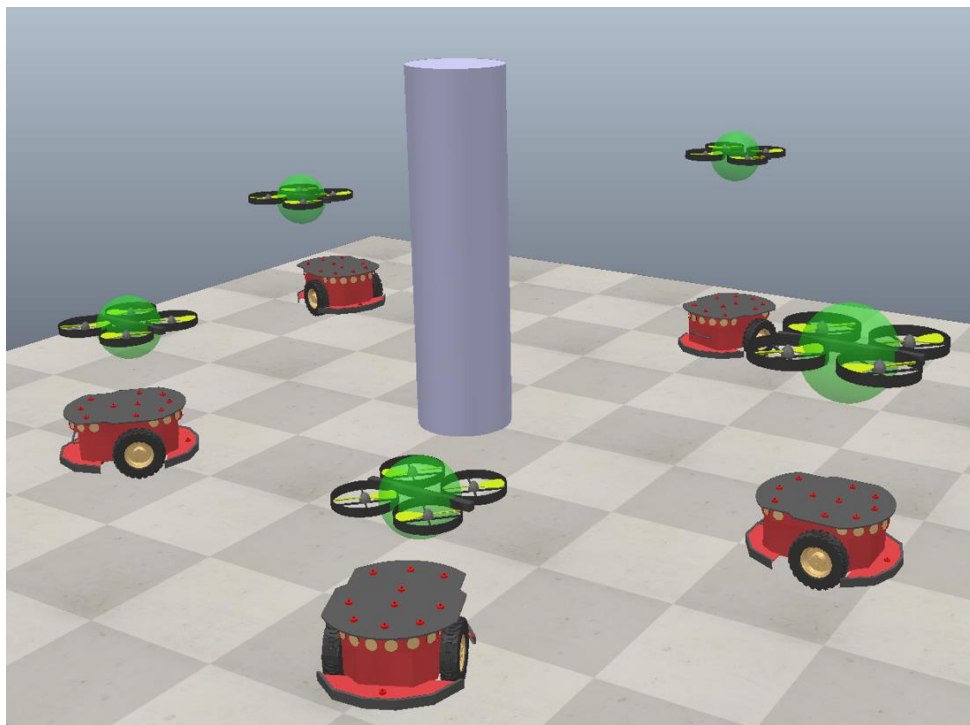


16. ábra: A HUN-REN EK és a DRW által fejlesztett drón, (saját szerkesztés)



17. ábra: A pulzált terek mérésére alkalmas STEP OD-02 kézi mérőeszköz, (saját szerkesztés)

A gyorsító berendezések közelében a töltött részecskegyorsítás során nagy elektromágneses impulzus (EMP) keletkezik, ami a drón elektronikáját és ezáltal az irányíthatóságát is megzavarhatja. Ezen hatás miatt fontos, hogy az általunk fejlesztett drón és a mérőeszköz nincs egybe építve. A részecskegyorsító besugárzó termében a besugárzás alatt szelvényzet nem tartózkodhat, így a drón irányítását a besugárzó termen kívülről kell megoldani. Ez kivitelezhető a besugárzó terem irányító szobájából, mivel a pilóta a teremben lévő megfigyelő kamerák és a drónra szerelt kameraképek segítségével tud tájékozódni. A drónt a besugárzó terem belépési pontjánál elhelyezett adó segítségével lehet távirányítani. A készülék a nagy prompt dózistér és EMP miatt nem repülhet közvetlen a besugárzó kamerák közelében (18. ábra).



18. ábra: A pulzált terek mérésére robotok által, a részecskegyorsító besugárzó termében, illusztráció, (saját szerkesztés)

A VESZÉLY TERMÉSZETÉNEK MEGHATÁROZÁSA UGV ÉS UAV ALKALMAZÁSÁVAL

A módszerek célja kifejezetten olyan komponensek alkalmazásán alapul, amelyek használata együttes üzemeltetésük nélkül is rutinszerű a speciális rendvédelmi szervek esetében. Együttes használatuk azonban új távlatot nyit meg rendvédelmi célú felhasználásuk során.

Egy előzetes felderítés, művelet közbeni monitorozás, vagy bűnügyi, katasztrófavédelmi összefüggésű sugárzóanyag felkutatása során fontos annak ismerete, hogy a potenciális veszély természetes (NORM), ipari, orvosi, esetleg nukleáris felhasználásra alkalmas sugárforrásból származik. Ennek közelítő meghatározása, illetve a hozzá kapcsolódó dózisteljesítmény becslése alapvetően meghatározhatja a speciális egységek beavatkozásának taktikáját.

A dózisteljesítmény becslésére, meghatározására azért van szükség, hogy nagy biztonsággal meghatározható legyen egy művelet során a forrás közelében eltölthető idő, a biztonságos terület határa, a kitett terület és az esetleges szennyezett zóna mérete. Ez a feladat végrehajtható talajról és levegőből egyaránt. Mindkét esetben van lehetőség olyan detektor, vagy detektor kombináció alkalmazására, amely(ek) a hiteles dózis/dózisteljesítmény becslésére, illetve a forrás kategorizálására is alkalmasak. Ebben az esetben olyan UGV átalakítást teszteltünk, amelyhez Thermo Scientific FH-40-hez csatlakoztatott külső környezeti dózismérő szondát alkalmaztunk egy FLIR First Look UGV-re rögzítve. A külső

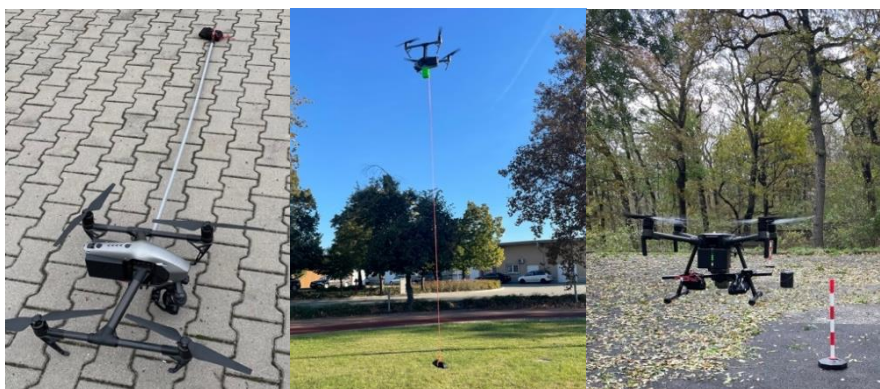
szondát 1 m magasságban rögzítettük egy 3D nyomtatott állvány segítségével, valamint a műszer kijelzőjét analóg kameraképen továbbítottuk távolra az UGV kezelőhöz minimális késleltetéssel. Az UGV ugyan kis méretű, de lehetőség nyílt még egy spektrometriás képességű, CsI detektort használó Kromek D3S műszer elhelyezésére is a potenciális veszélyt jelentő sugárzóanyag kategorizálása, valamint többsatornás gázérzékelő műszer csatlósára a levegő általános minőségének monitorozása érdekében (O_2 , CO , CO_2 , robbanásveszélyes gázok, Cl_2 , stb.).

Ez esetben lehetőség nyílik az UGV-vel előzetes felderítésre, illetve az adott művelet során telepítve alkalmazva a környezet folyamatos monitorozására egyaránt (19. ábra).



19. ábra: Az UGV-re rögzített detektor és az analóg jelátvitel, (saját szerkesztés)

Az UAV alkalmazása esetében fontos volt letesztelni a detektort dinamikus környezetben (mozgás során), szimulált, laboratóriumi környezetben, illetve terepi viszonyok között (20. ábra). A rotorszél által keltett por felkavarodása, ezáltal az ideális reptetési magasság megállapítása szintén fontos szempont volt a tesztek során annak érdekében, hogy a repülés során felmerülő kockázati tényezőket valós körülmények között határozhassuk meg.

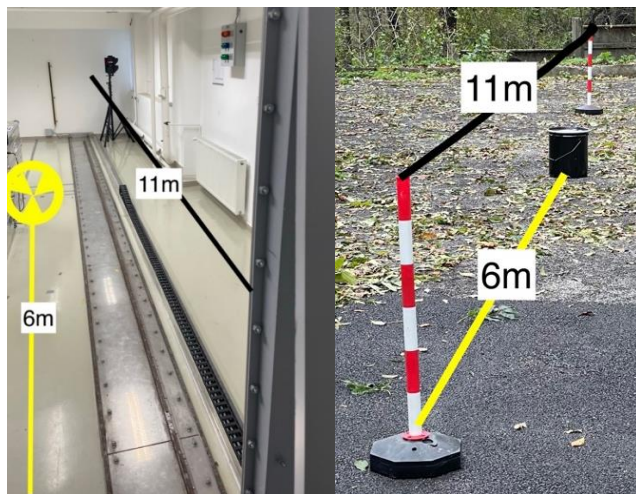


20. ábra: Az UAV-ok tesztelése során (saját szerkesztés)

A laboratóriumi környezetet a HUN-REN EK SBL tesztelő laboratóriuma (TESZLA) biztosította (21. ábra). A TESZLA segítségével szimulálni lehetett az UAV egyenletes mozgását vonalpályán úgy, hogy a dinamikus pálya mozgó részén különböző magasságokba került rögzítésre a Kromek D3S detektora, a sugárforrást pedig a pálya közepére helyeztük.

A mérések alátámasztották a detektor érzékenységét, de a riasztási algoritmus miatt a riasztási esemény tovább megmaradt az eszközben, így egy elnyújtott dózisteljesítmény-idő görbét kaptunk. Az UAV-ra rögzített detektor esetében a modellezett paramétereket ismételtük meg terepi környezetben, több reptetési magasságban, amely tesztek során a laboratóriumi eredményekkel összhangban lévő eredményeket kaptunk.

Mind az UGV, mind az UAV integráció sok fejlesztési lehetőséget biztosít a későbbi felderítő munka támogatására. Ilyen fejlesztési irányok lehetnek: a detektor és a „hordozó” eszköz informatikai integrálása a koncentrált adattovábbítás érdekében, a geolokációs adatok és a detektorok mért értékeinek összefűzött kezelése a valós idejű, illetve a megismételhető mérések, detektálások kivitelezése érdekében.



21. ábra: A dinamikus tanpálya (TESZLA) és az UAV tesztpálya ábrázolása, (saját szerkesztés)

DEKONTAMINÁLÓ DRÓN ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGE

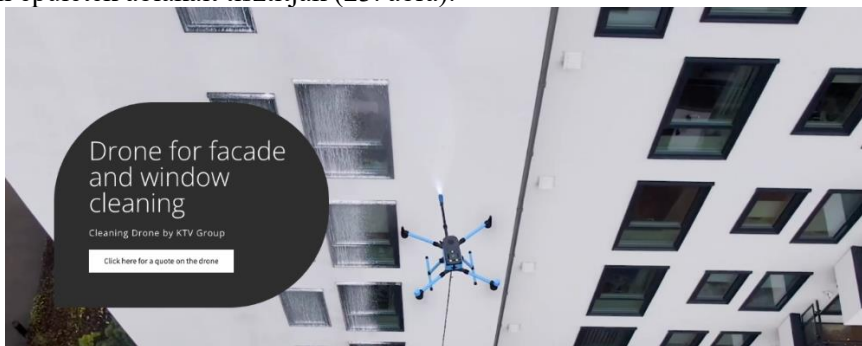
Egy piszkos bomba felrobbanását követően, vagy egy nukleáris baleset következményeként kiterjedt terület szennyeződhet el radioaktív anyaggal. A felületekre kitapadt szennyezés mentesítése sokszor időigényes feladat. Emiatt a dekontaminátorok a dekontamináláskor sok időt töltenek közel a radioaktívan szennyezett területhez (22. ábra). A sugárvédelem ALARA alapelve értelmében a külső sugárterhelés csökkenthető a távolság-idő-árnyékolás védelem alkalmazásával. A dekontaminálás során mindenképp a helyszínen kell tartózkodni, mivel a kézi permetezőből csak így lehet a dekontamináló folyadékot a szennyezett felületre juttatni. A dekontaminálással nem lehet sietni, mert a terep nehezen járható és a dekontamináló felszerelés súlya is nagy. Emiatt az ólomárnyékolás sem jöhet szóba, mert hosszabb használat esetén a beavatkozó elfáradhat, ami ergonómiai szempontból nem kívánatos. A dekontamináló folyadék permetezése azért fontos, mert egyrészt így

a felület szennyezettsége csökkenthető, másrészt a folyadék megköti a radioaktív részecskéket és így a kicsapódás mértéke jelentősen csökken. Ezáltal a környezet további elszennyeződése és az élőlények, emberek inkorporációja minimalizálható.



22. ábra: Dekontaminátor Csernobilban, [12]

Jelenleg nemzetközi szinten nincs dekontaminációra alkalmas drón, pedig a fent említett tényezők miatt sugárvédelmi szempontból jelentősen növelhető lenne a külső dózisterhelés csökkentése, amivel egyben kiküszöbölhető lenne élő személy alkalmazása is a tevékenység elvégzésére. Azonban az alpin technikában alkalmaznak drónokat, melyekkel általában épületek ablakait tisztítják (23. ábra).



23. ábra: Épülethomlokzat tisztítására használt drón, [13]

A fenti ábrán látható takarító drón jó kiindulási alap lehet. Azonban a radiológiai felderítésnél a drón nem mehet a szennyezett felülethez közel, mivel:

- a drón jelentősen elszennyeződhet

- a drón által keltett légörvény felkavarja a szennyezést és széthordja azt.

A dekontaminálás folyamata a drón megfelelő átalakításával, a permetezőcső meghosszabbításával és a drón kiegyensúlyozásával, ezt követően pedig egy külsős akkreditált szervezet által hitelesített tanúsítvánnyal biztonságosan és hatékonyan elvégezhető.

A PISZKOS DRÓN IMITÁLÁSA

A drónokat széles körben alkalmazzák háborús helyzetben. Ezért sajnos nem kizárható, hogy egy drónra radioaktív anyagot tartalmazó bombát szerelnek (piszkos drón – dirty drone), melyet a kívánt területre irányítanak és ott vagy becsapódik, vagy felrobbantják. Így távolról lehet piszkos bombamerényletet elkövetni. A HUN-REN EK egy ilyen eseményt képes szimulálni a virtuális radioaktív rendszer segítségével, mely során a drónt egy kiválasztott helyszínre irányítva robbanást lehet imitálni, majd a virtuális rendszert élesítve felületi szennyezettséget lehet imitálni. A kivonuló egységek a virtuális felületi szennyezettség mérő segítségével valósághűen tudják begyakorolni a terület felderítését és annak dekontaminálását.

ÖSSZEFOGLALÓ

A HUN-REN EK SBL számos más feladata mellett a radioaktív anyagok felderítésével is foglalkozik. Az eljárásrend megalkotása és a forráskeresési bemutatók során felmerült az igény, hogy az elsődleges felderítést drónra szerelt speciális mérőeszközökkel kelene megoldani. Ugyanakkor ilyen speciális drón akkoriban nem állt rendelkezésre.

A dróntechnológia az elmúlt években jelentősen fejlődött, jelenleg is elérhetőek már sugárforrás-felderítésére alkalmas mérőeszközökkel ellátott drónok. Megjegyzendő, hogy a mérőeszközöket a drónokhoz illesztik, emiatt ezen kialakítás jelentősen limitálja ezen eszközök tényleges bevethetőségét egy elveszett forrás felkutatásához, mivel a forrás nyílnak minősül, illetve dózistere ismeretlen. Ezért csak egy minimum limitált magasságban repülhetnek a drónok, így megakadályozható a forrás szétfújása a drón által. Valamint elkerülhető a dózistér hirtelen emelkedéséből adódó esetleges irányíthatatlanság. A limitált magasságban történő felderítés miatt ezen rendszerek detektáló képessége jelentősen romolhat, így csak a nagyobb magasságban is jelt adó sugárforrások felderítésére alkalmasak.

A HUN-REN EK és a DRW közös drónfejlesztésénél a felderítés során a sugárvédelmi szempontokat is figyelembe vettük. A mérőeszköz a drónról egy speciális kábelon leengedhető, így a jelenlegi limitáló tényezők megszűntek, valamint jelentősen növelhető a drónos sugárforrás mérési érzékenysége. A fedélzetre szerelt dózisteljesítmény-mérő mérőeszközöket alapos teszteknek vettettük alá, így meg tudunk bizonyosodni, hogy a mérőrendszer minden speciális esetben képes-e megfelelően mérni a jeleket, ezáltal a földi megfigyelők helyes következtetéseket vonhatnak le. A jelenleg drónra szerelt dózisteljesítmény-mérő eszköz használhatósága limitált, de nagy dózisteljesítményű terek felkutatására alkalmas. Egy érzékenyebb detektor használatával kisebb dózisteljesítmények mérése is megoldható.

A drónra speciális pulzált tér mérésére alkalmas tesztelt mérőeszközt szerelve, a részecskegyorsítás során kialakuló prompt dózistér is mérhetővé válik a besugárzó termeken belül, anélkül, hogy a drónt veszélyeztetné a magas EMP és prompt dózistér elektronikára gyakorolt hatása. A jelenleg elérhető épülethomlokzat-takarító drónok sugárvédelmi szempontú átalakításával, továbbfejlesztésével hatékonyan, biztonságosabban elvégezhető

a dekontaminálás folyamata. A HUN-REN EK által fejlesztett radioaktív anyagot, szennyezettséget imitáló virtuális rendszer segítségével a drónpilóta-képzés kiegészíthető kifejezetten radioaktív anyagok keresésére, valamint a piszkos drón által okozott felületi szennyezettség detektálása és annak dekontaminálása is begyakorolhatóvá válik.

IRODALOM

- [1] W. Kluwer, „490/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet a hiányzó, a talált, valamint a lefoglalt nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos bejelentésekről és intézkedésekről, továbbá a nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos egyéb bejelentést követő intézkedésekről”, *Jogtár*, Jun. 29, 2022. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1500490.kor>
- [2] É. Kovács-Széles et al., „How to respond a crime scene contaminated with radioactive material?”, *Belügyi Szemle, Special Issue 3, 2020*, doi: 10.38146/BSZ.SPEC.2020.3.3
- [3] Cs. Varga, „Az FBI és az Interpol is emeli kalapját a magyar helyszínelők előtt”, *Index*, Apr. 15, 2022. [Online]. Elérhető: <https://index.hu/belfold/2022/04/15/fbi-interpol-magyar-helyszinelok-beecs-nemzetkozi-konferencia-sugarzo-anyagok/>
- [4] A. Miklya, „Sugárzásveszély”, *Kékfény*, Jan. 10, 2022. [Online]. Elérhető: <https://www.youtube.com/watch?v=vbNwCNtQpmQ&t=1s>
- [5] INCLUDING H2020 Project, „INCLUDING Project Exercise in Budapest”, *Including website*, June 16, 2022. [Online]. Elérhető: <https://www.including-h2020.eu/movies/48-including-project-exercise-in-budapest-june-2022.html>
- [6] CAEN, „GAMON-Drone”, *CAEN website*, Jan. 15, 2021. [Online]. Elérhető: <https://www.caen.it/products/gamon-drone/>
- [7] Go2fly website, „Drónos szenzor segítheti a radioaktív sugárzás észlelését”, *Dróntechnológiai – Hírek*, Nov. 7, 2022. [Online]. Elérhető: <https://go2fly.hu/dronos-szenzor-segitheti-a-radioaktiv-sugarzas-eszleleset/>
- [8] W. Kluwer, „3/2022 (IV. 29.) OAH rendelet a radioaktív anyagok nyilvántartásának és ellenőrzésének rendjéről, valamint a kapcsolódó adatszolgáltatásról”, *Jogtár*, May 1, 2022. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2200003.OAH&txtreferer=00000001.txt>
- [9] W. Kluwer, „190/2011. (IX. 19.) Korm. rendelet az atomenergia alkalmazása körében a fizikai védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről”, *Jogtár*, July 1, 2022. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100190.kor>
- [10] W. Kluwer, „2/2022. (IV. 29.) OAH rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről”, *Jogtár*, Dec. 11, 2024. [Online]. Elérhető: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2200002.OAH&txtreferer=00000001.txt>
- [11] Radpro, „Gamma Emitter Point Source Dose-Rate to Activity and Shielding Calculations (In Air)” *Radpro calculator website*, Aug. 14, 2026. [Online]. Elérhető: <http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx>
- [12] A. Bendix, „HBO’s ‘Chernobyl’ just won 10 Emmys – here’s what it gets right (and wrong) about the world’s worst nuclear power plant accident”, *Business Insider*, Sep. 23, 2019. [Online]. Elérhető: <https://www.businessinsider.com/chernobyl-hbo-whats-true-myths-2019-5>

- [13] KTgroup, „Cleaning drone ready for sale”, *KTgroup website*, Oct. 14, 2021. [Online]. Elérhető: <https://ktvgroup.no/en/cleaning-drone-ready-for-sale/>
- [14] K. Bodor and P. Zagyvai, „Lost radioactive source exploration training capabilities at the Centre for Energy Research (EK)”, *Biztonságtudományi Szemle*, vol. 4, no. 4., pp. 81-96, 2022. [Online], Elérhető: <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/252/228>

**DIAGNOSTIC EVALUATION
OF A PARASITIC HEAT RELEASE
ZONE IN GROUND SOURCE HEAT
PUMP SYSTEMS****PARAZITA HŐLEADÁSI ZÓNA
DIAGNOSZTIKAI ÉRTÉKELÉSE
TALAJSZONDÁS HŐSZIVATTYÚS
RENDSZEREKBE**ZÓNAI Viktor¹ – SÁNTA Róbert²**Abstract**

The operational reliability of ground source heat pump systems is strongly influenced by the actual thermal behaviour of the borehole heat exchanger. In heating mode, a parasitic heat release zone may develop along the return leg, especially in shallow sections, which can reduce the useful source-side temperature level and affect system performance. This study evaluates the robustness of the exothermic–endothermic transition depth derived from multi-depth temperature measurements. The analysis focuses on the effects of time-window selection, exclusion of initial transients, uncertainty-based thresholding, sampling reduction and missing-data handling. The results indicate that the transition depth can serve as a robust spatial diagnostic indicator under appropriate operating and data-quality conditions. Performance-related indicators, such as average parasitic heat loss and source-side temperature equivalent, are more sensitive to data-processing choices.

Keywords

ground source heat pump, borehole heat exchanger, parasitic heat release, transition depth, diagnostic reliability

Absztrakt

A talajszondás hőszivattyús rendszerek üzembiztonságát jelentős mértékben befolyásolja a talajszonda valós hőtechnikai viselkedése. Fűtési üzemben a visszatérő ág sekélyebb szakaszain parazita hőleadási zóna alakulhat ki, amely csökkenti a hasznos forrásoldali hőmérséklet szintet és kedvezőtlenül befolyásolja a rendszer működési feltételeit. A tanulmány a többmélységű hőmérsékletmérésekből meghatározott exoterm–endoterm átmeneti mélység robusztusságát értékeli. A vizsgálat az időablak-választás, a kezdeti tranziens szakasz kizárása, a bizonytalanságalapú küszöbölés, a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok kezelésének hatására fókuszál. Az eredmények alapján az átmeneti mélység megfelelő üzemi és adatminőségi feltételek mellett robusztus térbeli diagnosztikai indikátorként alkalmazható. A teljesítményjellegű mutatók, például az átlagos parazita veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték, érzékenyebben reagálnak az adatfeldolgozási beállításokra.

Kulcsszavak

talajszondás hőszivattyú, furathőcserélő, parazita hőleadás, átmeneti mélység, diagnosztikai megbízhatóság

¹ zonai.viktor@uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0008-5415-8096 | PhD candidate, Doctoral School on Safety and Security Sciences, Óbuda University | PhD hallgató, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Óbudai Egyetem

² santar@uniduna.hu | ORCID: 0000-0001-7559-2758 | full professor, Department of Mechanical Engineering and Material Sciences, Institute of Engineering Sciences, University of Dunaújváros | egyetemi tanár, Műszaki Intézet, Dunaújvárosi Egyetem

BEVEZETÉS

A talajszondás hőszivattyús rendszerek energiahatékony és alacsony környezeti terhelésű hőellátási megoldások, amelyek teljesítményét nemcsak a hőszivattyú berendezés névleges paraméterei, hanem a primer oldali hőcserélő, vagyis a talajszonda valós üzemi viselkedése is meghatározza [1], [2], [3], [4], [5]. A mérnöki gyakorlatban a talajszondákat gyakran teljes furathosszra vonatkozó, átlagolt jellemzőkkel írják le, ezek azonban csak korlátozottan mutatják meg, hogy a hőáram hogyan oszlik meg mélység szerint [1], [2], [6], [7], [8], [9], [10]. Emiatt egyre nagyobb szerepe van azoknak a monitoring- és kiértékelési módszereknek, amelyek a lokális hőátadási viszonyokat is értelmezhetővé teszik [7], [8], [10], [11].

Fűtési üzemben a visszatérő ágban áramló hőhordozó közegnek ideális esetben hőt kellene felvennie a környező talajból [1], [2]. Valós üzemi körülmények között azonban előfordulhat, hogy a sekélyebb szakaszokon a folyadék nem hőt vesz fel, hanem hőt ad le a környezetének [11], [12], [13]. Ez a folyamat parazita, veszteségjellegű hőleadásként értelmezhető, mivel kedvezőtlenül befolyásolja a primer körben rendelkezésre álló hőmérsékletszintet és ezen keresztül a hőszivattyú működési feltételeit [3], [5], [13], [14].

A jelenség helye és kiterjedése hagyományos, kizárólag belépő és kilépő hőmérsékletekre épülő mérésekből nem határozható meg kellő részletességgel [1], [2], [15], [16]. Többmélységű hőmérséklet-monitorozás esetén viszont lehetőség nyílik a visszatérő ág szegmensenkénti értelmezésére, az időintegrált szegmensenergia meghatározására, valamint az exoterm, endoterm és bizonytalan viselkedésű tartományok elkülönítésére [11], [13]. A parazita hőleadási zóna egyik tömör diagnosztikai mutatója az exoterm–endoterm átmeneti mélység, amely a veszteségjellegű hőleadási tartomány és a hasznos hőfelvételi tartomány közötti határt jellemzi [13].

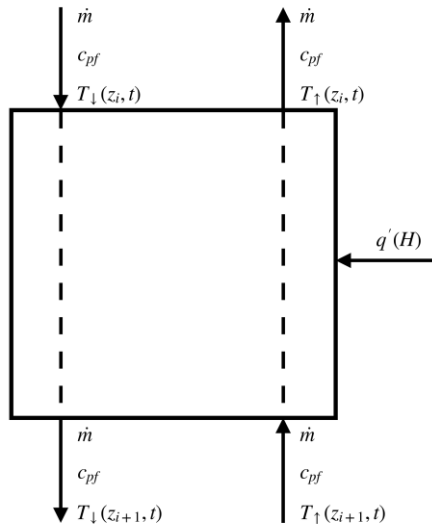
Az átmeneti mélység alkalmazhatósága azonban nem ítélhető meg pusztán abból, hogy egy adott mérési adatsoron számítható-e [13]. Üzemi monitoringkörnyezetben az idősorok tranzienst hatások, hidraulikai ingadozásokat, mérési zajt és adatkimaradásokat is tartalmazhatnak [13], [15], [16], [17]. A mérési bizonytalanság és a jel–zaj viszony ezért közvetlenül befolyásolja, hogy az egyes szegmensek hőleadó vagy hőfelvevő jellege mennyire tekinthető megbízhatóan azonosíthatónak [13], [17].

Jelen tanulmány a korábbi, többmélységű hőmérsékletméréseken alapuló zónaazonosítási munka kiegészítéseként azt vizsgálja, hogy a parazita exoterm mélységindikátor milyen üzemi és adatminőségi feltételek mellett tekinthető stabil, reprodukálható és diagnosztikai célra használható mutatónak [13]. A cikk az időablak-választás, a kezdeti tranzienst szakasz kizárása, a bizonytalanság alapú küszöbskálázás, a mintavételi ritkítás és a hiányzó adatok kezelésének hatását értékeli [13], [15], [16], [17].

VIZSGÁLT RENDSZER ÉS MÉRÉSI HÁTTÉR

A mérési bizonytalanság a diagnosztikai értelmezés egyik meghatározó tényezője. A terepi telepítést megelőzően az érzékelők kalibrálása és rendszerszintű összehasonlítása megtörtént. A teljes mérési láncra vonatkozó kombinált kiterjesztett bizonytalanság $k = 2$ lefedési tényező mellett $U \approx \pm 0,12\text{ °C}$ értékkel került becslésre. Ez az érték a későbbi

szegmensosztályozásban nem utólagos hibabecslésként, hanem az exoterm, endoterm és bizonytalan kategóriák elkülönítésének alapfeltételeként jelenik meg. A visszatérő ág szegmensenkénti értelmezésének elvi alapját az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A talajszonda szegmensenkénti energiámérlegének sematikus ábrázolása [14]

A vizsgált rendszer és a mérőrendszer főbb műszaki jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze. A táblázatban szereplő adatok közül a jelen vizsgálat szempontjából különösen fontos a 100 m-es furatmélység, a 10 m-es mélységi felbontás, valamint az előremenő és visszatérő ágon egyaránt alkalmazott 10–10 hőmérséklet-érzékelő. Ezek a paraméterek határozzák meg, hogy a furathőcserélő mentén milyen térbeli részletességgel értelmezhető a hőáram iránya és intenzitása. [13], [14]

Az 1. táblázatban bemutatott mérési kialakítás lehetővé teszi a visszatérő ág mentén kialakuló hőtechnikai viselkedés szegmensenkénti értékelését, ugyanakkor a módszer alkalmazhatóságát a mérési felbontás és az érzékelők bizonytalansága is befolyásolja. A 10 m-es mélységi osztás mérnöki szempontból alkalmas a főbb hőáram-tartományok elkülönítésére, de az átmeneti mélység meghatározása továbbra is interpolációt és bizonytalanságalapú értelmezést igényel. [13]

A mérési kampány egy referencia-egyensúlyi állapotot és két aktív, fűtési üzemi fázist tartalmazott. [13], [14] A referenciaállapot a keringésmentes, közel zavartalan hőmérsékleti profil rögzítésére szolgált, míg az aktív mérési fázisok a visszatérő ági hőáram-viselkedés üzemi értékelését tették lehetővé. A két aktív fázis eltérő térfogatárammal készült, ezért alkalmas volt annak vizsgálatára, hogy a hidraulikai terhelés miként befolyásolja az exoterm–endoterm átmeneti mélység meghatározhatóságát és robusztusságát. [13]

Paraméter	Érték / jellemző
Furatmező	80 db, egyenként 100 m mélységű talajszonda
Vizsgált szonda	100 m mélységű, szimpla U-csöves furathőcserélő

Paraméter	Érték / jellemző
Csőméret	2x40x3,7 mm HDPE
Fúrólukátmérő	130 mm
Mérési pontok	10-10 db érzékelő az előremenő és visszatérő ágon
Mélységi felbontás	10 m
Kiterjesztett bizonytalanság	$U \approx \pm 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = 2$

1. táblázat: A vizsgált rendszer és mérőrendszer főbb jellemzői

A mérési fázisok főbb adatait a 2. táblázat tartalmazza. A 2. táblázat alapján látható, hogy az aktív mérési szakaszok eltérő időtartammal és eltérő térfogatárammal rendelkeztek. Az alacsonyabb, $0,585 \text{ m}^3/\text{h}$ térfogatáramú mérési fázis hosszabb tartózkodási időt és nagyobb szegmensenkénti hőmérsékletváltozásokat eredményezhetett, míg a $0,815 \text{ m}^3/\text{h}$ térfogatáramú fázis egyenletesebb, de kisebb hőmérséklet-különbségekkel jellemezhető üzemi állapotot képviselt. A két állapot összehasonlítása ezért megfelelő alapot biztosított az átmeneti mélység robusztussági és érzékenységi vizsgálatához.

Mérési fázis	Dátum	Időintervallum	Térfogatáram [m^3/h]	Időtartam [h]
Referencia-egyensúlyi állapot	2025.03.18.	11:25-16:03	-	4,38
1. aktív mérési fázis	2025.03.20.	10:20-12:41	0,585	2,21
2. aktív mérési fázis	2025.03.24.	12:18-17:11	0,815	4,53

2. táblázat: A mérési kampány főbb fázisai

A PARAZITA EXOTERM MÉLYSÉGINDIKÁTOR MÓDSZERTANI ALAPJAI

A jelen tanulmányban alkalmazott parazita exoterm mélységindikátor a visszatérő ág mentén mért többmélységű hőmérséklet-idősorokból származtatható. A módszer részletes matematikai és energetikai levezetése korábbi saját vizsgálat tárgyát képezte, ezért ebben a fejezetben csak azok az alapösszefüggések szerepelnek, amelyek a robusztussági és adatminőségi értékelés megértéséhez szükségesek. [13]

A visszatérő ág a mérési pontok alapján mélységi szegmensekre bontható. A vizsgált mérőrendszerben az érzékelők 10 m-es mélységi osztással helyezkednek el, ezért az egyes szegmensek két szomszédos mérési pont közötti tartományként értelmezhetők. Az adott szegmens hőtechnikai viselkedése a hőhordozó közeg tömegárama, fajhője és a szegmens két végpontján mért visszatérő ági hőmérséklet különbsége alapján írható le. Az így meghatározott vonalmenti hőáram előjele a lokális hőcsere irányát mutatja [13]:

- exoterm szakasz esetén a hőhordozó közeg hőt ad le a környezetének,
- endoterm szakasz esetén pedig hőt vesz fel a talajból.

A számítási gerinc első lépése az i -edik visszatérő ági szegmens pillanatnyi vonalmenti hőáramának meghatározása:

$$q_{\uparrow,i}(t) = \frac{\dot{m}c_f}{\Delta z_i} [T_{\uparrow}(Z_{i+1}, t) - T_{\uparrow}(Z_i, t)] \quad (1)$$

ahol $\dot{m}$ a hőhordozó közeg tömegáram, c_f a hőhordozó közeg fajhője, Δz_i az i -edik szegmens hossza, $T_{\uparrow}(Z_i, t)$ és $T_{\uparrow}(Z_{i+1}, t)$ pedig két szomszédos mélységi pont visszatérő ági hőmérséklete. A képletben alkalmazott előjel-konvenció szerint a pozitív érték a hőhordozó közeg oldaláról értelmezett veszteségjellegű hőleadást, a negatív érték pedig hőfelvételt jelez.

A pillanatnyi hőáramok önmagukban érzékenyek lehetnek a mérési zajra, a rövid idejű hidraulikai ingadozásokra és a tranziens folyamatokra. Ezért a diagnosztikai értékelésben nem egyetlen pillanatnyi érték, hanem a kiválasztott időablakra vonatkozó időintegrált vonalmenti szegmensenergia kerül felhasználásra:

$$Q_{\uparrow,i} = \int_0^{\tau_f} q_{\uparrow,i}(t) dt \quad (2)$$

Ez a mennyiség fejezi ki, hogy az adott szegmens a vizsgált időszak egészében nettó hőleadó vagy hőfelvevő jellegű volt-e. Az időintegrált értelmezés előnye, hogy mérsékli a rövid idejű mérési ingadozások hatását, és jobban jellemzi az adott üzemállapotban kialakuló domináns hőcsereirányt.

A terepi mérési adatok esetében a szegmensenkénti hőmérséklet-különbségek egyes esetekben kismértékűek lehetnek, ezért a hőcsere irányát nem célszerű kizárólag az előjel alapján értelmezni. A mérési bizonytalanság figyelembevételére szegmensenkénti osztályozási küszöb alkalmazható:

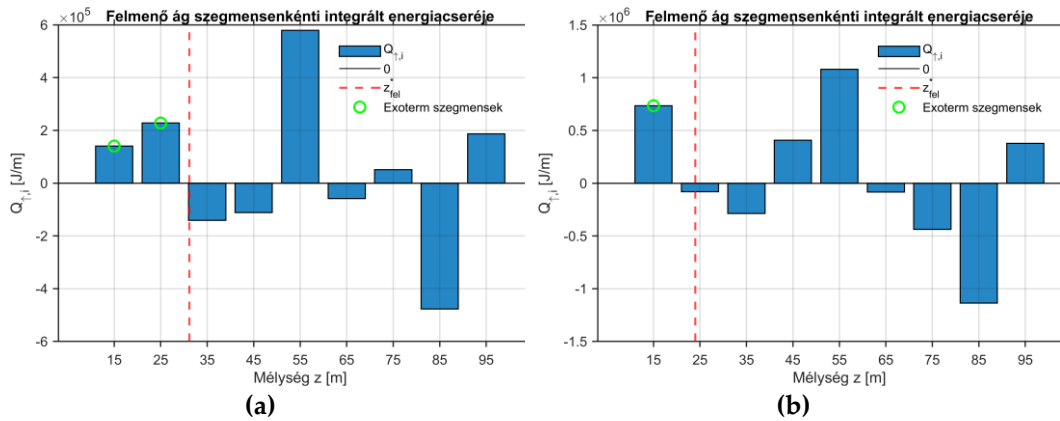
$$\varepsilon_{Q,i} = k\sigma_{Q,i} \quad (3)$$

ahol (k) a küszöbskálázó tényező, $\sigma_{Q,i}$ pedig az i -edik szegmens időintegrált mennyiségéhez tartozó becsült bizonytalanság. A szegmensek besorolása ennek megfelelően három kategória szerint történik. Ha $Q_{\uparrow,i}$, akkor a szegmens exotermnek tekinthető. Ha $Q_{\uparrow,i}$, akkor a szegmens endotermként értelmezhető. Amennyiben $Q_{\uparrow,i}$, a szegmens besorolása bizonytalan, mert a számított érték nem különíthető el megbízhatóan a mérési bizonytalanság hatásától [13].

A módszer fő kimeneti mennyisége az exoterm–endoterm átmeneti mélység. Ez azt a mélységi határt jelöli, ahol a visszatérő ág mentén a veszteségjellegű hőleadási tartomány átmegy a hasznos hőfelvételi tartományba. Az átmeneti mélység meghatározása a stabil előjelváltást mutató szomszédos szegmensek időintegrált értékei alapján, lineáris interpolációval történik:

$$z_{\uparrow}^* = z_{c,i^*} + \frac{Q_{\uparrow,i^*}}{Q_{\uparrow,i^*} - Q_{\uparrow,i^*+1}} (z_{c,i^*+1} - z_{c,i^*}) \quad (4)$$

Az így kapott $z_{\uparrow}^*$ érték a parazita hőleadási zóna térbeli kiterjedésének tömör, mérnöki szempontból jól értelmezhető diagnosztikai indikátora. A módszer értelmezését a 2. ábra szemlélteti, amely a mélység szerinti időintegrált szegmensenergia-profilokat és az azonosított átmeneti mélységet mutatja be két eltérő hidraulikai üzemállapot mellett [13].



2. ábra: Mélység szerinti $Q_{\uparrow,i}$ profilok és az azonosított $z_{\uparrow}^*$:
(a) kis térfogatáramú állapot; (b) nagy térfogatáramú állapot [13]

Az ábra alapján az exoterm szegmensek a visszatérő ág sekélyebb tartományában jelennek meg, míg a mélyebb szakaszokban a hőhordozó közeg már hőt vesz fel a környező talajból. A két tartomány közötti határ adja az átmeneti mélységet. Ez az értelmezés különösen fontos, mert a parazita hőleadási zóna hagyományos, kizárólag belépő és kilépő hőmérsékletre épülő monitoring alapján nem lokalizálható.

Az átmeneti mélység mellett kiegészítő energetikai mutatók is meghatározhatók. Ezek nem a zóna térbeli lokalizálását szolgálják, hanem a jelenség energetikai súlyosságának nagyságrendi értelmezését segítik. A szignifikánsan exoterm szegmensekből származó összesített hőmennyiség és az ehhez tartozó átlagos veszteségteljesítmény az alábbi módon írható fel:

$$P_{exo} = \frac{E_{exo}}{\tau_f} \quad (5)$$

A parazita hőleadás forrásoldali hőmérséklet-egyenértéke a veszteségteljesítményből, a tömegáramból és a hőhordozó közeg fajhőjéből becsülhető:

$$\Delta T_{out} = \frac{P_{exo}}{\dot{m}c_f} \quad (6)$$

Ez a mutató azt fejezi ki, hogy az azonosított parazita hőleadás mekkora forrásoldali hőmérséklet-szint-csökkenéssel értelmezhető. A ΔT_{out} tehát nem közvetlenül mért hőmérsékletcsökkenés, hanem a veszteségteljesítményből származtatott mérnöki egyenérték.

Az időablak-választás előzetes ellenőrzésére a teljes visszatérő ágra vonatkozó globális hőcserejel is alkalmazható:

$$q_{glob,\uparrow}(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N_s} q_{\uparrow,i}(t) \Delta z_i \quad (7)$$

A globális jel önmagában nem alkalmas a parazita hőleadási zóna mélységi lokalizálására, mivel a teljes visszatérő ági viselkedést egyetlen összesített mennyiségben írja le.

Ugyanakkor hasznos előszűrőként szolgál az időablak-választáshoz, mert segítségével azonosíthatók azok a mérési szakaszok, amelyekben a kezdeti tranziens hatások már mérséklődtek, és a rendszer viselkedése stabilabb üzemi állapothoz közelít [13].

ROBUSZTUSSÁGI ÉS ÉRZÉKENYSÉGI VIZSGÁLATI KERET

A parazita exoterm mélységindikátor üzemi monitoringban történő alkalmazása szempontjából nem elegendő annak igazolása, hogy az átmeneti mélység egy adott mérési adatsoron meghatározható. A gyakorlati alkalmazhatóság feltétele az is, hogy a kapott indikátor stabil maradjon a kiértékelési feltételek ésszerű változtatása mellett, illetve ismert legyen, hogy milyen adatminőségi és üzemi körülmények között válik bizonytalanná az értelmezése. A robusztussági vizsgálatok négy fő tényezőre terjedtek ki [13]:

- a kiértékelési időablak megválasztására,
- a bizonytalanságalapú küszöbskálázó tényező hatására,
- a mintavételi ritkítás következményeire és
- a hiányzó adatok kezelésére.

Értékelési szempontok

A robusztusság értelmezéséhez először rögzíteni kell, hogy mely változások tekinthetők elfogadhatónak. Az átmeneti mélység esetében a fő szempont az, hogy a különböző, fizikailag indokolt feldolgozási beállítások mellett az első stabil exoterm–endoterm átmenet ugyanabban vagy közel azonos mélységtartományban maradjon. Ezzel szemben az energetikai mutatók esetében kisebb százalékos eltérés elfogadható, mivel ezek közvetlenül függenek az integrálási időtartamtól, a pillanatnyi hőáram-idősoroktól és az adatfeldolgozási beállításoktól [13].

A vizsgálati logika ezért két szintet különít el. Az első szint a térbeli lokalizáció, vagyis annak ellenőrzése, hogy megmarad-e az átmeneti mélység, illetve változik-e az exoterm szegmensek száma és mélységi elhelyezkedése. A második szint az energetikai súlyosság értékelése, amely azt vizsgálja, hogy mennyire változik az átlagos veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és a becsült COP-hatás. Ez a kettős megközelítés lehetővé teszi, hogy az indikátort ne csupán számított eredményként, hanem üzemi döntéstámogató információként értelmezzük [13], [14].

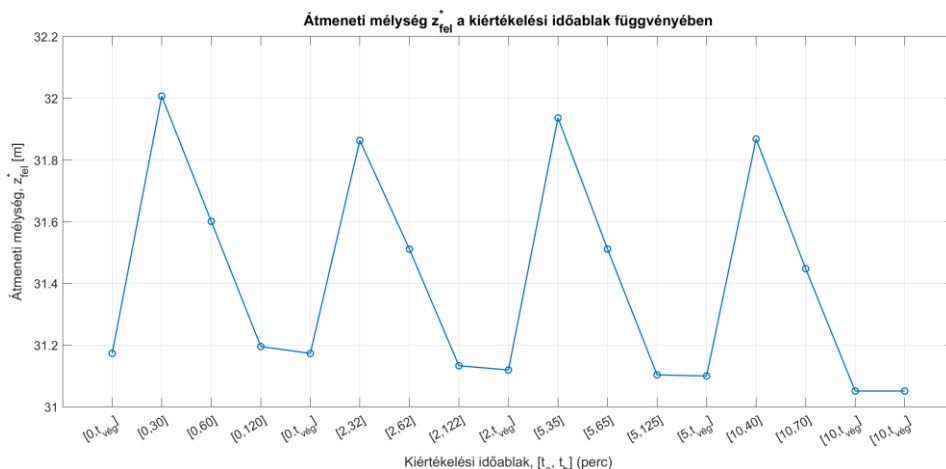
Időablak-választás és a kezdeti tranziens szakasz

Az üzemi idősorok értelmezésekor az egyik legfontosabb kérdés a kiértékelési időablak megválasztása. A mérés kezdetén gyakran jelentkeznek tranziens folyamatok, amelyek a hidraulikai állapot beállításából, valamint a hőhordozó közeg, a furathőcserélő és a környező talaj közötti hőtechnikai alkalmazkodásból származnak. Ha ezek a szakaszok változatlanul bekerülnek az időintegrált szegmensenergia számításába, akkor a szegmensbesorolás kevésbé tükrözheti a stabilabb üzemi viselkedést. [13]

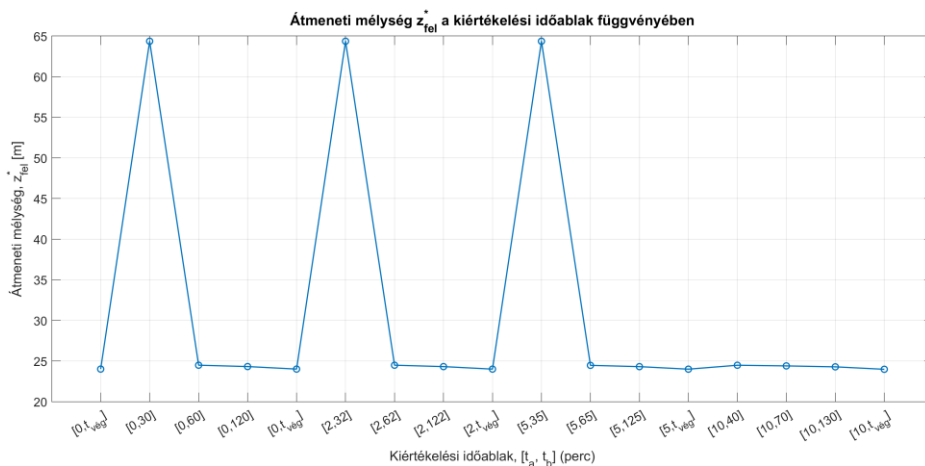
Az időablak-érzékenységi vizsgálat azt értékeli, hogy az átmeneti mélység és a kapcsolódó energetikai mutatók hogyan változnak eltérő kezdő- és záróidőpontok mellett. A térbeli indikátor akkor tekinthető robusztusnak, ha fizikailag indokolt időablakok esetén az exoterm és endoterm tartományok közötti határ csak kis mértékben változik. A teljesítményjellegű mutatók ezzel szemben érzékenyebbek lehetnek a rövidebb, korán induló vagy tranziens hatásokkal terhelt időablakokra. [13]

Az időablak-választás gyakorlati következménye, hogy a mérési kampány teljes hossza nem feltétlenül alkalmas egységes diagnosztikai kiértékelésre. A kezdeti beállási szakaszban a hőáram iránya és intenzitása még nem minden esetben a tartós üzemi viselkedést mutatja. A rövid idejű kezdeti hatások különösen az időintegrált mutatókat torzíthatják, mivel az integrálási időhöz képest aránytalanul nagy súlyt kaphatnak. Ezért a globális visszatérő ági jel, valamint a hőmérsékleti profil időbeli változása előszűrőként használható az értékelési időablak kijelöléséhez.

A vizsgált esetekben a stabilabb időablakok kiválasztása mellett az átmeneti mélység csak kis mértékben változott. Ez arra utal, hogy a parazita hőleadási zóna nem rövid idejű mérési zaj vagy véletlen tranziens következménye, hanem a rendszer adott üzemi állapotában következetesen megjelenő hőtechnikai jelenség. Az időablak-választás hatását a 3. ábra szemlélteti.



(a)



(b)

3. ábra: A becsült átmeneti mélység érzékenysége az értékelési időablak $[t_a, t_b]$ kiválasztására a visszatérő ág esetén: (a) alacsony térfogatáramú és (b) magas térfogatáramú állapot [13]

A 3. ábra alapján az átmeneti mélység az értékelési időablak módosítása mellett is szűk tartományban maradt. Ez megerősíti, hogy az átmeneti mélység térbeli diagnosztikai

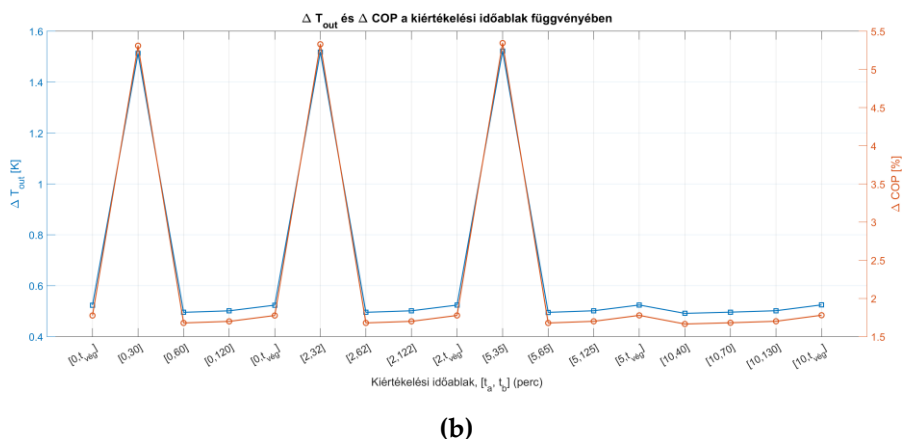
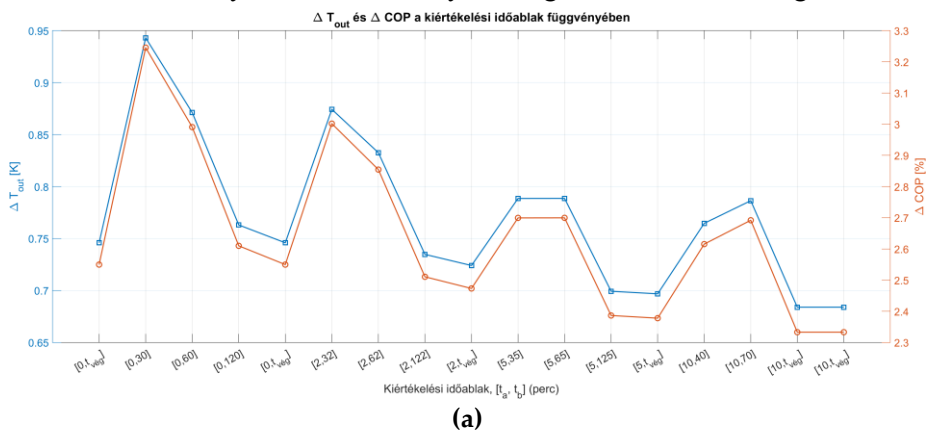
mutatóként stabilabbnak tekinthető, mint azok az energetikai mutatók, amelyek közvetlenül az időintegrált hőmennyiség nagyságából származnak.

Bizonytalanságalapú küszöbskalázás

A bizonytalanságalapú küszöbskalázás célja annak meghatározása, hogy a számított időintegrált szegmensenergia milyen mértékű eltérése tekinthető szignifikánsnak a mérési bizonytalansághoz képest. Alacsony küszöb esetén több szegmens sorolható egyértelműen exoterm vagy endoterm kategóriába, de nőhet a zajérzékenység. Magas küszöb esetén az osztályozás konzervatívabbá válik, ugyanakkor több szakasz kerülhet bizonytalan kategóriába. [13]

A vizsgálat során több küszöbskalázó tényező értéke került összehasonlításra. Az eredmények alapján az átmeneti mélység a vizsgált ésszerű tartományban stabil maradt: alacsonyabb térfogatáramnál 31,10 m, magasabb térfogatáramnál 24,00 m értéket adott. Ez azt jelzi, hogy az első stabil exoterm–endoterm átmenet helye nem a küszöb önkényes megválasztásának következménye, hanem a visszatérő ágban megjelenő hőtechnikai mintázat stabil térbeli jellemzője. [13]

A küszöbskalázás hatását a 4. ábra foglalja össze. Az ábra célja annak bemutatása, hogy az átmeneti mélység a vizsgált küszöbskalázási tartományban nem változott, vagyis az indikátor nem érzékeny túlzottan a bizonytalansági küszöb ésszerű megválasztására.



4. ábra: Időablak-érzékenység: ΔT_{out} és ΔCOP : (a) alacsony térfogatáramú állapot; (b) magas térfogatáramú állapot [13]

A 4. ábra alapján a kapott eredmény kedvező, mert az átmeneti mélység a vizsgált (k) értékek mellett változatlan maradt. Az indikátor nem a küszöb finomhangolásából adódik. A szegmensenkénti osztályozási struktúra stabilitása az exoterm és endoterm tartományok elkülönítése a mért hőmérsékletprofilokból származó időintegrált hőmennyiségek előjelen és nagyságán alapul, nem pedig a feldolgozási beállítások önkényességén.

A küszöbskálázás gyakorlati értelme az, hogy a diagnosztikai eljárás ne legyen túlérzékeny a mérési bizonytalanság tartományába eső kis eltérésekre. Ha a küszöb túl alacsony, akkor a zaj is exoterm vagy endoterm besorolást eredményezhet. Ha viszont túl magas, akkor a módszer elveszítheti a valóban jelen lévő, de mérsékelt hőtechnikai eltérések felismerésének képességét. Ezért a küszöböt nem optimalizálandó illesztési paraméterként, hanem konzervatív megbízhatósági feltételként célszerű kezelni.

Mintavételi ritkítás

Gyakorlati monitoringrendszerekben nem mindig áll rendelkezésre nagy időfelbontású adatsor. Az adatgyűjtési gyakoriságot befolyásolja az érzékelőrendszer kialakítása, az adattárolási kapacitás, a kommunikációs infrastruktúra és az utólagos feldolgozás módja. Ezért szükséges vizsgálni, hogy a módszer mennyire érzékeny a mintavételi sűrűség csökkentésére. [13]

A ritkítási vizsgálat során az eredeti hőmérséklet-idősorokból ritkított adatsorok képezhetők, majd ezek alapján újraszámítható az időintegrált szegmensenergia, az átmeneti mélység és a kiegészítő energetikai mutatók. A módszer akkor tekinthető robusztusnak, ha mérsékelt ritkítás mellett az átmeneti mélység lényegében változatlan marad. A teljesítményjellegű mutatók ugyanakkor erősebben függhetnek az időbeli integrálás pontosságától.

A mintavételi ritkítás eredményeinek értelmezésekor fontos különbséget tenni a térbeli és az energetikai kimenetek között. A térbeli kimenet, vagyis az átmeneti mélység akkor marad stabil, ha a szegmensek alapvető exoterm vagy endoterm jellege nem változik. Az energetikai mutatók ezzel szemben az időbeli integrálás részletességétől is függenek, ezért nagyobb mértékben módosulhatnak, ha az idősor rövid idejű ingadozásait a ritkított adat már nem követi.

Monitoringtervezési szempontból ez kedvező következtetéshez vezet. Ha az elsődleges cél a parazita hőleadási zóna lokalizálása, akkor az átmeneti mélység mérsékelt ritkítás mellett is alkalmazható lehet. Ha azonban az üzemeltető a veszteségteljesítmény vagy a COP-hatás nagyságrendi becslését is használni kívánja, akkor nagyobb időfelbontásra és szigorúbb adatfolytonosságra van szükség.

Hiányzó adatok kezelése

A valós üzemi monitoringadatok gyakran nem teljesek. Rövid adatkimaradások keletkezhetnek kommunikációs zavar, érzékelőlekérdezési hiba, adatnaplózási probléma vagy utólagos adattisztítás következtében. Mivel a parazita exoterm mélységindikátor időintegrált szegmensenergiákon alapul, az adathiányok hatása nemcsak azok hosszától, hanem időbeli és mélységi elhelyezkedésüktől is függ. [13]

Rövid, elszórt adatkimaradások általában lineáris interpolációval kezelhetők, különösen akkor, ha nem érintik közvetlenül az exoterm–endoterm átmeneti tartományt. Hoszszabb vagy koncentrált adathiány esetén azonban az interpolált értékek már nem feltétlenül tükrözik a tényleges hőtechnikai viselkedést. Ilyen esetben az átmeneti mélységet nem célszerű egyetlen pontértékként megadni; indokoltabb bizonytalan mélységtartományt kijelölni, vagy az adott időablakot kizárni a diagnosztikai értékelésből.

A hiányzó adatokkal kapcsolatos vizsgálatok rámutatnak arra, hogy az interpoláció nem tekinthető minden esetben semleges adatfeldolgozási műveletnek. Rövid, elszórt hiány esetén a lineáris pótlás a hőmérsékleti idősor folytonosságát megfelelően visszaadhatja, hosszabb adathiány esetén azonban elfedhet tényleges tranziens vagy lokális hőtechnikai változásokat. Ez különösen akkor jelent kockázatot, ha az adathiány az átmeneti mélység környezetében jelentkezik. [13]

A megbízható diagnosztikai alkalmazás ezért megköveteli, hogy az adathiányokat ne kizárólag mennyiségi arányuk alapján értékeljük. Azonos hiányarány eltérő hatást okozhat attól függően, hogy a hiány a stabil endoterm tartományban, a sekély exoterm szakaszon vagy az átmeneti zónában található. Emiatt az adathiányok időbeli és mélységi elhelyezkedése az indikátor alkalmazhatósági feltételei közé tartozik.

A robusztussági vizsgálatok főbb szempontjait és diagnosztikai jelentőségét a 3. táblázat foglalja össze.

Vizsgált tényező	Fő kérdés	Diagnosztikai jelentőség
Időablak-választás	Kizárhatók-e a kezdeti tranziens szakaszok?	A stabil üzemi állapot kijelölése csökkenti a téves következtetés kockázatát
Küszöbskálázás	Változik-e az átmeneti mélység a küszöb módosítására?	A stabil átmeneti mélység az indikátor robusztusságát jelzi
Mintavételi ritkítás	Megmarad-e a szegmensbesorolás ritkább adatsor esetén?	Meghatározza a gyakorlati monitoring minimális adatfelbonthatását
Hiányzó adatok	Mekkora és milyen elhelyezkedésű adatvesztés mellett értelmezhető még az eredmény?	Az adatfolytonosság és az interpoláció hatását minősíti

3. táblázat: A robusztussági vizsgálatok szerepe az indikátor értelmezésében

EREDMÉNYEK ÉS DIAGNOSZTIKAI ÉRTELMEZÉS

A robusztussági és érzékenységi vizsgálatok fő eredménye, hogy az exoterm–endoterm átmeneti mélység megfelelően kiválasztott üzemi időablak és kielégítő adatminőségi feltételek mellett stabilabb diagnosztikai indikátorként viselkedik, mint a teljesítményjellegű mutatók. Ez a megállapítás gyakorlati szempontból azért lényeges, mert üzemi állapotfelügyeletben a cél gyakran nem az egyes pillanatnyi veszteségteljesítmények pontos meghatározása, hanem a kedvezőtlen hőtechnikai viselkedés térbeli lokalizálása és megbízható értelmezése. [13]

Az időablak-érzékenységi vizsgálat alapján az átmeneti mélység mindkét vizsgált hidraulikai üzemállapotban viszonylag stabilnak bizonyult. Alacsonyabb térfogatáram esetén a becsült átmeneti mélység a vizsgált időablakok mellett szűk tartományban, 31,05–32,01 m között változott. Tehát a parazita hőleadási zóna térbeli határa nem egyetlen önkényesen kiválasztott kiértékelési ablak eredménye, hanem a visszatérő ág mérési adataiban következetesen megjelenő hőtechnikai mintázat.

A küszöbskálázási vizsgálat további megerősítést adott az indikátor stabilitására. Az ésszerű tartományban változtatott bizonytalansági küszöb nem módosította az

első stabil exoterm–endoterm átmenet helyét. Alacsonyabb térfogatáram mellett az átmeneti mélység 31,10 m, magasabb térfogatáram mellett 24,00 m értéken maradt. Ez diagnosztikai szempontból kedvező eredmény, mert jelzi, hogy az átmeneti mélység nem a küszöbérték önkényes megválasztásából, hanem a mért hőtechnikai viselkedésből származtatható.

A teljesítményjellegű mutatók ezzel szemben érzékenyebben reagáltak az adatfeldolgozási feltételekre. Rövidebb, a mérés kezdetéhez közelebb eső időablakoknál az átlagos veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték nagyobb eltérést mutatott a referenciaablakhoz képest. Ennek oka, hogy ezek a mutatók közvetlenül az időintegrált hőmennyiség nagyságából származnak, így a tranziens folyamatok, a rövid idejű ingadozások és az integrálási időtartam erősebben befolyásolják őket.

A mintavételi ritkítás eredményei szerint az átmeneti mélység a vizsgált ritkítási beállítások mellett mindkét üzemállapotban stabil maradt. A térbeli lokalizációs mutató mérsékelt adatritkítás mellett is használható lehet üzemi monitoringban. Az energetikai mutatók ugyanakkor, különösen alacsonyabb térfogatáramnál, érzékenyebbnek bizonyultak az adatfelbontás változására. Ez megerősíti azt az értelmezést, hogy az átmeneti mélység elsődlegesen térbeli diagnosztikai indikátor, míg a teljesítményjellegű mutatók inkább a jelenség energetikai súlyosságának becslésére alkalmasak.

A hiányzó adatok vizsgálata azt mutatta, hogy rövid, elszórt adatkimaradások lineáris interpolációval többnyire kezelhetők, amennyiben nem az átmeneti tartományt érintik. Hosszabb, 10–15 perces adathiányok alacsonyabb térfogatáramnál már érzékelhető eltéréseket okozhattak a teljesítményjellegű mutatókban. Szélső esetben a veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték változása 3,2% nagyságrendű volt. Magasabb térfogatáram esetén az interpoláció hatása lényegesen kisebb, legfeljebb 0,11% volt. A hiányadat-kezelés értékelése ezért nemcsak az adathiány hosszától, hanem annak időbeli és mélységi elhelyezkedésétől is függ.

A diagnosztikai értelmezésben célszerű az átmeneti mélységet elsődleges lokalizációs indikátorként kezelni. Ez adja meg, hogy a veszteségjellegű hőleadási zóna milyen mélységig terjed. A teljesítményjellegű mutatók ezzel szemben kiegészítő szerepet töltenek be: a lokalizált jelenség energetikai súlyosságának becslésére használhatók, de önmagukban nem alkalmasak a zóna térbeli azonosítására. Az indikátorok ilyen elkülönített értelmezése segíti annak meghatározását, hogy az eredmény üzemi döntéstámogatásra megbízhatóan felhasználható-e.

Az eredmények alapján a parazita exoterm mélységindikátor három diagnosztikai értelmezési kategóriába sorolható. A kategóriák célja annak jelzése, hogy az adott mérési és adatfeldolgozási feltételek mellett az átmeneti mélység milyen megbízhatósággal használható állapotfelügyeleti információként. A 4. táblázat ezt a diagnosztikai minősítési rendszert foglalja össze.

Kategória	Jellemző feltételek	Értelmezés
Megbízható	Stabil időablak, kizárt kezdeti tranziens, jó adatfolytonosság, stabil küszöbérzékenység	Az átmeneti mélység üzemi monitoringban alkalmazható térbeli indikátor

Kategória	Jellemző feltételek	Értelmezés
Korlátozottan megbízható	Rövidebb időablak, mérsékelt zaj, kisebb adathiány, néhány bizonytalan szegmens	Az indikátor használható, de bizonytalansági megjegyzéssel
Nem javasolt	Erős tranziens hatás, jelentős vagy koncentrált adathiány, gyenge jel-zaj viszony, instabil átmeneti mélység	A diagnosztikai következtetés nem tekinthető megbízható döntéstámogató információnak

4. táblázat: A parazita exoterm mélységindikátor diagnosztikai értelmzési kategóriái

A fő robusztussági eredményeket az 5. táblázat foglalja össze. A táblázat célja annak áttekinthető bemutatása, hogy az egyes érzékenységi vizsgálatok milyen módon támasztják alá az átmeneti mélység elsődleges diagnosztikai szerepét, illetve hol jelennek meg a teljesítményjellegű mutatók érzékenységi korlátai. [13]

Vizsgálat	Alacsony térfogat-áram	Magas térfogatáram	Értelmezés
Időablak-érzékenység	31,05-32,01 m	stabil tartomány	Az átmeneti mélység csak kismértékben változik
Küszöbskálázás	31,10 m	24,00 m	A k ésszerű tartománya nem módosítja az átmenetet
Mintavételi ritkítás	átmeneti mélység stabil, energetikai mutatók érzékenyebbek	átmeneti mélység stabil	A lokalizáció robusztusabb, mint a teljesítménybecslés
Hiányadat-kezelés	10-15 perces hiány érzékelhető eltérést okozhat	hatás kisebb, legfeljebb 0,11%	Az adathiány helye és hossza döntő

5. táblázat: A fő robusztussági eredmények összefoglalása

Az 5. táblázat alapján megállapítható, hogy az átmeneti mélység a vizsgált feldolgozási feltételek mellett következetesen stabilabb mutatóként viselkedett, mint a teljesítményjellegű indikátorok. Ez nem jelenti azt, hogy az energetikai mutatók elhagyhatók, hanem azt, hogy eltérő szerepben célszerű használni őket. Az átmeneti mélység a zóna térbeli lokalizálását szolgálja, míg az átlagos veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és a becsült COP-hatás a lokalizált jelenség energetikai jelentőségét segíti értelmezni.

Az eredmények üzemi döntéstámogatási jelentősége

A bemutatott eredmények üzemeltetési szempontból azért lényegesek, mert a parazita hőleadási zóna azonosítása önmagában még nem jelenti azt, hogy azonnali beavatkozás szükséges. A döntéshez azt is mérlegelni kell, hogy a jelenség térben milyen kiterjedésű, energetikailag milyen nagyságrendű hatást képvisel, és az indikátor milyen adatminőségi feltételek mellett került meghatározásra. A diagnosztikai keret ezért nemcsak hibakeresési eszközként, hanem döntési szűrőként is értelmezhető: segít elkülöníteni a stabilan megje-

lenő, üzemeltetési szempontból releváns hőtechnikai mintázatokat azoktól az eredményektől, amelyek inkább adatminőségi problémákból vagy átmeneti üzemi hatásokból származhatnak. [13], [14]

Az átmeneti mélység elsődleges szerepe a lokalizáció. Ha a veszteségjellegű hőleadási tartomány ismételt azonos vagy közel azonos mélységtartományban jelenik meg, akkor az a szonda vagy a furatkör adott szakaszához köthető hőtechnikai sajátosságra utalhat. Ilyen esetben az üzemeltető célzottabban vizsgálhatja a sekély zóna hőtechnikai hatását, a csőágak közötti belső hőátadást, a hidraulikai beszabályozást vagy a furatmezőn belüli kölcsönhatások szerepét. Ha viszont az átmeneti mélység erősen ingadozik az adatfeldolgozási beállítások függvényében, akkor az eredmény nem tekinthető kellően megalapozott döntéstámogató információnak.

Az energetikai mutatók másodlagos, de fontos szerepet töltenek be. Az átlagos veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték segít megítélni, hogy a lokalizált jelenség rendszerszinten elhanyagolható, mérsékelt vagy jelentősebb hatású. Ugyanakkor ezek az értékek érzékenyebben reagálhatnak az időablak-választásra, az adathiányokra és a mintavételi felbontásra, ezért önmagukban nem célszerű beavatkozási döntés alapjául szolgálniuk. A megbízható értékeléshez a térbeli lokalizációt és az energetikai súlyosságot együtt kell értelmezni. [13], [14]

Összevetés a hagyományos monitoringmegközelítéssel

A hagyományos primer oldali monitoring jellemzően a belépő és kilépő hőmérsékletre, a térfogatáramra és az ezekből számított összesített hőteljesítményre épül. Ezek a mennyiségek alkalmasak a rendszer globális energiaforgalmának értékelésére, de nem mutatják meg, hogy a talajszonda mentén hol alakulnak ki kedvező vagy kedvezőtlen hőtechnikai szakaszok. Ennek következtében egy sekély visszatérő ági hőleadási zóna globális mérésekből akár rejtve is maradhat, vagy csak közvetett módon, a forrásoldali hőmérsékletszint romlásán keresztül érzékelhető [1], [2], [15], [16].

A mélységfelbontású hőmérsékletmérés hozzáadott értéke abban áll, hogy a hőcserét nem egyetlen összesített értéként, hanem mélységi eloszlásként teszi értelmezhetővé. Ez különösen akkor előnyös, ha a rendszerben nem homogén viselkedés, rétegzett talajkörnyezet, eltérő furatközi kölcsönhatás, vagy az előremenő és visszatérő csőág közötti belső hőcsere jelentkezik. A módszer ezért a hagyományos primer oldali monitoringot nem váltja, hanem kiegészíti: a globális energiaforgalmi adatok mellé térbeli diagnosztikai információt rendel [11], [13].

Ebből következik, hogy az exoterm–endoterm átmeneti mélység különösen hasznos lehet olyan rendszereknél, ahol a hosszabb távú teljesítményromlás vagy kedvezőtlen forrásoldali viselkedés oka nem állapítható meg pusztán a hőszivattyú berendezésoldali adataiból. A furathőcserélő mélységi viselkedésének vizsgálata segíthet elkülöníteni, hogy a megfigyelt jelenség a forrásoldali hőcsere lokális sajátosságaiból, a hidraulikai üzemállapotból, a furatmezőn belüli kölcsönhatásokból vagy a mérési adatok minőségéből ered-e. A hagyományos primer oldali monitoring és a mélységfelbontású diagnosztikai monitoring főbb jellemzőit a 6. táblázat foglalja össze [1], [2], [11], [13].

Szempont	Hagyományos primer oldali monitoring	Mélységfelbontású diagnosztikai monitoring
Mért információ	Belépő/kilépő hőmérséklet, térfogatáram, összesített teljesítmény	Mélységi hőmérsékletprofil, szegmensenkénti hőcsere
Fő előny	Egyszerű, olcsó, általánosan alkalmazható	Lokális hőtechnikai zónák azonosítása
Fő korlát	Nem lokalizálja a furat menti jelenségeket	Több érzékelőt és adatminőségi ellenőrzést igényel
Döntéstámogatás	Globális energetikai értékelés	Térbeli diagnosztika és célzott beavatkozás előkészítése

6. táblázat: A hagyományos és a mélységfelbontású monitoring összehasonlítása

ALKALMAZHATÓSÁGI FELTÉTELEK ÉS KORLÁTOK

A parazita exoterm mélységindikátor üzemi monitoringban akkor alkalmazható megbízhatóan, ha a felhasznált mérési adatok és üzemi feltételek alkalmasak a visszatérő ág mentén kialakuló hőáram-viselkedés értelmezésére. A módszer nem önmagában vett számítási eljárás, hanem diagnosztikai kiértékelési keret, amelyben az eredmény megbízhatósága közvetlenül függ az adatminőségtől, a hidraulikai állapottól és a feldolgozási beállítástól [13].

Az egyik legfontosabb alkalmazási feltétel a stabil vagy közel stabil üzemi időablak kijelölése. A kezdeti tranziens szakasz változatlan bevonása torzítja az időintegrált szegmensenergiákat, ezért a módszer alkalmazása előtt célszerű előzetes stabilitásvizsgálatot végezni. Ugyancsak szükséges a mérési adatok folytonosságának, a jel–zaj viszonynak és a térfogatáram stabilitásának ellenőrzése. Ezek hiányában az átmeneti mélység ugyan számítható lehet, de diagnosztikai jelentése bizonytalanra válhat [13].

A bizonytalanságalapú küszöbölés a módszer egyik alapvető eleme. Azok a szegmensek, amelyeknél a számított hőmennyiség nem haladja meg a bizonytalansági küszöböt, nem sorolhatók felelősen egyértelműen exoterm vagy endoterm kategóriába. A bizonytalan kategória alkalmazása csökkenti annak kockázatát, hogy a mérési zajból, érzékelőbizonytalanságból vagy rövid idejű hidraulikai ingadozásból származó eltérések tévesen hőtechnikai jelenségeként kerüljenek értelmezésre [13].

A módszer gyakorlati alkalmazhatóságának további feltétele, hogy rendelkezésre álljanak a visszatérő ág mentén több mélységben rögzített hőmérséklet-idősorok. Hagyományos, kizárólag belépő és kilépő hőmérsékleteket mérő primer oldali monitoring esetében az exoterm–endoterm átmeneti mélység nem határozható meg. A módszer ezért nem általános, minden hőszivattyús rendszerre közvetlenül alkalmazható értékelési eljárás, hanem kifejezetten mélységfelbontású mérési infrastruktúrát igénylő diagnosztikai módszer.

Az energetikai hatások értelmezése szintén óvatosságot igényel. Az átlagos veszteségteljesítmény és a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték a mérési adatokból származtatható, a becsült COP-hatás azonban egyszerűsített helyettesítő modellre épül. Emiatt a COP-változás nem tekinthető berendezésspecifikus, abszolút teljesítmény-előrejelzésnek. Diagnosztikai célra alkalmas lehet a jelenség nagyságrendi értelmezésére, de részletes hőszivattyúmodell vagy gyártói teljesítményadatok nélkül csak korlátozott érvényességgel használható.

A módszer biztonságstudományi jelentősége abban áll, hogy a mérési adatokból származtatott hőtechnikai indikátort üzemi döntéstámogató információként kezeli. A parazita exoterm átmeneti mélység lokalizálja a visszatérő ág mentén jelentkező kedvezőtlen hőleadási tartományt, az adatminőségi értékelés pedig megmutatja, hogy az eredmény milyen megbízhatósággal használható. Ez hozzájárul ahhoz, hogy a talajszondás hőszivattyús rendszerek monitoringja ne csupán adatgyűjtésre, hanem megalapozott állapotértékelésre és üzemeltetési döntéstámogatásra is alkalmas legyen. [13], [14]

Gyakorlati alkalmazási javaslat

A módszer gyakorlati bevezetésekor célszerű lépcsőzetes diagnosztikai eljárást alkalmazni. Első lépésben ellenőrizni kell a mérőrendszer működését, az érzékelők rendelkezésre állását, az időbélyegek folytonosságát és a térfogatáram stabilitását. Második lépésben ki kell választani azt az üzemi időablakot, amelyben a kezdeti tranziens szakasz már nem dominál. Harmadik lépésként elvégezhető a szegmensenkénti osztályozás, majd az exoterm–endoterm átmeneti mélység meghatározása. Végül érzékenységi ellenőrzéssel kell minősíteni, hogy az eredmény megbízható, korlátozottan megbízható vagy nem javasolt diagnosztikai kategóriába tartozik-e.

Üzemeltetői szempontból az átmeneti mélység legnagyobb előnye, hogy közvetlen térbeli információt ad. Nemcsak azt jelzi, hogy a primer oldalon veszteségjellegű jelenség van jelen, hanem azt is, hogy ez milyen mélységi tartományig terjed. Ez segítheti a célzott beavatkozási lehetőségek mérlegelését, például a sekély szakasz hőtechnikai hatásának vizsgálatát, a mérőrendszer további ellenőrzését vagy a furatmező hidraulikai beszabályozásának felülvizsgálatát.

A gyakorlati alkalmazás során javasolt ellenőrzési lépéseket és azok döntési következményeit a 7. táblázat foglalja össze. A táblázat célja, hogy az indikátor használatát ne pusztán számítási eredményként, hanem ellenőrzött diagnosztikai folyamatként tegye értelmezhetővé.

Ellenőrzési lépés	Elfogadható feltétel	Döntési következmény
Időablak stabilitása	A kezdeti tranziens kizárható	Kiértékelés folytatható
Adatfolytonosság	Nincs hosszú vagy átmeneti zónát érintő hiány	Pontértékű átmeneti mélység megadható
Bizonytalansági küszöb	A k módosítása nem változtatja az átmeneti mélységet	Indikátor robusztusnak tekinthető
Mintavételi sűrűség	Ritkítás mellett a szegmens-besorolás stabil	Hosszú távú monitoringra alkalmas
Energetikai mutatók	Eltérésük ismert és dokumentált	Csak kiegészítő súlyossági mutatóként használhatók

7. táblázat: Javasolt alkalmazási ellenőrzőlista üzemi monitoringhoz

Általánosíthatóság és kutatási korlátok

A vizsgálat eredményei egy konkrét mérőrendszerhez és üzemeltetési környezethez kapcsolódnak. A vizsgált furathőcserélő 100 m mélységű, szimpla U-csöves talajszonda volt, 10 m-es mélységi hőmérsékletfelbontással. Más furatgeometria, eltérő csőelrendezés, más tömedékelési minőség, jelentősen eltérő talajrétegződés vagy más hidraulikai beállítás

esetén az átmeneti mélység számszerű értékei és érzékenysége eltérhetnek. Ezért az eredmények általánosítása további terepi vizsgálatokat igényel. [13]

További korlátot jelent, hogy a módszer visszatérő ági többmélységű hőmérséklet-mérés rendelkezésre állását feltételezi. A hagyományos primer oldali monitoring esetén, ahol csak belépő és kilépő hőmérsékletet mérnek, az átmeneti mélység nem határozható meg. A módszer tehát nem minden hőszivattyús rendszerben alkalmazható közvetlenül, hanem kifejezetten olyan mérési infrastruktúrát igényel, amely képes a talajszonda mélységi viselkedésének követésére.

A becsült COP-hatás értelmezése szintén korlátozott. A forrásoldali hőmérséklet-egyenértékből származtatott relatív COP-változás diagnosztikai jellegű mutató, nem pedig berendezésspecifikus teljesítménygarancia. A hőszivattyú tényleges COP-értékét a kompresszor karakterisztikája, a szabályozási stratégia, a részterhelés, a szekunder oldali hőmérsékletszint és a teljes rendszer hidraulikai állapota is befolyásolja. Emiatt a COP-hatás csak nagyságrendi, összehasonlító értelmezésre használható. [13], [14]

ÖSSZEGZÉS

A vizsgálat középpontjában nem a zónaazonosítási módszer részletes matematikai levezetése állt, hanem annak értékelése, hogy az exoterm–endoterm átmeneti mélység milyen üzemi és adatminőségi feltételek mellett alkalmazható megbízható monitoringindikátorként. A többmélységű visszatérő ági hőmérsékletmérések alapján a talajszonda mentén szegmensenként értelmezhető a hőhordozó közeg hőleadó vagy hőfelvevő viselkedése. Az időintegrált szegmensenergia és a bizonytalanságalapú osztályozás lehetővé teszi az exoterm, endoterm és bizonytalan szakaszok elkülönítését. Az ezekből meghatározott átmeneti mélység a parazita hőleadási zóna térbeli kiterjedésének tömör, mérnöki szempontból jól értelmezhető mutatója.

Az eredmények alapján az átmeneti mélység a vizsgált üzemi állapotokban stabilabb diagnosztikai indikátorként viselkedett, mint a közvetlen teljesítményjellegű mutatók. Az időablak-érzékenységi vizsgálat szerint alacsonyabb térfogatáram esetén az átmeneti mélység szűk tartományban, 31,05–32,01 m között változott. A küszöbskálázási vizsgálat szintén kedvező eredményt adott: az átmeneti mélység alacsonyabb térfogatáram mellett 31,10 m, magasabb térfogatáram mellett 24,00 m értéken maradt. Ez arra utal, hogy az indikátor nem a feldolgozási beállítások önkényes megválasztásából, hanem a visszatérő ágban következetesen megjelenő hőtechnikai mintázatból származtatható.

A vizsgálatok ugyanakkor azt is igazolták, hogy az indikátor megbízható alkalmazása nem függetleníthető az adatminőségi feltételektől. A kezdeti tranziens szakasz kizárása, a bizonytalanságalapú küszöbölés, a mintavételi sűrűség és a hiányzó adatok kezelése közvetlenül befolyásolja az eredmények értelmezhetőségét. A mintavételi ritkítás mellett az átmeneti mélység stabil maradt, míg a teljesítményjellegű mutatók érzékenyebbnek bizonyultak. A hiányadat-kezelés esetében különösen fontosnak bizonyult az adathiány időbeli és mélységi elhelyezkedése: alacsonyabb térfogatáramnál a 10–15 perces hiányok már érzékelhető eltérést okozhattak, míg magasabb térfogatáramnál az interpoláció hatása lényegesen kisebb volt.

A teljesítményjellegű mutatók, például az átlagos parazita veszteségteljesítmény, a forrásoldali hőmérséklet-egyenérték és a becsült COP-hatás fontos kiegészítő információt

adnak a lokalizált jelenség energetikai súlyosságáról. Ezek azonban érzékenyebben reagálnak az időablak-választásra, az adathiányokra és a mintavételi beállításokra, ezért elsődleges lokalizációs indikátorként az exoterm–endoterm átmeneti mélység alkalmazása indokoltabb. A térbeli lokalizáció és az energetikai súlyosság együttes értelmezése adhat meg-alapozott üzemi döntéstámogató információt.

A további kutatásokban indokolt a módszer kiterjesztése több furatra, hosszabb mérési kampányokra és eltérő szezonális üzemállapotokra. Különösen fontos annak vizsgálata, hogy a parazita hőleadási zóna ismétlődően azonos mélységtartományban jelentkezik-e, illetve hogyan változik hosszabb távú terhelési ciklusok, fűtési és hűtési üzemváltások, valamint eltérő hidraulikai beszabályozások mellett. Ezek az eredmények tovább erősíthetik a módszer üzemi állapotfelügyeleti és biztonság tudományi alkalmazhatóságát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] G. Florides and S. Kalogirou, ‘Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications’, *Renew. Energy*, vol. 32, no. 15, pp. 2461–2478, Dec. 2007, doi: 10.1016/j.renene.2006.12.014.
- [2] H. Yang, P. Cui, and Z. Fang, ‘Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems’, *Appl. Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 16–27, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.04.038.
- [3] S. J. Self, B. V. Reddy, and M. A. Rosen, ‘Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options’, *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 341–348, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.048.
- [4] P. Christodoulides, C. Christou, and G. A. Florides, ‘Ground Source Heat Pumps in Buildings Revisited and Prospects’, *Energies*, vol. 17, no. 13, p. 3329, Jul. 2024, doi: 10.3390/en17133329.
- [5] M. Soltani *et al.*, ‘A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems’, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 44, pp. 793–818, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.09.036.
- [6] H. Y. Zeng, N. R. Diao, and Z. H. Fang, ‘A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers’, *Heat Transfer—Asian Res.*, vol. 31, no. 7, pp. 558–567, Nov. 2002, doi: 10.1002/htj.10057.
- [7] T. V. Bandos *et al.*, ‘Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations’, *Geothermics*, vol. 38, no. 2, pp. 263–270, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.geothermics.2009.01.003.
- [8] D. Marcotte and P. Pasquier, ‘Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems’, *Geothermics*, vol. 37, no. 6, pp. 651–665, Dec. 2008, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.08.003.
- [9] L. Lamarche and B. Beauchamp, ‘A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes’, *Energy Build.*, vol. 39, no. 2, pp. 188–198, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2006.06.003.
- [10] P. Pasquier and D. Marcotte, ‘Joint use of quasi-3D response model and spectral method to simulate borehole heat exchanger’, *Geothermics*, vol. 51, pp. 281–299, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.02.001.
- [11] N. Aranzabal, J. Martos, H. Steger, P. Blum, and J. Soret, ‘Temperature measurements along a vertical borehole heat exchanger: A method comparison’, *Renew. Energy*, vol. 143, pp. 1247–1258, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.092.

- [12] K. Zhou, J. Mao, Y. Li, H. Zhang, and Z. Deng, 'Prediction and parametric analysis of 3D borehole and total internal thermal resistance of single U-tube borehole heat exchanger for ground source heat pumps', *Energy Built Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 179–194, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.11.001.
- [13] V. Zonai, L. Garbai, and R. Santa, 'Multipoint Temperature-Based Depth Analysis of a U-Tube Borehole Heat Exchanger', *Technologies*, vol. 14, no. 3, p. 187, Mar. 2026, doi: 10.3390/technologies14030187.
- [14] V. Zonai and R. Santa, 'In-situ identification of axial borehole thermal conductivity from measured transient heat extraction', *Energy Build.*, vol. 363, p. 117613, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.enbuild.2026.117613.
- [15] J. D. Spitler and S. E. A. Gehlin, 'Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1125–1137, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.061.
- [16] S. Wilke, K. Menberg, H. Steger, and P. Blum, 'Advanced thermal response tests: A review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 119, p. 109575, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109575.
- [17] P. Bujok *et al.*, 'Assessment of the influence of shortening the duration of TRT (thermal response test) on the precision of measured values', *Energy*, vol. 64, pp. 120–129, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.11.079.

Follow, like, post, publish! | Kövess, lájkolj, posztolj, publikálj!



<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu>



<https://www.linkedin.com/company/safety-and-security-sciences-review>



<https://www.facebook.com/biztonsagtudomanyi.szemle>