

Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből VI.

Szerkesztette
Gőcze István és Padányi József



LUDOVIKA
EGYETEMI KIADÓ

Szemelvények
a katonai műszaki tudományok
eredményeiből
VI.

Szemelvények
a katonai műszaki tudományok
eredményeiből
VI.

Szerkesztette
Göcze István – Padányi József



LUDOVIKA
EGYETEMI KIADÓ

Budapest, 2025

Szerzők

Balajti István	Kriszbacher Gergő
Biró Gabriella	Kuti Rajmund
Gávay György	Lucz Zsolt
Guth-Orji Ágnes Judit	Majorosné Lublőy Éva Eszter
Gyarmati József	Papp Csenge
Halmi Lajos	Ronyecz Lilla
Hegedűs Ernő	Szakályné Gyűrű Karina
Hornyacsek Júlia	Teknős László
Huszár Zsolt	Tóth Bence
Károly Krisztián	Vas Tímea
Kátai-Urbán Lajos	Veres Violetta
Kirovne Rác Réka Magdolna	

Szakmai lektorok

Bali Tamás	Krasznay Csaba
Ember István	Muhoray Árpád
Haig Zsolt	Padányi József
Kátai-Urbán Lajos	Taksás Balázs

Kiadja a Nemzeti Közszerológati Egyetem

Ludovika Egyetemi Kiadó

A kiadásért felel: Deli Gergely rektor

Székhely: 1083 Budapest, Ludovika tér 2.

Kapcsolat: kiadvanyok@uni-nke.hu

Felelős szerkesztő: Kilián Zsolt

Olvasószerkesztő: Csinta Áron

Tördelőszerkesztő: Kilián Zsolt

Korrektor: Bujdosó Hajnalka, György László

DOI: https://doi.org/10.36250/01323_00

ISBN 978-963-653-277-2

© A szerkesztők, 2025

© A szerzők, 2025

© A kiadó, 2025

Minden jog védve.

Tartalom

BALAJTI ISTVÁN

- Gondolatok az Education 5.0 alapú hadmérnökképzés szükségessége
és megvalósításának elvárásai témakörben: Hogyan képezzünk
Ipar 5.0 környezetbe integrált Dobó Istvánokat és Bornemissza Gergelyeket? 7

BIRÓ GABRIELLA

- A kiberbiztonsági és digitalizációs metrikák felhasználási lehetőségeinek
vizsgálata a kiberképességek meghatározásához 33

GUTH-ORJI ÁGNES JUDIT

- A poszt-Covid-szindróma, különös tekintettel
a fáradtság repülésbiztonsági jelentőségének
és a fáradtság objektív mérésének lehetőségeire 45

GYARMATI JÓZSEF – HEGEDŰS ERNŐ – GÁVAY GYÖRGY

- A 3D nyomtatás kutatásának eredményei
az NKE HHK Haditechnikai Tanszéken 67

HALMI LAJOS

- A pilóták és a légiutas-kísérők fiziológiai monitorozása
valós időben: Kihívások és lehetőségek 89

HUSZÁR ZSOLT – MAJOROSNÉ LUBLÓY ÉVA ESZTER – KÁTAI-URBÁN LAJOS

- Az építőipari segédszerkezetek által okozott súlyos balesetek
alapeseményeinek és megelőzési lehetőségeinek vizsgálata 101

KIROVNÉ RÁCZ RÉKA MAGDOLNA

- Az éghajlatváltozás hatása a katasztrófavédelmi
műszaki képességekkel szemben támasztott
követelményekre, különös tekintettel a műszaki innovációkra 121

KRISZBACHER GERGŐ – TÓTH BENCE

A magyarországi katonai repülőterek elhelyezkedése
a hagyományos erőművekhez képest 135

LUCZ ZSOLT – VAS TÍMEA – KÁROLY KRISZTIÁN

A szimulációs rendszereken alapuló képzés, kiképzés lehetőségei,
valamint hatékonyságának vizsgálata a Magyar Honvédség légierő
haderőnem fegyvernemeinél és szakcsapatainál 149

PAPP CSENGE – KUTI RAJMUND

A járműtűzek vizsgálatához alkalmazható
számítógépes szimulációk áttekintése 163

RONYECZ LILLA

A kritikus szervezetekkel kapcsolatos kockázat- és következményelemző
módszerek kutatása: Együttműködési platform alkalmazása 183

SZAKÁLYNÉ GYÜRÜ KARINA

Fenntartható műszaki fejlesztések a polgári védelemben:
Az energiatakarékos és környezetbarát technológiák szerepe 203

TEKNŐS LÁSZLÓ

Az orosz–ukrán konfliktus okozta gazdasági hatásokra adott
magyarországi fiskális és monetáris válaszok elemzése 219

VERES VIOLETTA – HORNYACSEK JÚLIA

Quo vadis tudományos kutatás? Így kutatunk mi...:
Kérdőíves kutatás a tudományos kutatómunka nehézségeiről,
a kutatást segítő és akadályozó tényezőkről a múltban
vagy a jelenben tudományos kutatást folytatók körében 239

A kötet szerzői 261

Balajti István

Gondolatok az Education 5.0 alapú hadmérnökképzés szükségessége és megvalósításának elvárásai témakörben

**Hogyan képezzünk Ipar 5.0 környezetbe integrált
Dobó Istvánokat és Bornemissza Gergelyeket?**

Az Ipar 4.0 (I4.0) és 5.0 (I5.0) korszak elvárja a mesterséges intelligenciával támogatott, hatékony ember-gép kapcsolatot, a robotok által végrehajtott tömegtermelést és más kettős felhasználású eszközrendszerek, például drónok és érzékelők nyújtotta lehetőségek kiaknázását a haditechnikai kutatás-fejlesztés-innováció területein. Az új készségek bevezetése szigorú előkészítő munkát, a hadmérnökképzés folyamatosan változó igényeihez illeszkedő, az Oktatás 4.0 (E4.0) és 5.0 (E5.0) lehetőségeit felismerő és kiaknázó, hatékony tudásátadási módszerek és részben személyre szabott követelmények kidolgozását igényli. A tanulmány célja a műszaki felsőoktatás kompetenciáin és korunk haditechnikai eszközökkel kapcsolatos szakmaspecifikus elvárásain alapuló hadmérnökképzés, ezen belül az elitképzés pedagógiai elvárásainak, kompetencia- és személyiségfejlesztési elemeinek és lehetőségeinek áttekintése, valamint a bővítések szükségességének kimutatása és integrálása a Ludovika Egyetemen folyó képzéshez. A tanulmányban bemutatott módszerek bevezetésével lehetőség nyílik olyan hadmérnökök képzésére, akik az I4.0 és I5.0 lehetőségekhez igazodó hadszínterek mesterséges intelligenciával támogatott internetbe kapcsolt szenzorhálózatainak értékelését, a haditechnikai eszközök helyszíni kreatív továbbfejlesztési lehetőségeinek felismerését és az újszerű műszaki megoldások kidolgozásának kihívásait képesek hatékonyan kezelni.

Kulcsszavak: hadmérnökképzés, Ipar 4.0/I5.0, Oktatás 4.0/E4.0, mesterséges intelligenciával támogatott megoldások, szenzorhálózatok, drónok, robotok

Motiváció

Lippai Péter dandártábornok 2025. március 13-án *A nemzeti haderő építése, a tisztképzés jelene és jövője* című témakörében megtartott előadása és az azt követő személyes konzultáció inspirálta a tématerülettel kapcsolatos vélemény és tapasztalatok írásbeli megfogalmazását (LIPPAI 2025).

Az elmúlt években paradigmaváltás történt a hadügy feladatainak területén. Ennek értelmében a honvédségnek újra a haza védelmére való felkészülés lett a legmagasabb prioritású feladata. Ezt követi a szomszédos országokkal közösen, például NATO-műveletek keretében vagy két- és többoldalú megállapodásokkal kiegészítve végrehajtható, természetföldrajzilag védhető határok megtartására való felkészülés. Tény, hogy egy közel 10 millió főt számláló ország nem engedheti meg a súlyos polgári és katonai élőerős veszteségeket, ezért a katonai erő demonstrálásához alapvető az élenjáró képzési módszerek alkalmazása.

Műszaki értelemben a paradigmaváltás újfajta, a haditechnikai képességeket valóban értékelő parancsnoki képességeket igényel, míg a hadmérnököktől a gyorsan fejlődő műszaki lehetőségek valós idejű alkalmazását várja el. Ennek alapja a hadszínterek mesterséges intelligenciával támogatott érzékelő és helyzetértékelő rendszereinek, különösen a földközeli légtérhasználat érzékelési és csapásmérési lehetőségeinek, valamint a drónoknak és a robotoknak a széles körű és tömeges hadszíntéri alkalmazása.

Nyolc szemeszteren keresztül a Debreceni Egyetem Műszaki Karán docensi munkakörben hazai és külföldi BSc- és MSc-hallgatókat oktattam, vizsgáztattam és készítettem fel szakdolgozatuk és PhD-értekezésük minél színvonalasabb elkészítésére. Főbb oktatási szakterületeim angol és magyar nyelven a következők voltak: Kiberfizikai rendszerek (48 óra/félév), Mérés és adatgyűjtés (24 óra/félév), Mechatronikai eszközök – érzékelők, aktuátorok (24 óra/félév), Méréstechnika (24 óra/félév), Cyber Security (48 óra/félév); valamint a villamosmérnöki MSc-képzésben: Jelfeldolgozás (36 óra/félév), Méréselmélet (24 óra/félév), Szűrők elmélete és gyakorlata (36 óra/félév) és Elektromágneses kompatibilitás és interferencia (36 óra/félév). A tananyagok legalább 20%-a radarrendszer-specifikus volt.

2001–2021 között a NATO Támogatási és Beszerzési Ügynökségének légvédelmi programokkal, radarrendszerekkel foglalkozó részlegén dolgoztam. Főbb feladataim közé tartozott a gerincradarok és a NATO-ban használt radarrendszerek performanciaállapotának *in situ* mérése, a mérési műszerek és eljárások kidolgozása, a légvédelmi alrendszerek korszerűsítésének menedzselése, a tudományos továbbképzések szervezése és az ezeken való aktív részvétel. Folytattam a NATO STO/RTO radarrendszerekkel kapcsolatos, még a Haditechnikai Intézetben elkezdett tudományos tevékenységeket.

Magyarország NATO-csatlakozása előtt tagja voltam a Tóth Ferenc tábornok által vezetett „Ismerjük meg, hogyan működik a NATO!” elnevezésű munkacsoportoknak. A Haditechnikai Intézetben feladatom volt a radar, a légvédelmi vezetési rendszerek és a rádiótechnikai ellenőrző rendszerek korszerűsítése és

fejlesztése. A 3. Rádiótechnikai zászlóaljnál részt vettem Budapest légvédelmi rendszerének telepítésében, a radarok és az érdei harcálláspont üzemeltetésében.

A felsorolt területeken szerzett tapasztalatok és a tématerület iránti érdeklődés teszi hitelessé a javaslatokat, amelyek a mérnöki gondolkodásmód *mit, miért és hogyan* struktúrájára épülnek, a hadmérnöki feladatok minél hatékonyabb elsajátítására fókuszálnak, ahol elvárás a feladat megoldásával járó előnyök, hátrányok, lehetőségek és kihívások azonnali nagybani értékelése.

Mit: olyan hadmérnökök és munkájukat értő parancsnokok képzése, akik kiemelt hatékonysággal, eredményesen és túlélőképességgel oldják meg feladataikat a 21. század csataterein.

Miért: valós időben felismerhetők legyenek korunk csatatereinek új kihívásai, ezekre használható vezetéselméleti és mérnöki megoldásokat dolgozzanak ki, és azokat integrálják katonai környezetükben a harcképesség fenntarthatósága és növelése érdekében.

Hogyan: a meglévő hadtudományi elvek és eljárások, valamint a már folyamatban lévő nagy értékű haditechnikai eszközök lehetőségeinek ismeretében olyan új kiegészítő megoldások bevezetése, amelyek kihasználják az I4.0/E4.0 és I5.0/E5.0 korszak nyújtotta lehetőségeket; a kettős felhasználású eszközök, például a kiberfizikai vagy IoT-rendszerek elméleteinek alkalmazása, kiemelt tekintettel az érzékelő rendszerekre, a mesterséges intelligenciával támogatott megoldásokra, a hatékony ember-gép kapcsolatra, a 3D-nyomtatásra, a drónalkalmazásokra, a robotok által végrehajtott tömegtermelés új lehetőségeinek kiaknázására és a rövid idő alatt megvalósítható haditechnikai kutatás-fejlesztési megoldások realizálására.

A szemléletváltás szükségessége a harcászati-műszaki követelményekben, beleértve az élettartam-támogatást és a logisztikát

A paradigmaváltás szükségessége

Szakirodalmi hivatkozások bizonyítják, hogy a nagy értékű haditechnikai eszközök és a lehetséges alkalmazási eljárások napjainkban a katonai vezetési elvek újfajta adaptálását várják el (KOVÁCS–KRASZNAY 2024; KOVÁCS 2023). Korábban a haditechnika kutatási-fejlesztési időszükséglete, a téma elindítása és a haderőkben történő sikeres integrálása között eltelt idő 10–15 év volt. Manapság az Ipar 4.0 és különösen az Ipar 5.0 képességei már lehetővé teszik a polgári és a kettős

(katonai + polgári) felhasználású eszközök kutatási-fejlesztési tevékenységének 1–4 év alatti megvalósítását.

Természetesen mindkét esetben a projekt összetettsége, a különböző mérnöki szakterületek átfedése és menedzselése a hosszabb megvalósítások irányát jelzi. Ezért napjainkban világviszonylatban megfigyelhető katonai elvárás a kutatási-fejlesztési tevékenységek eredményes felgyorsítására való törekvés. Ugyanakkor a hadseregek gerincét alkotó haditechnikai eszközök, például a nagy teljesítményű repülő, harckocsik, nehézlövegek, radarok, űrben elhelyezett eszközök és több hullámsávban párhuzamosan üzemelő érzékelő rendszerek esetében ez az út nem, vagy csak korlátozott mértékben járható.

Tény, hogy ezeknek a haditechnikai eszközöknek a másodlagos alkalmazói nem rendelkeznek a berendezések teljes performanciájával és az eszközök árát alapjaiban meghatározó 70–80%-os szoftverek forráskódjaival. Tapasztalatok szerint az ezen eszközök 15–20 évre tervezett élettartam-támogatása tíz év után alapvető problémákat jelent a gyártó számára is, mivel az eredeti fejlesztéseket végző szakemberek 5–10 év után állást vagy pozíciót váltanak, a számítógépes megoldások hardverkomponensei elavulnak, szervizelésük csak nagy nehézségekkel biztosítható, a rajtuk futó szoftverek illesztése az új elvárásokhoz rendkívül költség- és időigényes, hadszíntéri igényváltozások esetén a jelenlegi eljárás-orientált elvárások szerint valós időben megoldhatatlan.

Ezzel párhuzamosan elindult a földközeli légtér feletti uralom elérésére való törekvés, amely *ad hoc*, nagyon rövid idő alatt megvalósuló, 1–5 hónapos, tömegesen és olcsón előállítható drónalkalmazásokban valósul meg (HAIG–ILLÉSI–VARGA 2022; MAJOR–SZILVÁSSY–BÉKÉSI 2024). A probléma komplexitását növeli a harctéri robotok és a hagyományosan olcsó, de nagy tömegben gyorsan telepíthető különböző aknák, érzékelők és egyéb kettős felhasználású eszközök alkalmazása, amelyek a nagy értékű haditechnikai eszközök mobilitását jelentősen korlátozhatják.

A katonai kutatási-fejlesztési paradigmaváltás legnagyobb kihívása, hogy hogyan képezzünk olyan parancsnokokat és hadmérnököket, akik megtalálják a haderők gerincét alkotó haditechnikai eszközök hatékony védelmét, miközben kiterjesztik ezek performanciáját az újfajta hadszíntéri elvárásoknak megfelelően. Tapasztalatok szerint a természetben kialakult túlélési mintázatok felismerése és elvárásaink ezekhez való igazítása lehet a hatékony képzés alapja.

Megállapítható, hogy a hadszíntereken való eredményes tevékenység első és legfontosabb eleme a parancsnokok küldetésorientált vezetésszemlélete (LIPPAI 2025), míg a hadmérnökök fő feladata a hadszíntéri eszközök folyamatos és

költséghatékony kiépítése, fenntartása, valamint fejlesztése. Ennek legfontosabb eleme a szenzor- és érzékelőhálózat, valamint az összegyűjtött információk hatékony osztályozása, értékelése, a különböző típusú céltárgyak útvonalainak illesztése, fenntartása és azonosítása. Ennek ismeretében a parancsnokok dönthetnek az aktuátoreszközök (megsemmisítés és semlegesítés) hatékony alkalmazásának módozatairól.

Az elit parancsnok- és hadmérnökképzés lehetőségei és kihívásai

Ismert, hogy különböző szintű felsőfokú parancsnoki képzés folyik a Ludovika Egyetemen, míg a hadmérnökképzés és annak speciális élvonalbeli intézményei, például a Bolyai János Hadmérnöki Kar, a Kilián György Repülő Műszaki Főiskola és a Haditechnikai Intézet 15–20 éve fokozatosan elsovadt, és megszűnt. Napjainkban viszont egyre több, a kor műszaki tudományában mesterfokon képzett hadmérnökre van szükség.

A hadmérnökképzéssel kapcsolatos elvárások az alábbi képzési formákban oldhatók meg:

- *A baráti országok katonai műszaki egyetemein való képzés előnyei és hátrányai:* az előnyök között szerepel a hazaitól eltérő gondolkodásmódok és nyelvhasználat megismerése és elsajátítása, valamint az országok közötti kapcsolatépítés bővítése. A hátrányok közé tartozik a hazai elvárásoktól jelentősen eltérő szemlélet kialakulása, az adott ország hadiipari orientációja, a hazai nemzeti ipari háttér és termelési kultúra ismeretének hiánya, amelyet félévenként legalább kéthetes hazai kondicionálással kell csökkenteni. Ez minden megoldás közül a legköltségesebb alternatíva.
- *A Nemzeti Közszolgálati Egyetemen (NKE) folyó teljes spektrumú képzés előnyei és hátrányai:* az előnyök között említhető, hogy metodikája az I4.0 és I5.0 elvárások haditechnikai vonzatainak figyelembevételével, a történelmi, elsősorban nemzeti tapasztalatokra és a hazai mérnökképzés sajátosságaira támaszkodva kidolgozható. Erősíthető a nemzeti hovatartozás érzése, taníthatók a hazai harcászati-műszaki követelmények, a hadiipari termelési kultúra és együttműködési lehetőségek. Az akkreditációhoz szükséges oktatók egy része másodállásban felvehető más egyetemek műszaki karairól. A hátrányok közé tartozik, hogy részben vagy egészben újra kell teremteni az oktatási infrastruktúrát, a képzési tematikát és a laborokat. Az akkreditációhoz szükséges más egyetemen dolgozó oktatóknak nincs

hadmérnöki tapasztalata, a legjobb oktatók már legalább két egyetem alkalmazottai, így csak arra alkalmasak, hogy leadják a minimálisan szükséges óraszámokat. Az első valóban hadmérnöki képességekkel rendelkező hallgatók körülbelül tíz év múlva kerülhetnek ki az egyetemről. A képzés bevezetésének költsége folyamatosan változik, ezért nehezen becsülhető, de nagyon magas.

- *A hibrid megoldás előnyei és hátrányai:* az NKE csak összefogja, koordinálja és egységesíti, valamint kiegészíti a magyar egyetemeken folyó mérnök-képzés hadmérnöki aspektusait. Az előnyök megegyeznek a második pontban leírtakkal, valamint bevonhatók a nagy tapasztalatokkal rendelkező nyugdíjas hadmérnökök a műszaki karok élvonalbeli szoftver- és hardverprojektjei katonai alkalmazásainak kidolgozásába. Új hallgatói motivációs módszerek alkalmazhatók, az első mesterszintű hadmérnökök kibocsátási ideje öt év, és költséghatékony. A hátrányok közé tartozik, hogy a hibrid megoldás szerteágazó szervezési tevékenységet igényel, valamint új szemléleten alapuló oktatási tematikák kidolgozását és bevezetését több egyetemmel együttműködve.

Napjaink mérnök-képzésének komplexitását szemlélteti a mechatronika tantárgy, amely három alapvető tudományág – a mechanika, az elektronika és a vezérlés/szabályozás – szinergiájára épül. A mechatronika fejlődését jelzi, hogy az MTA GTB Mechatronikai Albizottsága 2024-ben a továbbfejlődés irányára tett javaslatot. Ennek értelmében a mechatronika bővül a szociális környezeti hatásokat integráló további három tudományterülettel: az érzékelők, az aktuátorok és az informatika (mesterséges intelligencia) területével (HORVÁTH–ÁBRAHÁM 2025).

A mechatronika oktatási tematikája három mérnöki szakirányt a rendelkezésre álló erőforrásokkal szemeszterenként 12 oktatási hét alatt old meg (plusz 2 hiánypótló/rajz), ami nagy kihívást jelent az egyetemi oktatógárda és a hallgatók számára. A különböző egyetemek műszaki karain általános elvárás, hogy a szakra jelentkező hallgatók felkészültsége 15–25%-kal magasabb legyen a többi mérnöki szakra jelentkezőkénél. Hasonlóan más szakirányokhoz, a villamos- és informatikai mérnöki képzések színvonala, az oktatók, a laboratóriumok felszereltsége és kihasználtsága a különböző egyetemeken szintén jelentős eltérést mutat.

Tapasztalatok szerint a magyar felsőoktatás az egyetemek környezetébe települt ipari üzemmérnöki elvárásainak teljesítésére koncentrál, és a tanszékek akkreditációs, valamint a doktori iskolák PhD-képzési elvárásait és színvonalát ezekhez igazítják. Ettől némileg eltér a néhány egyetemen folyó szakirányú

természettudományos képzés iránya, de ezzel együtt is megállapítható, hogy a BSc- és MSc-szintű okleveles üzem-mérnökök és szakemberek nem rendelkeznek a haditechnikai kutatás-fejlesztés által elvárható speciális felkészültséggel.

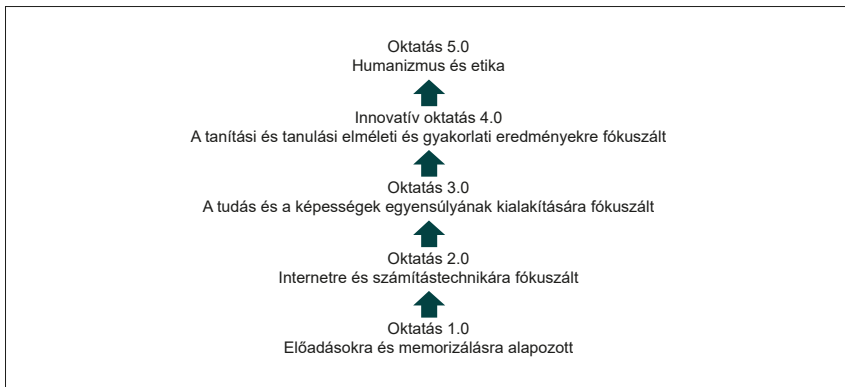
Igaz, hogy a mechatronikai szakirány már magában bizonyos fokú elit mérnök-képzés, de még így is csak a hallgatók körülbelül 20%-a motivált és érdeklődik a magasabb szintű, az üzem-mérnöki elvárásokon túlmutató lehetőségek iránt. A nagyvállalatok szintén a legjobb hallgatókat keresik, és többségük már az 5. szemesztertől hazai és nemzetközi versenyeket, speciális felkészítési kurzusokat, valamint heti 20 órás gyakornoki munkakört és fizetést ajánl. Ezért alakult ki az egyetemek oktatási struktúrájában a koncentrált 24 óra egyetemen, plusz 20 óra vállalatnál eltöltött foglalkoztatási gyakorlat.

Természetes, hogy a vállalatok saját elvárásaikhoz igazodó belső képzéseket alkalmaznak. A hazai hadmérnökképzés számára ez a tény olyan kihívást jelent, amely egyúttal lehetőséget ad a haditechnika iránt érdeklődő hallgatók oktatására. Tapasztalat, hogy ez akkor hatékony, ha a képzés elején ígért és következetesen számonkért kihívások teljesítését ismert elvárások szerint honoráljuk.

Összességében megállapítható, hogy ma hazánkban nincs hadmérnökképzésre akkreditálható egyetem vagy kar. Ezért a hibrid megoldások keresése és alkalmazása látszik célszerűnek. A költség-hatékony megoldások keresése közben ki lehet és kell használni a különböző egyetemek mérnöki oktatási színvonalának növelését szolgáló már elért eredményeket, például a Debreceni Egyetem Műszaki Karán kifejlesztett, katonai tapasztalatokat is integráló és az oktatásban már sikeresen alkalmazott „kihívásalapú” „Agykarbantartás” és „Nobel sörök” módszerelemet (KOCIS – BURJÁN-MOSONI – BALAJTI 2025).

Az ipari igényekhez alkalmazkodó oktatás fejlődése

A hadtudomány, valamint a katonai műszaki tudomány fejlődése szorosan kapcsolódik az ipari lehetőségekhez, ezért a kialakulóban lévő ipari átalakulás oktatással kapcsolatos elvárásainak ismerete meghatározza a hadmérnökképzés színvonalát. A mai modern társadalom sajátja a jelentkező túlzott fogyasztásra vonatkozó igények kielégítése. A vállalatoktól és részben korunk katonai parancsnokaitól kapott visszajelzések szerint a különböző mérnöki pozíciókban elvárt alapvető viselkedési és együttműködési követelményeket (például pontos munkavégzés, kommunikáció, kreatív és kritikus gondolkodás, társadalmi tolerancia) a fiatal mérnökök furcsának vagy akár elfogadhatatlannak tartják. Egyre nagyobb szakadék



1.1. ábra. Az ipari környezet változásához igazodó oktatási szintek

Forrás: a szerző szerkesztése

figyelhető meg az alfa és a béta generáció életstílusa, valamint az ipari vállalatok (általában az üzleti szektor) és a katonai pálya által megkövetelt, szakirodalom szerint nyolc fő kategóriába sorolt „puha készségek” (*soft skills*) között.

A mérnökpedagógia szakirodalmának áttekintése alapján a legismertebb, széles körben elterjedt pedagógiai módszerek mindegyike a mérnöki kulcskompetenciák fejlesztését hivatott támogatni. Ezek a következők: *challenge-based learning* (kihívásalapú tanulás) (KOC SIS–KORONDI 2024), *collaborative learning* (kollektív tanulás) (KIS et al. 2023), *competency-based learning* (kompetenciaalapú tanulás), *cooperative learning* (kooperatív tanulás) (CHEW et al. 2020), *crossover learning* (keresztező tanulás), *flipped classroom* (fordított osztályterem), *gamification* (játékalapú tanulás), *problem-based learning* (problémaalapú tanulás), *project-based learning* (projektalapú tanulás).

Az 1.1. ábra áttekinti az ipari környezethez igazodó oktatási elvárások és lehetőségek fejlődését.

A legelterjedtebb az Oktatás 1.0 szintű hagyományos, előadás-alapú oktatási módszer, amelyet gyakran merevnek és elavultnak neveznek. Ez a szint már elégtelen a jövő mérnökeinek, ezért átalakul olyan diákközpontú megközelítések alkalmazásával, amelyek a műszaki ismeretekkel párhuzamosan a transzverzális és a „puha készségek” fejlesztését is elősegítik.

Az Oktatás 2.0 szintjén a mérnökképzés az internetre és a számítástechnikára fókuszál, és a diszciplináris kompetenciák már specifikusak. Orthey ezeket a szükséges kompetenciákat négy kategóriába sorolja (ORTHEY 1999): szociális

(például kommunikációs és együttműködési képesség), személyes (például felelősség, önbecsülés, vezetői képesség), szisztematikus (például problémamegoldó és elemzőképesség) és általános (például projektmenedzsment, informatikai) kompetenciák.

Az Oktatás 3.0 szintje a tudás és a képességek közötti egyensúly kialakítására törekszik. A leghatékonyabb módszerek között a projektalapú tanulást (BAIDAL-BUSTAMANTE – MORA – ALVAREZ-ALVARADO 2023), a problémaalapú tanulást (SRAVANTHI–DHARMAVARAPU–NEERAJA 2024), a fejlesztői/tervezői gondolkodást és a kompetenciaalapú tanulást azonosították. Ezeket a módszereket azért emelték ki, mert a valós problémákkal való foglalkozásra, a kreativitásra, a strukturált problémamegoldásra és a célorientált készségfejlesztésre összpontosítanak.

Az Oktatás 4.0 már a negyedik ipari forradalom keretében az oktatásban alkalmazott technológiai fejlesztéseken, automatizáción alapszik, és a technológia használatával kapcsolatos adaptív tanítási módszerek kihasználására törekszik. Célja a tanulók készségeinek, képességeinek és a jövőbeli munkahelyekhez szükséges értékeknek a fejlesztése.

Az Oktatás 5.0 a közeljövő technológiája integrálásának és a tanulói élmény központba helyezésének szemlélete. Vest tanácsa az Oktatás 5.0 szintjén már elérhető célkitűzés (VEST 2006): „Hosszú távon az egyetemek és a mérnöki iskolák izgalmas, kreatív, kalandos, szigorú, igényes és erősítő miliővé tétele fontosabb, mint a tantervi részletek meghatározása.” A személyre szabott tanulást, az együttműködést, a jólétet és a 21. századi készségek fejlesztését (kritikus gondolkodás, kreativitás, problémamegoldás) helyezi előtérbe. Természetesen integrálja és szükség szerint kiegészíti az alsóbb szintek elvárásait és lehetőségeit (HORVÁTH 2025).

Korunk hadmérnök-pedagógiai kihívásai

A mérnöki hatékonyság fejlesztésének társadalmi dimenziói

A hatékony parancsnoki és hadmérnöki képességek kiteljesedésére jelentős hatással vannak különböző társadalmi kompetenciák, amelyeket összefoglalóan „puha készségeknek” nevezhetünk. Ezek közé tartozik a mérnöki felelősség dilemmáinak megértése, a jogi és etikai tudatosság és felelősségvállalás, valamint a mérnöki gyakorlatban jelentkező fenyegetések és veszélyek felismerése. Továbbá lényeges az elkötelezettség nélküli felelős döntések meghozatalának

képessége, a mérnöki megoldások társadalmi hatásának mérlegelése, az integritás, valamint a becsületesség és a szakmaiság magas színvonala szerinti cselekvés (KOC SIS – BURJÁN-MOSONI – BALAJTI 2025).

Különösen fontos a nem megjátszott empátia tanúsítása, mások érzelmeinek a megértése és megosztása, valamint az önismeret a saját erősségek és gyengeségek tekintetében. Ezen túlmenően elengedhetetlen a rugalmas és hatékony érzelem-szabályozás kihívást jelentő helyzetekben történő alkalmazása.

A jelenlegi képzési rendszer hiányosságai

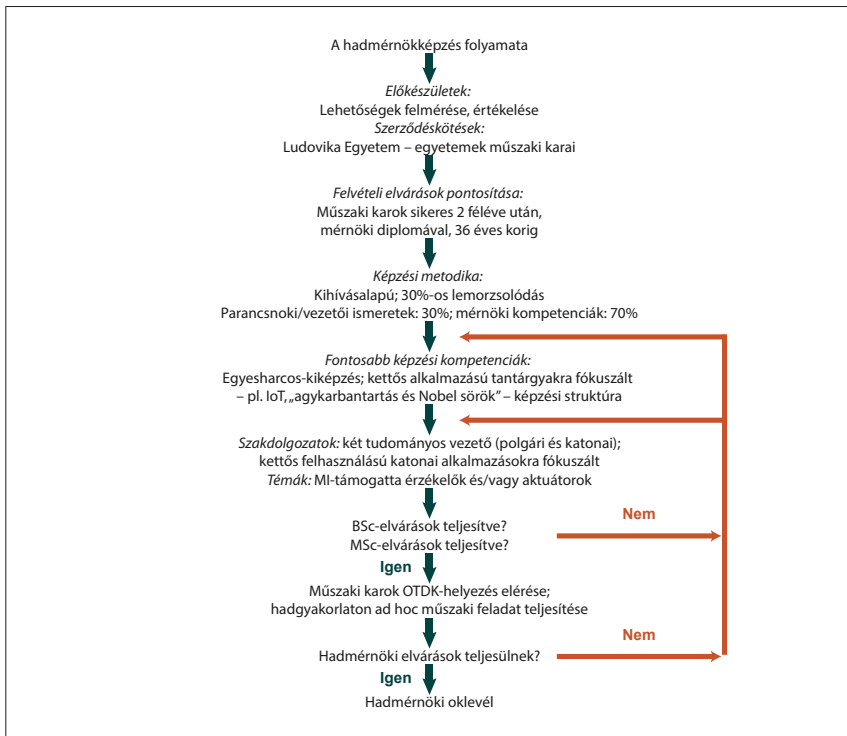
Az ezeknek való megfelelés hiányosságai alapvető nevelési és környezeti szocializációs sajátosságokkal magyarázhatók, ahol a diákok más értékek felé orientálódnak, és nem megfelelően készülnek fel az ipar és a katonaság által elvárt kihívásokra. A legfontosabb problémák közé tartozik a hallgatók közötti jelentős előképzettségbeli különbség, amely megnehezíti az egységes színvonalú oktatás megvalósítását.

Megfigyelhető, hogy bár a hallgatók kiemelkedő okostelefon-használati képességekkel rendelkeznek, és körülbelül 70–80%-uk zseniális az adott szakterületen, ez a potenciál gyakran kihasználatlan marad. Problémát jelent a műszaki jelentések írásához szükséges készségek szinte teljes hiánya, ami a strukturált gondolkodásmód fejletlenségére utal. Hasonlóképpen hiányos az előadókészség, amely a jövőbeli mérnöki karrierben alapvető fontosságú.

További kihívást jelent a mérnöki logikus gondolkodásmódhoz, az alapelvekhez és a szükséges alapismeret-anyagokhoz való érdektelen hozzáállás. Paradox módon a hallgatók rendelkeznek komoly, de általában rendezetlen, internetalapú ismeretekkel, miközben csökken a műszaki területek iránti érdeklődés és motiváltság. Pozitív tendenciaként említhető, hogy sokan elfogadják a kihívásokat, amennyiben a feladattámasztó következetesen betartja ígéreteit.

Az oktatási kihívások összetett természete

Ezek figyelembevételével a hadsereg különböző szegmenseiben, a hadmérnökök számára szükséges oktatási programokban a készségek és tapasztalatok gazdagítására szolgáló feladatok azonosítása, intenzív fejlesztése és eszközökkel, laborokkal való ellátása összetett kihívást jelent. A probléma komplexitását tovább növeli, hogy a változások dinamikája miatt a képzési tartalmakat folyamatosan aktualizálni szükséges.



1.2. ábra. A hibrid hadmérnökképzés folyamata

Forrás: a szerző szerkesztése

Javaslat a hibrid hadmérnökképzési struktúra kialakítására

A hibrid hadmérnökképzés alapelvei és elvárásai

Az 1.2. ábra áttekinti a javasolt hadmérnökképzési struktúrát, amely ötvözi a magyar egyetemek felsőfokú műszaki képzéssel kapcsolatos kihívásait a katonai speciális elvárásokkal. Ebben a hibrid képzési formában kihasználhatók a műszaki tanszékek erős kompetenciái és oktatói-laboratóriumi kapacitásai, miközben csökkenthető és részben kiküszöbölhető a meglévő hiányosságok hadmérnökképzésre gyakorolt hatása. Kiszűrhető néhány egyetem által meghirdetett, de laborok vagy akkreditálható oktatók hiányában nem teljes képességek bevonása a képzésbe.

A jelenleg folyamatban lévő képzésekhez képest ennek lényege, hogy a különböző egyetemeken folyó mérnöki tanulmányok tematikáit és órastervezetét összehangolják és kiegészítik a speciális katonai parancsnok- és hadmérnökképzés elvárásaival. Ezeket az NKE és a honvédelmi kutatási-fejlesztési tevékenységet folytató szakképzett tiszti állomány közösen dolgozza ki, és hajtja végre, az idevonatkozó Képzési és Kimeneti Követelmények (KKK), valamint Programtervek (PTT) elvárásai alapján.

A hibrid képzési modell sarokkövei

Az elképzelés koordinátora és a képzés színvonalának felügyelete az NKE és az oktatást megrendelő szervezetek feladata. Az elképzelés sarokkövei több alapelvet foglalnak magukban.

Elsődleges követelmény az elvárt beiskolázási létszám, amely minimálisan tíz főt jelent. A képzés alapja a kihívásalapú képzési módszer, amely magába foglalja az 1.2. táblázat elvárásainak teljesülését, és 30%-os lemorzsolódással számol. Ez hasonló az IEEE által jelzett legszínvonalasabb konferenciák elutasítási rátájához. A legjobbaknak is meg kell tanulniuk kezelni a „katonaszerencse hiányát”.

Fontos alapelv, hogy a parancsnokok és a hadmérnökök tananyaga $35\pm 5\%$ -ban megegyezik. A hadmérnöki alapfokozat megszerzésének elvárása 50%-ban a katonai rátermettség és habitus, valamint 50%-ban az adott műszaki kar elvárásainak legalább közepes szintű teljesítése és az NKE által elvárt kiegészítő kompetenciák, tananyagok legalább jó értékeléssel való teljesítése.

Szakkolgozat és tudományos elvárások

A karon elvárt szakkolgozat témája az NKE-vel jóváhagyott és kidolgozásában tártémavezetővel biztosított nyílt besorolású dokumentum kell hogy legyen. A hadmérnöki mesterszakos dolgozatokban a Magyar Honvédség (MH) kutatási-fejlesztési elvárásaihoz illeszthető feladatot kell megoldani, amely szükség esetén titkosítható.

További, az elitképzéssel járó elvárás az Országos Tudományos Diákköri Konferencia (OTDK) műszaki szekcióján való helyezések elérése, a nemzeti hivatkozás érzésének erősítése, valamint a kapcsolatépítés a közeljövő közép- és felső vezetőivel. Ez elvárásként szerepel a hadmérnöki doktori képzésre való jelentkezés kritériumaiban.

Gyakorlati alkalmazás és értékelés

Feladatot jelent az elhangzó előadások katonai hasznosítási szempontok szerinti értékelése és az arra érdemesekről műszaki jelentések készítése. Például az OTDK által értékelt, katonailag is figyelmet érdemlő témák közé tartoznak: adott terület felett lebegő magaslégköri ballonok földmegfigyelési célokra történő alkalmazása, *in situ* radarperformancia-mérések drónplatformról, többszörösen kiterjesztett Kálmán-szűrő-alkalmazások, dróntechnológiák, valamint az orvosi mérőműszerek IoT-alapú kiértékelése.

A sikeres polgári mesterszakos diploma megszerzése után hadgyakorlat kere-tében, 72 munkaóra alatt sikeresen kell megoldani egy kihívásalapú szakfeladatot. Ilyen lehet például a drónelhárítás gépágyúra szerelhető mesterséges intelligenciá-val támogatott kvázi monostatikus érzékelőkkel, az alacsony költséggel meg-valósítható, adott vármegyét lefedő, 800 méter földközeli magassági tartományban hatékony 15–20 ezer érzékelőt alkalmazó IoT-alapú több hullámsávú adatgyűjtő rendszer, ennek mesterséges intelligenciával támogatott információkiértékelése, valamint a mesterséges intelligenciával támogatott 3D-nyomtatással gyártott hatékonyaságnövelő többfeladatú drónplatform.

A végzős mesterszakos hadmérnökök 30%-a kapja meg az „elit hadmérnök” érdemérmet, amely elismerés a kiváló teljesítményt és a jövőbeli vezetői poten-ciált jelzi.

A hadmérnökképzés alapkövetelményeinek kidolgozását segítő oktatási tapasztalatok

A Debreceni Egyetem Műszaki Kara oktatási tesztjének környezetfejlesztése

A műszaki karok értékkeremtő, ugyanakkor piacorientált és folyamatos változás-ban lévő mérnökképzési tematikáihoz az elvárt kezdeti és kimeneti képességek azonosítása és meghatározása folyamatos feladat. A Debreceni Egyetem Műszaki Karán (DEMK) kifejlesztett oktatási tesztkörnyezet a legújabb kutatási eredmények által meghatározható és elvárt készségek, képességek fejlesztésére, valamint a tananyagok hatékony elsajátítására fókuszál.

Ennek az oktatási módszernek kezdeményezője, végrehajtója és a hatékonyságát értékelő munkacapat tagja voltam. Lényege egy modern ipari, üzleti és részben

katonai elvárásokat is magában foglaló struktúra szimulációja, amely magában foglalja a tipikus emberi interakciókat (utasítások, objektív és szubjektív értékelés) és szerepeket (például főnök, mérnök, munkatársak, ügyfelek), a mindennapi mérnöki munka formális elemeit (például dokumentáció, prezentáció, beszámoló), valamint az önszerveződést (együttműködés, ötletmegosztás, időgazdálkodás).

Az oktatási környezet alapfeltevései

Az oktatási környezet három alapfeltevésre épül. Elsősorban feltételezi, hogy a műszaki szakmaspecifikus ismeretanyag megszerzése kiemelt jelentőségű. Másodsorban az oktatásraallokált időkeretek változatlanok maradnak, miközben a „puha készségek” és az „attitűdök” szintén fontos alapjai a sikeres karriernek. Harmadsorban az alfa generáció „puha készségei” nincsenek összhangban az ipari vállalatok és a hadsereg igényeivel.

A kihívásalapú oktatási módszer elemei

A tanulmányi programok utolsó szakaszaiban az oktatók tapasztalatain alapuló interaktív, kihívást jelentő környezet elősegíti a hallgatói szakmai készségek elsajátításán túlmenően az olyan „puha készségek” és viselkedési formák kifejlődését, amelyek megfelelnek a szakterületen támasztott elvárásoknak. A módszer fő jellemzői speciális részfeladatokhoz kapcsolva a következő területeket ölelik fel: iparban jelentkező mindennapi feladatok és elvárások (kis feladatok gyűjtése), a személyiség és a környezet megismerése (kis feladatok kidolgozása), a mérnöki gondolkodásmód és íráskészség fejlesztése (műszaki beszámolók benyújtása), a projektszemlélet és csapatmunkakészség fejlesztése (csapatmunka-feladatok), a kommunikációs és prezentációs készség fejlesztése (műszaki előadás), a kurzus-specifikus műszaki ismeretek és az általános mérnöki intelligencia felmérése („agykarbantartás” tesztek), valamint a tudományos kutatási-fejlesztési tevékenységekre való kihívásalapú felkészítés.

Az 1.1. táblázat részletezi a javasolt kihívásalapú oktatási módszer fő elemeit. A *kis feladat* (KF) a kurzushoz kapcsolódó kihívásokat jelent, minél nagyobb gyakorisággal. A *műszaki beszámoló* (MB) másfél-két oldalas strukturált jelentés a főnöknek, amelyet 3–5 alkalommal kell elkészíteni szemeszterenként. A *csapatmunka* (CsM) 3–4 közel azonos képességű fő csapatfeladatát jelenti, amelyet

1.1. táblázat. A javasolt kihívásalapú oktatási módszer fő elemei

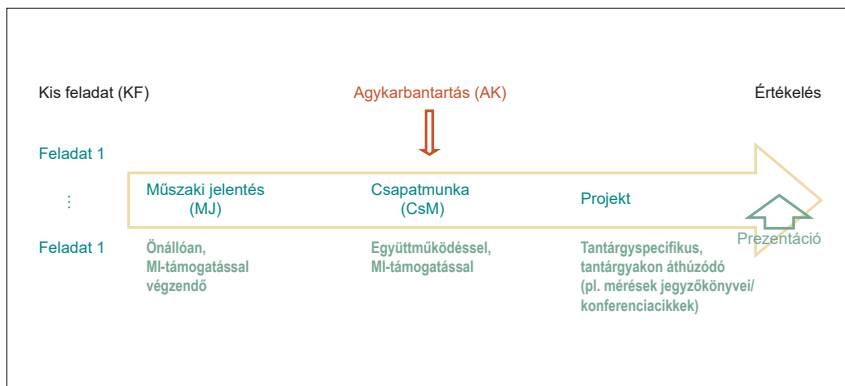
Feladat	Típusa	Gyakorisága
Kis feladat – KF	A kurzushoz kapcsolódó kihívások	Amennyi lehetőség*
Műszaki jelentés – MJ	1,5–2 oldalas strukturált jelentés a főnöknek	3–5 szemeszterenként*
Csapatmunka – CsM	Közel azonos képességű 3–4 fő csapatfeladata	2 szemeszterenként*
Agykarbantartás – AK	30 kérdéssel reprezentált tananyagokból 20 megválaszolása 90 perc alatt	1 szemeszterenként, háromszor ismételtető
Prezentáció – Pr	Szóbeli vizsga is, kötelezően: 10+2 dia, 10 perc	1 szemeszterenként

Forrás: a szerző szerkesztése

Megjegyzés: * az MI-használat ajánlott, de az AK és a Pr csak ezek nélkül teljesíthető;

** az MJ és a CsM házi feladata eLearningben jegyzett és egyszer 10 napon belül javítható.

két alkalommal hajtanak végre szemeszterenként. Az *agykarbantartás* (AK) 30 kérdéssel reprezentált tananyagokból 20 megválaszolását jelenti 90 perc alatt, amelyet szemeszterenként egyszer, háromszor megismételhetően kell teljesíteni. A *prezentáció* (Pr) szóbeli vizsgaként is funkcionál, kötelezően 10+2 diával, 10 percben, szemeszterenként egyszer.



1.3. ábra. A kihívásalapú oktatási metodika tevékenységi sorrendje

Forrás: a szerző szerkesztése

Az 1.3. ábra mutatja a tanulási célok és a feladatok sorrendjét és kapcsolatait, míg az 1.2. táblázat bepillantást nyújt az egyes feladatok értékelésébe.

A részfeladatok részletes ismertetése

A KF olyan műszaki probléma vagy kérdés, amellyel a mérnökök mindennapi tevékenységük során találkozhatnak. A hallgatóknak fel kell mérniük a műszaki, pénzügyi és vezetéssel kapcsolatos követelményeket, a szükséges erőforrásokat, és megvalósítható javaslatot kell tenniük. A KF-ek kiindulást jelentenek a kurzusfeladatok, például a műszaki jelentések és a csoportmunka kihívásainak megismeréséhez.

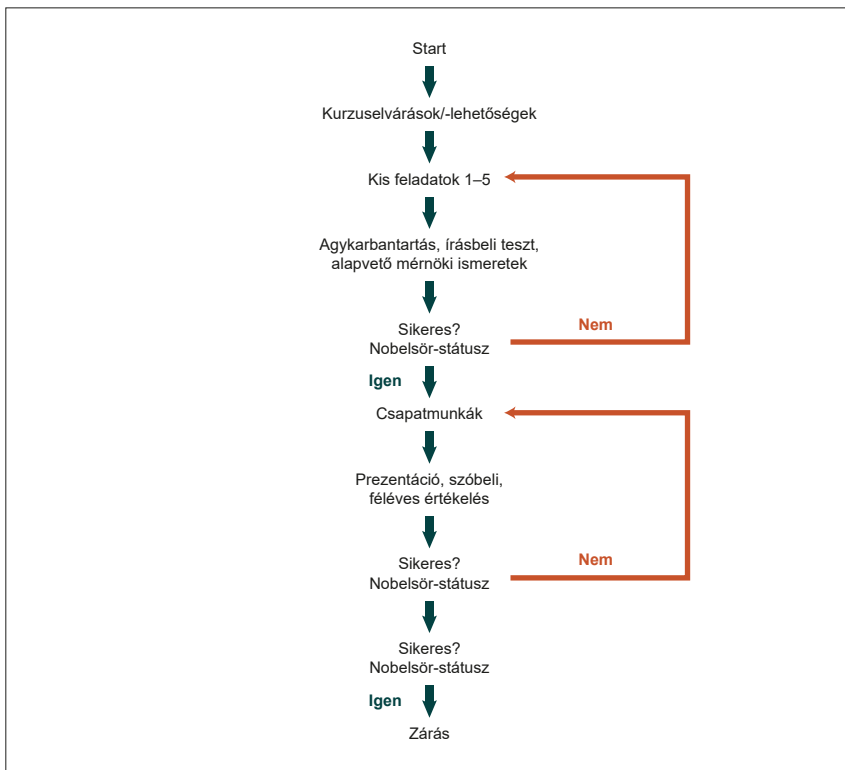
Az MB a főnöknek szóló dokumentum, amelynek terjedelme másfél-két oldal, Word 11 pontos formátumban, tömören, de szabatosan megfogalmazva. Szerkezete magában foglalja az absztraktot (10–15%, 5–6 sor), a kifejtést (50–70%), a bevezetést/*state-of-the-art* szakirodalmi összefoglalót és a javaslatot, a lényegi összefoglalót megjelenítő ábrával, amely 5 × 7 centiméter, a konklúziót (10–15%, 5–6 sor), valamint az irodalomjegyzéket (10–15%).

1.2. táblázat. *A hallgatók szemeszteri tevékenységeinek értékelése*

Feladat	Értékelés	Megjegyzés
Kis feladat – KF	A MJ és a CsM feladatának megfogalmazása során	Folyamatosan
Műszaki jelentés – MJ	1 db Ns: 3 db 90%-osnál (4 db – 80%) jobb MJ-ért; extra Ns, ha 5 db 90%-os MJ	Ns: Nobel sör (virtuális elismerés)
Plusz munkák, például műszaki cikk írása	1 db Ns: ha a nemzetközi konferencia szervezői elfogadják	Folyóirat- és/vagy konferencia-követelmény
Csapatmunka – CsM	1 db Ns, ha 90% minden csapattagnak	Max. 2 Ns/szemeszter
Agykarbantartás – AK	Ha sikertelen, a fél éves munka érvénytelen	Nincs Ns
Prezentáció – Pr	Jelentés bármilyen releváns témában, kérdések	Nincs Ns

Forrás: a szerző szerkesztése

A CsM egy KF vagy KF-ek kombinációjának részletes kidolgozását jelenti, amelyet 3-4 fős csapatok végeznek. A csapattagokat MJ-értékelésük alapján a tanár állítja össze, a legjobbak a legjobbakkal, a gyengék a gyengékkel elv alapján. A csapat szervezi meg a feladat elvégzéséhez szükséges tevékenységeket, valamint



1.4. ábra. Az oktatási folyamat kihívásainak értékelési kapcsolata

Forrás: a szerző szerkesztése

azonosítja és összehangolja a tagok kompetenciáit. A félév elején a tanár értékeli a feladatokat. Később a csapatok értékelik egymás munkáját, ezáltal gyakorolják a kritikai szemléletet. Ez a konstruktív kritikai megközelítés motiváló, és a diákok tanulnak egymás hibáiból.

Az AK a hagyományos, formális tesztekhez hasonlít, de speciális tartalma és célja van, mivel az aktuális tananyag felmérésén túl olyan mérnöki közösségi követelményeket is szimulál, ahol a mérnöki intelligencia hiánya kínos helyzetekhez vezethet, és befolyásolhatja az illető elismertségi szintjét. A kurzusok elején e-learning-környezetben mintakérdések és -válaszok formájában felmérhetők az elvárások és a lehetőségek. A hallgatók által is ismert harminc kérdéskör közül húsz kérdésre kell helyesen válaszolni ahhoz, hogy a teszt megfeleljen.

Néhány fontos AK-kérdéskategória magában foglalja a matematikát (például számrendszerek, lineáris algebra és statisztika), a menedzsmentet (például elvárások egy jó mérnökkel szemben, elvárások a csapatmunkában, a csapatmunka jellemzői, érvelési és tárgyalási technikák, személyiség típusok és a projektmenedzsment elemei), valamint a szakmai ismereteket (például az elektromágneses spektrum jellemzői, az érzékelők performancijellemzőinek meghatározása, a jelfeldolgozás elemei, transzformációk, Ipar 4.0 és 5.0, a mesterséges intelligencia alkalmazása).

A Pr zárja a szemeszttert, amely szóbeli vizsgaként működik. A témák hasonlóak a félév során az MB-ben vagy a CsM-ben kidolgozottakhoz. A valós tudás mérése érdekében a hallgatók, a félévközi feladatokkal ellentétben, nem használhatnak külső forrásokat (például tablet, internet, mesterséges intelligencia). A Pr szerepjátékos gyakorlat, amelyben a tanár a „főnök”, a vizsgázó a „beosztott”, a hallgatótársak pedig a „kollégák” vagy az „ügyfelek” szerepét játsszák. Ez a feladat lehetőséget ad a tanulóknak, hogy fejlesszék előadói készségeiket. A szigorú időkorlátoknak köszönhetően a hallgatók megtanulják, hogy tömören mutassák be témáikat. A módszer a mérnöki pályafutás fontos eleme, például állásinterjúk, műszaki beszámolók, projektek bemutatásakor.

Az 1.4. ábra szemlélteti az „agykarbantartás” és „Nobel sörök” kihívásalapú oktatási módszerének értékelési folyamatát. Természetes elvárás, hogy a mérnöki tevékenység megfeleljen a műszaki szabványoknak, a gyártástechnológiai elvárásoknak és a megrendelői igényeknek, miközben figyelembe veszi a rendelkezésre álló erőforrásokat és határidőket. A részfeladatok célirányosak és átfedik egymást, hogy elősegítsék a mérnökhallgatókban a felelősségvállalással kapcsolatos ismeretek gazdagodását. Ezt hivatott elmélyíteni a tanár által provokált *Lázadás és kezelése* teszt, amely az AK és a Pr feladat között valósul meg. A gyakorlatban csak kétszer sikerült kivitelezni, de a hallgatók számára jelentős kihívással, tapasztalattöbblettel és motivációemeléssel járt.

A DEMK-módszer eredményességének értékelése

A hatékonysági mutatók elemzése

A módszer hatékonyságát részletesen elemezték és értékelték a hazai és a nemzetközi szakfolyóiratokban (KOC SIS – BURJÁN-MOSONI – BALAJTI 2025; BURJÁN-MOSONI – BALAJTI – KOC SIS 2025). Az elért eredmények szemléltetését szolgálja

az 1.3. táblázat. Ez által csak részleges értékelés lehetséges, mivel a módszer a különböző tananyagok és előadói tevékenységek speciális kombinációja, de a feladatokhoz kapcsolódó hatékonyság értékelhető.

1.3. táblázat. A hallgatói tevékenységek eredményessége

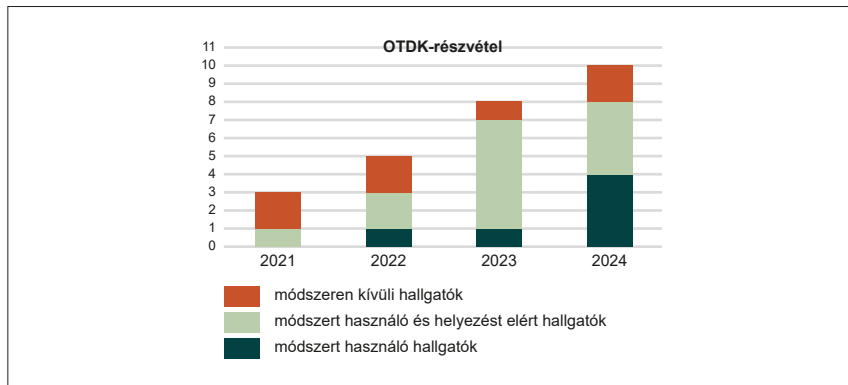
AK	MJ1	MJ2	MJ3	MJ4	CsM1	CsM2	Pr	Jegy	
1,00	0,31	0,47	0,42	0,45	0,13	0,18	0,53	0,49	AK
	1,00	0,41	0,47	0,37	0,23	0,25	0,51	0,58	MJ1
		1,00	0,70	0,55	0,34	0,26	0,53	0,62	MJ2
			1,00	0,52	0,22	0,45	0,50	0,50	MJ3
				1,00	0,12	0,36	0,45	0,38	MJ4
					1,00	0,27	0,23	0,16	CsM1
						1,00	0,11	0,34	CsM2
							1,00	0,78	Pr
								1,00	Jegy

Forrás: a szerző szerkesztése

A 191 hallgató munkájának elemzéséből kiderül, hogy a Pr, amely egyben a tantárgyak szóbeli vizsgáinak átlaga, a leghatékonyabb a hallgatói teljesítmény tekintetében (0,78 korrelációs együttható). Ezt követi az MJ2 és az MJ1 mérsékelt korrelációval (0,62 és 0,58). Míg a CsM1 és a CsM2 gyenge korrelációt mutat a jegyekkel (0,16 és 0,34), ugyanakkor a hallgatói interjúk és visszajelzések kiemelik fontosságukat a „puha készségek” fejlesztésében. Ezért a hangsúlyt a Pr-ek és az MJ-ek fejlesztésére kell helyezni, miközben a csapatmunkával kapcsolatos feladatokat is tovább kell fejleszteni a hosszú távú előnyök miatt.

A tudományos tevékenység eredményei

Vizsgáltuk a hallgatók hazai OTDK- és nemzetközi konferenciákon, folyóiratokban való publikálási eredményességét. Az 1.5. ábra szemlélteti a módszer tudományos tevékenységek területén elért eredményeit. Látható, hogy az új módszerben tanított diákok egyre gyakrabban és sikeresebben vesznek részt ezekben a tevékenységekben. A benyújtott dolgozatok számának növekedése mellett a díjazott hallgatók száma is jelentősen megnőtt.



1.5. ábra. Az oktatási folyamat hatása a tudományos tevékenységre

Forrás: a szerző szerkesztése

A kísérleti oktatások tapasztalatai megerősítik, hogy a mérnökképzést célszerű olyan mérnökstanári tevékenységnek tekinteni, ahol a képzési laborok vagy az oktatók felkészültsége heterogén, mivel az ismétlések és átfedések következtében, valamint a hallgatók megnövelt aktivitása miatt az oktatás színvonala a hagyományos módszerekhez képest emelkedik. Ez azt jelzi, hogy a módszer elősegíti a magas színvonalú tudományos munkák létrejöttét, egyben a kreatív hadmérnökök képzését.

Kimutatható, hogy más pedagógusok, érzékelve az eredményeket, elfogadják az ilyen kihívásokat, és szintén fejlesztik oktatási módszerüket. A módszer széles körben alkalmazható *Oktatók képzése program* formájában a hasonló szakmai háttérrel nem rendelkező oktatók számára. A kidolgozott módszer eredményei részletesen megismerhetők a vonatkozó publikációkban, és hatékonysága összevethető más *state-of-the-art* módszerekével.

A hadmérnökképzéshez kapcsolódó képességfejlesztő feladatok

Általános elvek és követelmények

A célok elérésére általánosan alkalmazható elvek és követelmények a hallgatói motiváltság erősítésére három alapelvet fogalmaznak meg. Elsőként csak valós elvárásokat szabad megfogalmazni, például: „Az élet igazságtalan”, „Környezetünk

tisztességtelen velünk szemben”, „Egy háborúra úgy is fel lehet készülni, hogy nagy valószínűséggel túléljük” – felmerül a kérdés, mi a célunk.

Másodsorban a történelmi elődök, a nagy múltú intézmények (például a Magyar Királyi Haditechnikai Intézet) visszaállítása legalább névleg, a magyar Nobel-díjasok és katonai vezetők, mérnökök példaképként történő bemutatása szükséges. Harmadsorban az újfajta nemzeti megközelítéseken és élenjáró hazai műszaki megoldásokon nyugvó motivációerősítés megvalósítása indokolt.

A közös hadmérnökparancsnok képzés elvárásai

A közös hadmérnökparancsnok képzés „puha készségei”

A modern hadmérnökképzés nem korlátozódhat pusztán a műszaki ismeretek átadására, hanem komplexen kell kezelnie a vezetői-irányítói és a kommunikációs kompetenciák fejlesztését is. A tűz-, baleset-, egészség- és katasztrófavédelem területén a szabványok fontosságának megértése, a mérnöki tervezési elvárások elsajátítása és a logisztikai szemléletmód kialakítása alapvető követelmény. Az érvelés- és tárgyalástechnika területén különös hangsúlyt kap az érzelmileg átítatott műszaki jelentések logikus elemzése és a tények objektív értékelése. A katonai alapelvek mindennapi körülmények közötti alkalmazása praktikus jelentőséggel bír, amelyre példaként szolgálhat „az utcai verekedés hét alapszabálya” típusú gyakorlati útmutatások elsajátítása. A projektszemlélet erősségei és hátrányai mellett annak hatékony megvalósítási kihívásait is meg kell ismerniük a hallgatóknak. A CsM jelentősége mellett annak hatékony megvalósítási nehézségeit is fel kell tárni. Külön figyelmet érdemel a lázadás provokálásának és kezelésének metodikája, amely kritikus helyzetek során nélkülözhetetlen vezetői kompetencia.

Szintspecifikus képzési követelmények

BSc-szintű elvárások

A BSc-szintű hadmérnökképzésben minden mérnöknek tudnia kell 30 ismert kérdés közül egyet sikeresen megválaszolni. Amennyiben a válasz nem helyes vagy pontatlan, a vizsga azonnal elégtelen eredménnyel zárul. Az ilyen alapvető témakörök közé tartozik a Gauss-féle eloszlás- és sűrűségfüggvény, a központi

határeloszlás tételének jelentősége és alkalmazási formái, a kovariancia és a normalizált kovariancia fogalma, valamint a Fourier-sorok és az FFT alkalmazása. A kiberfizikai (IoT-) rendszerek fejlődésének és hadtudományi jelentőségének megértése alapvető elvárás. A természetes és mesterséges információfelvétel, az érzékszervek működése, az érzékelés és az észlelés folyamatai, valamint a döntéshozatal különböző módjai mind-mind a modern hadmérnök alapkompenciáihoz tartoznak. Az elektromágneses spektrum használata során az érzékelők hullámhosszfüggésének sajátosságait, az aktív és passzív érzékelők, valamint a radarok működését és jelentőségét kell elsajátítani. A Laplace- és a Z-transzformáció, az RF-szűrőtípusok jellemzői, az adaptív szűrők, valamint a DRFM (digitális rádiófrekvenciás memória) katonai alkalmazásai szintén a kötelező tananyag részét képezik. A fejlett vezetéstámogató rendszerek (ADAS) érzékelő, értékelő és vezérlőrendszereinek megismerése, a kvázi monostatikus érzékelők és antennák elektromágneses spektrumbeli működése, az interferometria, a mikro_hullámú holográfia és a polarimetria alapjai ugyancsak elengedhetetlenek. A kvantum-érzékelők, -kiegészítők, -számítógépek és -kommunikációsrendszerek katonai alkalmazási területeinek áttekintése zárja a BSc-szintű követelményeket.

MSc-szintű elvárások

Az MSc-szintű képzés zárt előadások formájában történik, a hadmérnökképzés előzetes elvárásaihoz igazítva. A nemzeti érdekérvényesítés nemzetközi szinten történő megvalósítása központi témakör, amely magában foglalja mind a nemzeti képviselői, mind a polgári alkalmazotti szerepkört, azok előnyeivel, hátrányaival, lehetőségeivel és kihívásaival együtt. A katonai kutatás-fejlesztés területén a NATO STO/RTO (NATO Science and Technology Organization/NATO Research and Technology Agency) működésének megismerése, a globalizációs hatások érvényesülésének elemzése, valamint a profitorientált és hatékonyságorientált katonai képességek sajátosságainak feltárása alapvető fontosságú. A *train the trainer* elv előnyeinek és hátrányainak mérlegelése szintén a tananyag része. A kiberbiztonság és az elektronikai harc kapcsolatrendszerének megértése, a katonai erő mérnöki értelmezése és összetevőinek mechatronikai szemléletű elemzése további kulcsfontosságú témakörök. A 3D-nyomtatás katonai alkalmazásai műanyagok, fémek és ferromágneses anyagok esetében, a mesterséges intelligencia használata és az az általa támogatott feladatok megtévesztési lehetőségei, valamint a drónokkal megvalósuló kis magasságú légvédelmi és légierő-tevékenység mind-mind az

MSc-szint követelményei közé tartozik. Az ezer méter alatt tevékenykedő légi célok felderítése, útvonalba fogása és azonosítása nagy tömegben telepített olcsó érzékelő rendszerekkel, valamint a hiperszonikus eszközök felderítési, útvonalba fogási és azonosítási elvárásainak és lehetőségeinek megismerése szintén elengedhetetlen. A tömeges drón- és ballisztikusrakéta-támadás kivédési lehetőségei, az önrávezető minirakétákat hordozó platformok (drónok, repülő, nagy hatótávolságú rakéták és magaslégköri platformok) működésének elemzése zárja az MSc-szintű követelményeket.

PhD-szintű elvárások

A hadmérnöki PhD-szint magas szinten zárt előadások keretében valósul meg. A katonai kutatási-fejlesztési tevékenységekhez kapcsolódó megtévesztési módszerek és eljárások részletes elemzése adja a képzés alapját. A *CubeSat* méretű kvázi monostatikus többfrekvenciás érzékelő WAN-alapú rendszerek drón- és alacsony műholdpálya-alkalmazásokban történő felhasználásának vizsgálata speciális szaktudást igényel. A hadtudományi megtévesztés matematikát alkalmazó elveinek és módszereinek elsajátítása a legmagasabb szintű szakmai kompetenciát képviseli.

Következtetések és jövőbeli kilátások

A digitális átalakulás hatásai

A digitális világ folyamatos technológiai változásai jelentős hatással vannak a mérnökök új generációinak tudására és hozzáállására, valamint a mérnökvilágon belüli kapcsolatokra. A korszerű mesterséges intelligenciával támogatott eszközök, berendezések, érzékelők és adatkiértékelési módszerek széles körű elterjedése, különösen a drónokkal és robotokkal kapcsolatos alkalmazások terén, paradigma-váltást hoz a hadmérnökképzésben.

Ez a változás kettős hatású folyamat. Egyrészt a hallgatók találkoznak az ipar és a haderő által használt új digitális technológiákkal, gyakorlati tapasztalatot szereznek azok alkalmazásáról. Másrészt azonban a fiatalok tapasztalatai a virtuális világ felé tolnak el, miközben a mérnöki munka valós fizikai tapasztalatokat, valós eszközök és fogalmak ismeretét, valamint az összefüggések és jelenségek alapos megértését igényli.

Fontos felismerés, hogy ma már nem a kifinomult, főként írásbeli kommunikáció dominanciája akadályozza a szükséges kommunikációs készségek fejlődését, hanem az elképzelések beszűkülése jelenti a legnagyobb kihívást. Ezek a problémák halmozottabban jelentkeznek a haditechnika kutatási-fejlesztési és élettartam-fenntartási területein.

Történelmi hagyományok és példaképek

A magyar hadtörténelem kiemelkedő személyiségei útmutatóul szolgálnak a kortárs hadmérnökképzés számára. Hunyadi János és Szilágyi Erzsébet, Dobó István és Bornemissza Gergely, Zrínyi Miklós és Zrínyi Ilona, Esze Tamás és Vak Bottyán, Klapka György és Gábor Áron, Stromfeld Aurél, Bay Zoltán és Jákó József, Kármán Tódor és Teller Ede, valamint Krausz Ferenc katonai téren felmutatott teljesítményei kijelölik az utat a kor elvárásaihoz illeszkedő hadsereg tisztikarának szellemi elvárásaihoz.

A hibrid hadmérnökképzés előnyei és kihívásai

A kihívásalapú hibrid hadmérnökképzés költséghatékony megoldást kínál a modern elvárások teljesítésére. Előnye, hogy erősíti a tisztai állomány társadalmi elfogadottságának szintjét, integrálja az Ipar 4.0/5.0 által nyújtott műszaki környezetet, valamint az élenjáró, már alkalmazott és folyamatosan bővülő egyetemi karok által kínált képességeket a speciális katonai elvárásokkal.

További előnye az elképzelésnek, hogy a lehetőségek kihasználásával a nagy értékű katonai berendezésekhez rövid határidővel kiegészítő eszközöket lehet kifejleszteni és integrálni. Idetartoznak a több hullámsávban, párhuzamosan üzemelő kvázi monostatikus érzékelők, a mesterséges intelligenciával támogatott aktuátorok, drónok, a kvázi monostatikus érzékelőkkel rendelkező gépágyúk és minirakéták.

Ezekkel a megoldásokkal egyrészt jelentősen emelhető ezen eszközök védelmi szintje, másrészt növelhető támadási potenciáljuk. A módszer alapja, egyben hátránya azonban, hogy az oktatók leterheltsége növekszik, és a minőségi hadmérnökképzés színvonalának fenntartása csak a hazai egyetemekkel való jól felmért és általuk támogatott együttműködés formájában valósítható meg.

A társadalmi elismerés szükségessége

Természetes követelmény, hogy a hadmérnökök rendkívül nagy hozzáadott értéket képviselő munkáját és tevékenységét csak kiemelt erkölcsi és anyagi elismeréssel lehet eredményesen végrehajtani. Ez nemcsak a szakmai motiváció fenntartása szempontjából fontos, hanem a társadalmi presztízs és a pályaválasztási vonzerő biztosítása érdekében is elengedhetetlen.

REFLECTIONS ON THE NEED AND EXPECTATIONS OF EDUCATION 5.0-BASED MILITARY ENGINEERING EDUCATION: HOW TO TRAIN ISTVÁN DOBÓ AND GERGELY BORNEMISSZA IN AN INDUSTRY 5.0 ENVIRONMENT?

The era of Industry 4.0 (I4.0) and 5.0 (I5.0) requires efficient human-machine interaction supported by artificial intelligence (AI), mass production enabled by robots, and the exploitation of opportunities offered by dual-use tools and systems such as drones and sensors in military engineering research, development, and innovation. The introduction of new skills requires rigorous preparatory work and the development of effective knowledge-transfer methods that adapt to the constantly changing needs of military engineering education, recognizing and exploiting the opportunities of Education 4.0 (E4.0) and 5.0 (E5.0) personalized requirements. This study aims to review the elements and possibilities of competence and personality development in military engineering university-level education, including elite training, pedagogical expectations, and the need for extensions and integration into education at Ludovika University. By introducing the methods presented in this study, it is possible to train military engineers who can effectively address the challenges of developing innovative technical solutions and evaluating AI-supported Internet of Things (IoT) sensor networks in war theaters aligned with I4.0 and I5.0 opportunities, exploiting ad-hoc creative on-site development opportunities of military equipment.

Keywords: military engineering education, Industry 4.0/I5.0, Education 4.0/E4.0, AI-supported solutions, sensor networks, drones, robots

Felhasznált irodalom

- BAIDAL-BUSTAMANTE, Eduardo Fernando – MORA, Carlos Eduardo – ALVAREZ-ALVARADO, Manuel Sebastian (2023): STEAM Project-Based Learning Approach to Enhance Teaching-Learning Process in the Topic of Pascal's Principle. *IEEE Transactions on Education*, 66(6), 632–641. Online: <https://doi.org/10.1109/TE.2023.3285847>

- BURJÁN-MOSONI, Bernadett – BALAJTI, István – KOCSIS, Imre (2025): Expanding Soft Skills Development Across Undergraduate Engineering Education. *Transactions of the SDPS: Journal of Integrated Design and Process Science*, under review.
- CHEW, Sie Wai et al. (2020): Enhancing Critical Thinking Skills of Elementary School Students through Collaborative Learning. In *2020 IEEE 20th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*. Tartu: IEEE, 249–253. Online: <https://doi.org/10.1109/ICALT49669.2020.00082>
- HAIG, Zsolt – ILLÉSI, Zsolt – VARGA, Péter János (2022): Possibilities of Electronic Jamming of WLAN Networks in the Physical Layer. *Hadmérnök*, 17(3), 133–152. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2022.3.9>
- HORVÁTH, Imre (2025): We Pretend to Have Some Solutions ... But Do We Understand the Problems as a Whole? *Journal of Integrated Design and Process Science*, Article 10920617251346927. Online: <https://doi.org/10.1177/10920617251346927>
- HORVÁTH, Imre – ÁBRAHÁM, György (2025): Transdisciplinary Shifts in System Paradigm-Driven Disciplines: Mechatronics as an Example. *Transdisciplinary Journal of Engineering and Science*, 16, 177–207. Online: <https://doi.org/10.22545/2025/00276>
- KIS, Kornél Ágoston et al. (2023): Quarter Car Suspension State Space Model and Full State Feedback Control for Real-Time Processing. In *2023 Signal Processing Symposium (SPSymposium)*. Karpacz: IEEE, 73–78. Online: <https://doi.org/10.23919/SPSymposium57300.2023.10150601>
- KOCSIS, Imre – BURJÁN-MOSONI, Boglárka – BALAJTI, István (2025): A Comprehensive Review of Key Cyber-Physical Systems, and Assessment of Their Education Challenges. *IEEE Access*, 13, 8898–8911. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3527714>
- KOCSIS, Imre – KORONDI, Péter (2024): On the Reorganization of Mathematics Education Motivated by New Challenges in Engineering. In *2024 IEEE 11th International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE)*. Chicago: IEEE, 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/ICELIE62250.2024.10814890>
- KOVÁCS László (2023): *Hadviselés a 21. században: Kiberműveletek*. Budapest: Ludovika. Online: <http://hdl.handle.net/20.500.12944/21611>
- KOVÁCS László – KRASZNAY Csaba (2024): Digitális Mohács 3.0. *Hadtudomány*, 34(3), 40–55. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2024.34.3.40>
- LIPPAI Péter (2025): *A nemzeti haderő építése, a tisztképzés jelene és jövője*. Előadás. Budapest, Stefánia Palota, 2025. március 13. Online: https://mhht.eu/bazisadatok/SZAKOSZTALY/KISS_KAROLY_KLUB/A_nemzeti_hadero_epitese_.pdf
- MAJOR Gábor – SZILVÁSSY László – BÉKÉSI Bertold (2024): Drón-ökoszisztéma a repülőtereken a 21. században. In DÖMÖTÖR Csaba (szerk.): *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2024: Konferencia előadások kivonatai*. Debrecen: MTA TABT Debreceni Területi Bizottság Titkársága.
- ORTHEY, Frank Michael (1999): *Schlüsselqualifikationen an Deutschen Hochschulen: Konzepte, Standpunkte und Perspektiven*. Neuwied–Kriftel–Berlin: Luchterhand, 1–121.
- SRAVANTHI, Chaganti – DHARMAVARAPU, Pratibha – NEERAJA, Atluri (2024): Building Bridges: Teaching Programming through Problem-Based Learning in Mechanical Engineering. *Journal of Engineering Education Transformations*, 38(Special Issue), 222–228. Online: <https://doi.org/10.16920/jeet/2024/v38i0/167234>
- VEST, Charles Martin (2006): Educating Engineers for 2020 and Beyond. *The Bridge: Journal of the National Academy of Engineering*, 36(2), 38–44. Online: <https://www.nae.edu/7633/EducatingEngineersfor2020andBeyond>

A kiberbiztonsági és digitalizációs metrikák felhasználási lehetőségeinek vizsgálata a kiberképességek meghatározásához

A tanulmány azt vizsgálja, hogy mennyire jelezhetik előre az egyes kiberbiztonsági és digitalizációs metrikák, hogy egy fegyveres konfliktusban melyik oldalon lesz a fölény a kiberműveletek terén. Az orosz–ukrán háború vonatkozásában a jelenleg használt metrikák nem minden esetben adnak megbízható előrejelzést azzal kapcsolatban, hogy a célpont mennyire képes sikeresen ellenállni a kibertámadásoknak. Például a Nemzetközi Távközlési Egyesület (International Telecommunication Union) kiberbiztonsági indexének 2021-es kiadása alapján Oroszország az 5., míg Ukrajna a 78. helyen állt. A 2024-es kiadás már nem tartalmaz rangsort, de Ukrajna a T3-as csoportba került, míg az Oroszországi Föderáció a T2-be. A nyilvánosan elérhető forrásokból tájékozódva nem mutatkozik ekkora különbség a két fél felkészültsége között a gyakorlatban. A kutatás során a 2020-tól napjainkig elérhető kiberképességekre vonatkozó metrikák vizsgálatával összevetem a támadási és védekezési képességekről elérhető információkat, és ez alapján értékelem a metrikák megbízhatóságát.

Kulcsszavak: kiberbiztonság, digitalizáció, kiberképesség, metrika, kiberműveletek

Bevezetés

A modern hadviselésben egyre inkább teret nyernek a kibertérben zajló műveletek, akár önállóan, akár a hagyományos, kinetikus műveletekkel összehangolva. A fokozódó digitalizáció révén akár egy egész ország közigazgatását is meg lehet bénítani, ahogy a 2007-es Észtország elleni támadás során megfigyelhető volt (HAIG–KOVÁCS 2008). Ugyanakkor, míg az egyes országok kinetikus műveleti képességeivel kapcsolatban rendelkezésre állnak olyan mérőszámok, mint például a *Global Firepower Index* (globális tüzerő-index) vagy a *Military Balance+* adatbázis adatai, addig a kiberképességekre vonatkozóan nincsenek ilyen jól kidolgozott metrikák (2025 *Military Strength Ranking* 2025; *Military Balance+* [é. n.]).

Megtudható, mekkora adott ország hadserege, illetve mennyi és milyen haditechnikával rendelkezik, de a kiberképességek felmérése bonyolultabb feladat. Ez egyrészt abból adódik, hogy kevésbé kézzelfoghatók a kibertérben támadásra és védekezésre használt eszközök – hiszen nagy részük szoftver vagy kihasználható

sebezhetőség –, másrészt sokkal szorosabban összefonódnak a katonai és civil képességek. Elég a kritikus információs infrastruktúrák üzemeltetésére gondolni, amely jellemzően nem a hadsereg kezében van, és máris belátható, hogy egyedül a haderő vizsgálatával nehéz meghatározni a védelmi képességeket.

Az egyes országok kiberbiztonsági és digitalizációs fejlettségével kapcsolatos mutatók széles körben használatosak – de mennyire megbízhatók egy fegyveres konfliktus idején? A vizsgálat célja meghatározni, hogy mennyire jelezhetik előre ezek az egyébként más céllal születő mérőszámok, hogy egy fegyveres konfliktusban melyik oldalon lesz a fölény a kiberműveletek terén. A kutatás az orosz–ukrán háború kibertérben zajló eseményeivel kapcsolatos nyílt forrásból elérhető információkat használta fel annak érdekében, hogy összevethető legyen a kiberbiztonsági és digitalizációs metrikák által mutatott kép a tapasztalt kiber védelmi képességekkel.

A támadóképességeket nagyon nehéz objektíven megítélni, hiszen gyakran még a nyilvánosságra hozott, jól dokumentált támadások esetében is csak feltételezésekre hagyatkozhatunk a támadó személyét illetően (attribúció). Ezért elsősorban a védekezési (kibervédelmi) képességek és a kiberbiztonsági metrikák kapcsolatát vizsgálja a tanulmány. A hipotézis szerint a jelenlegi mutatók nem jelzik megbízhatóan a fegyveres konfliktusokban a kibertámadásokkal szembeni ellenálló képességet. Másképp fogalmazva az egyes országok békeidőben felmért kiberbiztonsági tulajdonságai nem adnak megbízható előrejelzést azzal kapcsolatban, hogy mennyire képesek megbirkózni a kibertámadásokkal egy fegyveres konfliktus során.

Az elérhető metrikák vizsgálata

Számos különböző szempontú, digitalizációra és kiberbiztonságra vonatkozó mérőszám érhető el a világ különböző régióira vonatkozóan, amelyek közül 65 metrikát vizsgál Khudyntsev társaival (KHUDYNTSEV et al. 2021: 117–126). Az országok digitalizációs szintje nem teljesen független kiberbiztonsági fejlettségüktől, azonban nem jelenthető ki egyértelműen, hogy a magas fokú digitalizáció minden esetben fejlett kiberbiztonsággal jár együtt (KRAVETS 2019). A kibervédelmi képességek szempontjából a kiberbiztonsági ellenálló képesség nagyobb relevanciával bír, mint a digitalizáció – amely inkább az adott ország digitális támadási felületének nagysága szempontjából releváns –, ezért elsődlegesen a kiberbiztonsággal kapcsolatos mérőszámokra kerül a fókusz, és a digitalizációval kapcsolatos indikátorokat csak kiegészítő információként használok fel.

Ahhoz, hogy egy pillanatképnél átfogóbb következtetéseket lehessen levonni a metrikákból, olyan mérőszámokat kell választani, amelyekre a következő feltételek teljesülnek:

- megbízhatók, azaz objektív szempontok alapján, jól dokumentált és megismerhető módszertannal készülnek;
- konzisztensek, azaz a módszertan megismételhető és lehetővé teszi az adott országra vonatkozó korábbi adatokkal, illetve más országokkal történő összevetést;
- rendszeresen frissülnek, tehát azonosíthatók belőlük az esetleges változások, fejlődési tendenciák.

Ezek a feltételek jelentősen leszűkítik azon metrikák körét, amelyek szóba jöhetnek a kiberképességek vizsgálata során. A továbbiakban Kravets tanulmánya nyomán három kiberbiztonsággal kapcsolatos metrikát vizsgálunk közelebbről: a globális kiberbiztonsági indexet (*Global Cybersecurity Index*, GCI), a nemzeti kiberbiztonsági indexet (*National Cyber Security Index*, NCSI) és a kiberbiztonsági indexet (*Index of Cyber Security*, ICS) (*Global Cybersecurity Index* [é. n.]; *National Cyber Security Index* [é. n.]; *Index of Cybersecurity TAG Infosphere*). A 2.1. táblázat tartalmazza ezek összehasonlító elemzését.

A 2.1. táblázatban szereplő mutatószámok közül a harmadik, a kiberbiztonsági index nem alkalmas országok összehasonlítására, inkább a mindenkori szubjektív fenyegetettségi szintet jelzi. Az első két metrika közül csak az NCSI tartalmaz védelmi dimenziót, viszont az Oroszországi Föderáció értékelésére nem terjed ki, így nem alkalmas az orosz–ukrán háborúval kapcsolatos összevetés elvégzésére. A Nemzetközi Távközlési Egyesület (*International Telecommunications Union*, ITU), az ENSZ szakosított ügynöksége által készített *globális kiberbiztonsági index* viszont több szempontból is alkalmasnak látszik a további vizsgálatra.

2.1. táblázat. *A kiberbiztonsági mutatók összehasonlító elemzése*

A metrika neve	Globális kiberbiztonsági index (Global Cyber-security Index, GCI)	Nemzeti kiberbiztonsági index (National Cyber Security Index, NCSI)	Kiberbiztonsági index (Index of Cyber Security, ICS)
Mit mér?	A központi kormányok kiberbiztonsági kötelezettség-vállalásainak végrehajtása	Az országok felkészültsége a kiberfenyegetések megelőzésére és a kiberincidensek kezelésére	A vállalati, ipari és kormányzati információs infrastruktúrát érintő, a kiberbiztonsági fenyegetések széles spektrumából eredő kockázat
Alkalmazás	Nemzetközi kiberbiztonsági rendszer és nemzeti politikák kialakítása a kiberbiztonság területén	Információk nyújtása a naprakész nemzeti kiberbiztonsági rendszerekről, a nemzeti kiberbiztonsági rendszerek és politikák fejlesztéséről	Kiberfenyegetések kockázatkezelése adott szervezet számára
Célok	Segít az országoknak a fejlesztendő területek azonosításában; motiválja a cselekvést a relatív GCI-rangsor javítására; a kiberbiztonság szintjének emelése világsszerte; segít a legjobb gyakorlatok azonosításában és népszerűsítésében; a kiberbiztonság globális kultúrájának előmozdítása	A korszerű nemzeti kiberbiztonsági rendszerek fejlettségi szintjének tudatosítása; a kiberbiztonsági rendszerek saját fejlettségi szintjének összehasonlítása más országok rangsorával; a legjobb gyakorlatokra vonatkozó információk megosztása	A kockázati szint értékelése iparági szakemberek által; a kiberbiztonsággal kapcsolatos általános vélekedések megosztása több célközönséggel; a saját tapasztalatok és a kiberbiztonsági értékelés összevetése az általános értékeléssel; a szervezet kiberbiztonsági szintjének havi szintű javítása
Frissítés	2015, 2017, 2019, 2021, 2024	2016 óta, naprakész	Havonta
Módszerek	Szakértői értékelés, többkritériumos elemzés (MCA), a tényezők súlyozása	Szakértői értékelés, lineáris függvény	Szentimentelemzés, szakértői értékelés, a tényezők súlyozása, időszorelemzés
Fő kategóriák	Jogi intézkedések; technikai intézkedések; szervezeti intézkedések; kapacitás-építés; együttműködés	Általános kiberbiztonsági mutatók (kiberbiztonsági politika kidolgozása, a kiberfenyegetések elemzése és információcsere, oktatás és szakmai fejlődés, hozzájárulás a globális kiberbiztonsághoz); kiberbiztonsági alapmutatók (a digitális szolgáltatások védelme, az alapvető szolgáltatások védelme, e-azonosítás és bizalmi szolgáltatások, a személyes adatok védelme); incidens- és válságkezelési mutatók (a kiberincidensekre való reagálás, kiberválság-kezelés, a kiberbűnözés elleni küzdelem, katonai kiberműveletek)	Támadó aktorok; kiberfegyverek; a támadók által kívánt hatás; támadási célpontok; a rendelkezésre álló védelmi eszközök sebezhetősége; általános értékelés
Az indikátorok száma	GCIv1: 17 mutató, 17 kérdés; GCIv2: 25 mutató, 157 kérdés; GCIv3: 25 mutató, 50 kérdés; GCIv4: 20 mutató, 82 kérdés; GCIv5: 20 mutató, 82 + 1 kérdés	46 mutató	25 mutató

A metrika neve	Globális kiberbiztonsági index (Global Cyber-security Index, GCI)	Nemzeti kiberbiztonsági index (National Cyber Security Index, NCSI)	Kiberbiztonsági index (Index of Cyber Security, ICS)
Válaszadók	Az értékelt ország állami intézményeinek és kereskedelmi vállalatainak szakértői, állami szervezetei; nemzetközi szervezetek szakértői	Az értékelt ország tisztviselői, állami szervezetek, akadémikusok, az NCSI-csapat tagjai	A fejlesztők által kiválasztott iparági szakemberek (a lista nem nyilvános)
Az országok száma	194	126	–
Ellenőrzés	A partnerszervezetek szakértői végzik	Legalább két NCSI-csapat tag végzi	Nem történik
Fejlesztők	Az ITU, nemzetközi partnerekkel	Az e-Kormányzati Akadémia (Tallinn) észt partnerekkel	Dan Geer és Mukul Pareek; TAG Infosphere-szakértők

Forrás: KRAVETS 2019 nyomán, a szerző kiegészítéseivel

Az ITU globális kiberbiztonsági indexe

Az ITU *kiberbiztonsági indexe* (GCI) jelentős fejlődésen ment keresztül az elmúlt tíz év során. A munka 2013-ban kezdődött a módszertan kidolgozásával és az első adatgyűjtéssel, a felmérés eredményeit pedig 2015-ben tették közzé. Kezdetben jóval kevesebb kérdésből állt a felmérés, azonban maguk az értékelés alapját adó pillérek az első jelentés elkészítése óta változatlanok. A GCI pillérei és ezek indikátorai a következők:

- jogi intézkedések (kiberbűnözés, kiberbiztonság);
- technikai intézkedések (CSIRT/CERT, nemzeti keretrendszer);
- szervezeti intézkedések (stratégia, felelős intézmény, mérések/auditok, online gyermekvédelem);
- kapacitásfejlesztési intézkedések (biztonságtudatosság, oktatás, képzés);
- együttműködési intézkedések (nemzetközi együttműködések, jogsegély, köz- és magánszféra közötti partnerség, ügynökségek közötti partnerség).

A módszertannak állandó eleme az is, hogy az ITU által a nemzeti válaszokat koordináló hatóságoknak kiküldött kérdőíveket az ITU validálja, azaz megvizsgálja a válaszok megalapozottságát. Maga a validáció elsősorban dokumentációalapú, tehát a nemzeti válaszokban hivatkozott stratégiákat, jogszabályokat és egyéb iratokat ellenőrzi. Az indikátorok kiválasztásánál a kezdetektől szempont volt az adatok rendelkezésre állása és minősége, valamint a másodlagos adatokon

keresztül történő keresztellenőrzés lehetősége (Global Cybersecurity Index 2017). Ez a megközelítés viszonylag objektív eredményt ad, ugyanakkor a tényleges gyakorlati értékelés helyett inkább a *compliance* (jogszabályi megfelelés) irányába viszi el az értékelést.

2.2. táblázat. A GCI időbeli alakulása

Kiadvány	GCIv1	GCIv2	GCIv3	GCIv4	GCIv5
A kiadás éve	2015	2017	2019	2021	2024
Az adatgyűjtés éve(i)	2013–2014	2016	2017–2018	2020	2023–2024
Fókuszpontot adó országok	105	136	155	169	172
A kérdések típusa	Nyílt	Zárt, 2 választási lehetőség	Zárt, 2 választási lehetőség	Zárt, 3 választási lehetőség	Zárt, 3 választási lehetőség
Pontszámítási módszer	Benchmark-pontszámok	Rangsoralapú súlyozott pontszámok	Rangsoralapú súlyozott pontszámok	Összesített súlyozott átlagpontszám	Összesített súlyozott átlagpontszám
Az indikátorok száma	17	25	25	20	20
A kérdések száma	17	153 + 4 opcionális kérdés az online gyermek-védelemről	50	82	82 + 1 opcionális kérdés a mikro-, kis- és közép-vállalkozások képzéséről

Forrás: a szerző szerkesztése a GCIv5 nyomán
(Global Cybersecurity Index 2024)

Az évek során a GCI módszertana nagyon nagy fejlődésen ment keresztül, amelynek összefoglalását a 2.2. táblázat tartalmazza. A globális kiberbiztonsági index kezdetben egyszerű átlagolással készült, majd a 2017-es kiadásban az ITU áttért a súlyozott értékelésre, ahol a súlyozás szorzóit szakértőkből álló munkacsoport állapítja meg (Global Cybersecurity Index 2017). A 2021-ben kiadott, 2020-ra vonatkozó adatok értékelését tartalmazó kiadás és a 2024-es kiadás 0–20 pont között értékeli az egyes kategóriákat összesen 100 pontig, míg a korábbi jelentések 0–1 közötti skálán pontoztak, és nem is tartalmazták az összes ország részletes pontszámát.

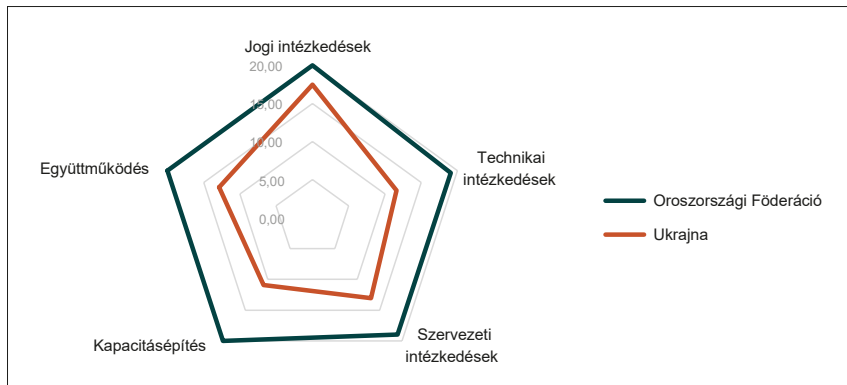
Az első négy kiadásban a GCI rangsort állított fel az országok között (hasonlóan ahhoz, ahogy a *Global Firepower Index* rangsorolja az országok haderejét), azonban a 2024-es kiadásban változtattak ezen a megközelítésen, és ötfokozatú skála szerinti pillércsoportokba sorolják az országokat anélkül, hogy összesített

pontszámukat megadnák (*Global Cybersecurity Index 2024* 2024). Ennek ellenére az összetértek könnyen kiszámíthatók, ha valaki mégis szeretne rangsort felállítani. A módszertani változások miatt részletesen csak a 2021-es és a 2024-es GCI-adatok vehetők össze, viszont azok megfelelnek a korábban leírt követelményeknek (megbízhatóság, konzisztencia, rendszeres frissítés).

A GCI készítői időről időre megvizsgálják a GCI-pontszámok és az egyéb digitalizációs indexek lehetséges összefüggéseit. 2017-ben így fogalmaztak: „A GCI-pontszámok és a jelentős IKT-fejlesztési indexek összehasonlítása nem mutat különösebben szoros összefüggést, mivel a tapasztalatok azt mutatják, hogy az IKT-fejlesztés terén magas pontszámot elérő országok nem feltétlenül fektetnek be ugyanolyan mértékben a kiberbiztonságba, és fordítva.” (*Global Cybersecurity Index* 2017) 2018-ban az Egyesült Nemzetek Szövetsége (ENSZ) által kiadott e-kormányzati fejlesztési index (*E-Government Development Index*) kapcsán a következőket állapították meg: „A GCI és az e-kormányzati fejlesztési index összehasonlítása nem mutat különösebb összefüggéseket, és a tapasztalatok azt mutatják, hogy az e-kormányzati fejlesztés terén jól teljesítő országok nem feltétlenül fektetnek ugyanolyan mértékben a kiberbiztonságba, és fordítva.” (*Global Cybersecurity Index* 2018) 2024-ben is hasonló következtetést vontak le: „A GCI-pontszámok és az általános információs és kommunikációs technológiák (IKT) fejlődésének összehasonlításakor figyelembe kell venni, hogy a pontszámok nem feltétlenül követik az ITU IKT-fejlesztési indexét (IDI), amely az univerzális és jelentős összekapcsoltságot méri.” (*Global Cybersecurity Index 2024* 2024) Összességében tehát az ITU is arra a következtetésre jut, hogy a kiberbiztonsági és a digitalizációs metrikák között nem minden esetben van korreláció.

Az Oroszországi Föderáció és Ukrajna GCI-értékei és az orosz–ukrán háború

Ahhoz, hogy megvizsgálható legyen, mennyire használható a GCI-metrika az orosz–ukrán háború kibertérben zajló kimenetelének előrejelzéséhez, meg kell vizsgálni, hogy milyen értékeket mutatott a GCI az Oroszországi Föderációval és Ukrajnával kapcsolatban, ehhez képest pedig mi történt a valóságban. Az orosz–ukrán háború 2014-ben kezdődött a Krím félsziget orosz megszállásával, azonban a konfliktus jelentősen eszkalálódott a 2022. február 24-én indított orosz invázióval. Ezzel egyidőben a kibertérben is intenzívebbé váltak az Ukrajna elleni támadások, majd a válaszlépések sem vártak magukra sokáig.



2.1. ábra. Az Oroszországi Föderáció és Ukrajna GCI-értékei 2020-ban

Forrás: a szerző szerkesztése a 2020-as GCI-kiadás alapján (*Global Cybersecurity Index 2021*)

A 2022-es invázió idején a 2021-ben kiadott, 2020-as adatok alapján készült GCI-jelentés volt a legfrissebb elérhető metrika. Eszerint az Oroszországi Föderáció globális szinten (az értékelt 194 ország között) az 5. helyen állt 98,06 ponttal, míg Ukrajna a 78. helyen 65,93 ponttal, ami elég jelentős különbség. Hogy jobban kontextusba helyezhetők legyenek ezek az értékek, érdemes azt is megemlíteni, hogy ekkor Magyarország a 22. helyen állt 91,28 ponttal (*Global Cybersecurity Index 2021*). A számokat látva joggal feltételezhető, hogy Ukrajna kiberbiztonsági szempontból jelentősen elmaradt az Oroszországi Föderáció mögött. Ebből arra a következtetésre lehetne jutni, hogy a két ország közötti háborúban Oroszország gyorsan képes megszerezni a kibertérben a fölényt, a valós események azonban nem igazolják ezt a feltevést.

A 2022. február 24. utáni első 100 nap kibertérben zajló eseményeit sokan értékelték, és általában arra a következtetésre jutottak, hogy Ukrajna a támadások mértékéhez képest jól ellenállt a kibertámadásoknak (SMITH 2022; Cyber Diia 2024). Az ukrán kritikus infrastruktúrák ugyan az orosz kiberműveletek célkeresztjébe kerültek, de a támadók nem arattak jelentős sikereket (KRÍSS 2024; MUELLER et al. 2023).

Felvetődhet, hogy Ukrajna védekezőképességéhez jelentősen hozzájárult a kibertérben a NATO-tól és szövetségeseitől kapott segítség, azonban a nemzetközi együttműködés olyan tényező, amelyet az ITU GCI is figyelembe vesz. Ukrajna a 2020-as adatok alapján 12,87 pontos értékelést kapott az Együttműködés

kategóriában a lehetséges 20 pontból, tehát vagy nem voltak túl kiterjedt nemzetközi együttműködései, vagy az ITU-kérdőív rosszul mérte fel azokat. Ezzel szemben az Oroszországi Föderáció a maximális 20 pontot érte el az Együttműködés kategóriában, ami a 2024-es GCI-jelentésben már 16,77 pontra romlott. Ukrajna ugyanakkor 2024-ben 16,58-ra javított. Ebből úgy tűnik, hogy a GCI kellően érzékeny módon értékeli az együttműködésekkel. Ukrajna védelmi képességeire pedig meggyőzőbb magyarázat, hogy a 2014 és 2016 között elszenvedett kibertámadások után a 2022-es események már nem érték teljesen felkészületlenül (LEWIS 2022).

Érdekes megvizsgálni a GCI többi kategóriáját is, hogyan változtak a 2024-es felmérésben. Ukrajna pontszáma határozottan javult (65,93 pontról 83,93-ra), míg az Oroszországi Föderáció értékelése kisebb mértékben romlott (98,06 pontról 92,13 pontra). A részleteket a 2.3. táblázat tartalmazza. A jogi intézkedések értékelése Oroszország esetében változatlan, a maximális 20 pont. Ukrajna javuló értékelése tükrözi, hogy számos kiberbiztonsághoz kapcsolódó területen megújította és az Európai Unió szabályozásához közelíti jogszabályait. A technikai intézkedések értékelése erősen kötődik az incidenskezelési képességekhez, amelyeket mindkét országnak volt alkalma fejleszteni az elmúlt évek során, ugyanakkor míg Ukrajna javított, Oroszország romló értékelése azt tükrözi, hogy nem minden esetben sikerül eredményesen védekeznie az Ukrajnával együttérző hackerek támadásai ellen. A szervezeti intézkedések terén mindkét ország javított, de ez a pillér a stratégiák mellett olyan elemeket is tartalmaz, mint például az online gyermekvédelem, ezért a kibervédelmi képességek szempontjából kevésbé releváns. A kapacitásépítés pontszámai is a várakozásoknak megfelelően alakultak, az ukránok javítottak, míg Oroszországot nagyon sok jól képzett informatikus hagyta el a háború és a nagy technológiai cégek kivonulása miatt (AFP).

2.3. táblázat. Az Oroszországi Föderáció és Ukrajna
GCI-értékeinek változása 2020 és 2024 között

Év	Ország	Jogi int.	Technikai int.	Szervezeti int.	Kapacitás-építés	Együttműködés	Össz-pontszám
2024	Oroszországi Föderáció	20,00	↓ 16,59	↑ 20,00	↓ 18,77	↓ 16,77	92,13
	Ukrajna	↑ 19,42	↑ 17,35	↑ 15,97	↑ 14,61	↑ 16,58	83,93
2021	Oroszországi Föderáció	20,00	19,08	18,98	20,00	20,00	98,06
	Ukrajna	17,46	11,60	13,06	10,94	12,87	65,93

Forrás: a szerző szerkesztése

Következtetések

Összességében elmondható, hogy bár számos kiberbiztonsági és digitalizációs metrika létezik, jelenleg kevés olyan mérőszám van, amely megbízható, konzisztens, rendszeresen frissül, és kellően sok országot lefed. A vizsgált metrikák közül a Nemzetközi Távközlési Egyesület globális kiberbiztonsági indexe felel meg legjobban a fenti elvárásoknak, és mind Ukrajna, mind az Oroszországi Föderáció értékelésére kiterjed. Az orosz–ukrán háború valós kibertérben zajló eseményeivel összevetve azonban megfigyelhető, hogy az ITU GCI nagyon jelentős különbséget jelzett az orosz és ukrán kiberképességek között, míg a valóságban nem mutatkozott ekkora eltérés.

Ennek az egyik oka, hogy a GCI által használt indikátorok egy része egyáltalán nem releváns kibervédelmi szempontból. Például az online gyermekvédelem vagy a kiberbűnözés elleni fellépés fontos ugyan, de háborús helyzetben nem járul hozzá a kibervédelmi képességekhez. Ugyanakkor vannak olyan indikátorok is az ITU felmérésében, amelyek békeidőben is fontosak, de a háborúban felértékelődnek, mint például az incidenskezelés vagy a nemzetközi együttműködések. A GCI-ből emellett hiányoznak a kibervédelemmel kapcsolatos indikátorok, amelyek például a tallinni e-Kormányzati Akadémia által készített nemzeti kiberbiztonsági indexben szerepelnek. Az indikátorok megléte mellett a GCI-módszertanban fontos a súlyozásuk is (amely nem nyilvános), így előfordulhat, hogy bizonyos tényezőket felül- vagy alulértékel az ITU indexe. Az értékelés során a módszertan előnyben részesíti a dokumentumokkal alátámasztott adatokat, ezért a gyakorlatiasabb területeket nehezebben tudja pontosan feltérképezni.

A fentiek miatt a hipotézis, miszerint a jelenlegi mutatók nem jelzik megbízhatóan a fegyveres konfliktusokban a kibertámadásokkal szembeni ellenálló képességet, igazoltnak tekinthető. A kiberbiztonsági metrikák terén megfigyelhető egyfajta fejlődés és a valós eseményeket figyelembe vevő korrekció, ezért előfordulhat, hogy a jövőben ezek a békeidőben használt metrikák háborús körülmények közötti előrejelzésekre is alkalmasak lesznek, azonban jelenleg még nem ez a helyzet.

A jelenlegi kutatás továbbfejleszthető és kiterjeszthető a más országokkal kapcsolatos kibertéri események vizsgálatára. A jelenlegi metrikák hiányosságai alapján konkrét fejlesztési javaslatok (felmérési kérdések, értékelési szempontok) fogalmazhatók meg a GCI-vel vagy más mérőszámokkal kapcsolatban, azonban ez túlmutat jelen tanulmány keretein.

EXPLORING THE POTENTIAL USES OF CYBERSECURITY AND DIGITALIZATION METRICS TO DETERMINE CYBER CAPABILITIES

This study examines the extent to which individual cybersecurity and digitalization metrics can predict which side will have supremacy in cyber operations during an armed conflict. Specifically, in the context of the Russian–Ukrainian war, the metrics currently used do not always provide a reliable prediction of how successfully a target can resist cyberattacks. For example, based on the 2021 edition of the International Telecommunication Union Cybersecurity Index, Russia ranked 5th and Ukraine 78th, while the 2024 edition no longer includes a ranking, but Ukraine has been placed in the T3 group and the Russian Federation in T2. Based on publicly available sources, there does not appear to be such a large difference between the two sides' preparedness in practice. In this research, metrics on cyber capabilities available from 2020 to the present day are compared with information on attack and defense capabilities, and based on this comparison, the reliability of the metrics is assessed.

Keywords: cybersecurity, digitalization, cyber capability, metrics, cyber operations

Felhasznált irodalom

- 2025 Military Strength Ranking (2025). Global Firepower. Online: www.globalfirepower.com/countries-listing.php
- AFP (2022): Moscow Says 100K IT Specialists Have Left Russia This Year. *The Moscow Times*, 2022. december 20. Online: www.themoscowtimes.com/2022/12/20/moscow-says-100k-it-specialists-have-left-russia-this-year-a79754
- Cyber Diia (2024): *A Decade in the Trenches of Cyberwarfare*. Online: <https://nsarchive.gwu.edu/sites/default/files/documents/sem09-ryglx/2024-02-02-Cyber-Diia-A-Decade-in-the-Trenches-of-Cyberwarfare.pdf>
- Global Cybersecurity Index [é. n.]. International Telecommunication Union. Online: www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/pages/global-cybersecurity-index.aspx
- Global Cybersecurity Index (2017). International Telecommunication Union. Online: www.itu.int/pub/D-STR-GCI.01-2017
- Global Cybersecurity Index (2018). International Telecommunication Union. Online: <https://www.itu.int/pub/D-STR-GCI.01-2018>
- Global Cybersecurity Index (2021). International Telecommunication Union.
- Global Cybersecurity Index 2024 (2024). [H. n.]: International Telecommunication Union. Online: www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity/Documents/GCIv5/2401416_1b_Global-Cybersecurity-Index-E.pdf
- HAIG Zsolt – Kovács László (2008): Fenyegetések a cybertérből. *Nemzet és Biztonság*, 1(5), 61–69. Online: https://www.nemzetesbiztonsag.hu/cikkek/haig_zsolt_kovacs_laszlo-fenyegetések_a_cyberterb_l.pdf

Index of Cybersecurity TAG Infosphere. Online: <https://tag-infosphere.com/ccs>

KHUDYNTSEV, Mykola et al. (2021): Cybersecurity Indices: Review and Classification. *CPITS II*, 3187, 117–126. Online: www.ceur-ws.org/Vol-3187/paper11.pdf

KISS Adrienn (2024): Az orosz–ukrán háború hatása a kritikus infrastruktúrákra: Fókuszban az energiaszektor. *Hadmérnök*, 19(3), 183–200. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2024.3.11>

KRAVETS, Valentyna (2019): Comparative Analysis of the Cybersecurity Indices and Their Applications. *Theoretical and Applied Cybersecurity*, 1(1), 97–102. Online: <https://doi.org/10.20535/tacs.2664-29132019.1.169090>

LEWIS, James A. (2022): *Cyber War and Ukraine*. Washington, DC: Center for Strategic and International Studies. Online: www.jstor.org/stable/resrep41883

Military Balance+ [é. n.]. The International Institute for Strategic Studies. Online: www.iiss.org/the-military-balance-plus/

MUELLER, Grace B. et al. (2023): Cyber Operations during the Russo-Ukrainian War. *Center for Strategic and International Studies*, 2023. július 13. Online: www.csis.org/analysis/cyber-operations-during-russo-ukrainian-war

National Cyber Security Index [é. n.]. Online: www.ncsi.ega.ee/

SMITH, Brad (2022): Defending Ukraine: Early Lessons from the Cyber War. *Microsoft on the Issues*, 2022. június 22. Online: <https://blogs.microsoft.com/on-the-issues/2022/06/22/defending-ukraine-early-lessons-from-the-cyber-war/>

A poszt-Covid-szindróma, különös tekintettel a fáradtság repülésbiztonsági jelentőségének és a fáradtság objektív mérésének lehetőségeire

A repülés kezdete óta ismert tény, hogy nem az anyag mechanikai ellenállása limitálja a repülőgép aerodinamikai teljesítőképességét, hanem az emberi teljesítőképesség határa, hiszen az ember alkotja a repülőgép agyát (Louis Blériot).¹ Az emberi teljesítőképesség határainak pontos meghatározása ezért fontos a repülésbiztonság szempontjából. A Covid-19-járvány nemzetközi szakirodalmi tapasztalatai között számos olyan poszt-Covid-szövődményt dokumentáltak, amely jelentős mértékben befolyásolhatja az emberi teljesítőképességet, úgymint a kognitív zavarokat (brain fog), a memóriazavarokat és az alvászavarokat. Ezek közül kiemelt fontosságú a poszt-Covid-időszakban a páciensek jelentős részénél kialakuló és hosszan fennmaradó fokozott fáradékonyság. Jelenleg nem létezik általánosan elfogadott objektív módszer a fáradtság mérésére, ezért jelen kutatás célja a poszt-Covid-fáradékonyság előfordulási gyakoriságának vizsgálata a hazai állami és polgári repülésben dolgozók körében, valamint a fáradtság objektív mérési lehetőségeinek feltárása.

Kulcsszavak: repülésbiztonság, humánfaktor-hiba, poszt-Covid, emberi teljesítőképesség, fáradtság

Bevezetés

A repülésbiztonság komplex, szerteágazó szakterületek összehangolt együttműködésének eredménye, amelynek jelenlétét ritkán észleljük tudatosan, sokkal inkább annak hiányát – a repülésben előforduló hibák okozta veszélyhelyzetek vagy balesetek formájában. Ezen összetett rendszer koordinált és hatékony működéséhez – számos egyéb kritikus tényező mellett – a megbízhatóan működő repülőtechnika, a megfelelő repülési környezet és a repülési feladatokat sikeresen

¹ Louis Blériot francia pilóta és repülőmérnök szavai 1922-ből: „It is not the resistance of material which limits the aerobatic performance of the artificial bird, but the physiologic resistance of man, who is the brain of the artificial bird.” „Nem a repülőgép anyagának ellenállása az, ami limitálja a mesterséges madár aerobatus képességeit, hanem az ember élettani ellenállása az, aki a mesterséges madár agya.” (BLÉRIOT 1922: 305–306; a szerző fordítása).

végrehajtó repülőszemélyzet egyaránt szükséges. Mindhárom területen kulcsfontosságú szerepet játszik az emberi tényező és az emberi teljesítőképesség.

A repülés hajnala óta közismert tény, hogy a humán faktor képezi a repülésbiztonság leggyengébb láncszemét. A humánfaktor-hiba a repülőgép-balesetek leggyakoribb kiváltó oka (BUZAI 2004). Napjainkban a modern repülőtechnikákat számos automatizált és repülést támogató rendszerrel szerelik fel, azonban ezzel párhuzamosan jelentős mértékben megnövekedett a pilóták információfeldolgozó munkaterhelése is. Ugyanez a tendencia megfigyelhető a légi forgalom számottevő emelkedése, valamint a repülőtechnikák fejlődésével együtt járó műszaki kiszolgálás technikai igényeinek és komplexitásának növekedése esetében is, amely összességében rendkívül magas szintű koncentrációs képességet követel meg.

A Covid-19-járvány kezdete óta az orvostudomány folyamatosan gyűjti és elemzi a Covid-fertőzés tüneteit, valamint a hosszú távú szövődményeket is (poszt-Covid-szindróma² és long-Covid-szindróma³), azonban ezen tünetek repülésbiztonsági kockázatait és aspektusait kevesen vizsgálták tudományos alapossággal. A Covid-19-fertőzésen átesett egyéneknél szignifikáns romlás tapasztalható a munkavégzési teljesítményben, beleértve a reakcióidő és a hibaszázalék növekedését is (ZHOU et al. 2020). Azonban még ennél is veszélyesebb a repülésbiztonság szempontjából a Covid-fertőzés után kialakuló fáradékonyság és koncentrációs zavar (*brain fog*), amely a poszt-Covid-időszakban az esetek 60–70%-ában van jelen (HALPIN et al. 2021), és még a long-Covid-időszakban is körülbelül 40%-ban fennmarad, a legújabb kutatási eredmények szerint akár 8–12 hónapig is perzisztálhat (PETER et al. 2022). Mindkét szövődmény súlyosan veszélyezteti az emberi teljesítőképességet, különösen olyan nagy odafigyelést igénylő munkakörnyezetben, mint a repülés – legyen szó a repülőgép kiszolgálásáról, a repülésirányításról vagy magáról a repülésről.

A fáradtság repülésbiztonsági jelentőségét hangsúlyozza, hogy a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (International Civil Aviation Organization, ICAO) két külön repülésbiztonsági ajánlásban is felhívja a figyelmet a fáradtság repülésbiztonsági kockázataira, és konkrét ajánlásokat fogalmaz meg annak elkerülése érdekében (*Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches* és az ahhoz tartozó útmutató, a *Fatigue Management Guide for General Aviation*

² Poszt-Covid-szindróma: a Covid-19-fertőzést követően 4 hétnél tovább fennálló panaszok (MTT 2021: 6).

³ Long-Covid-szindróma: a Covid-19-fertőzést követően 12 hétnél tovább fennálló panaszok (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2024).

Operators for Large and Turbojet Aeroplanes). Az ICAO definíciója szerint a fáradtság olyan mentális és/vagy fizikai teljesítőképesség-romlás, amely alváshiány, elhúzódó időtartamú ébrenlét, felborult cirkadián ritmus és/vagy megemelkedett (mentális vagy fizikai) munkaterhelés miatt alakul ki, és leronthatja a személy éberségi állapotát, valamint feladatainak biztonságos végrehajtási képességét (*Doc 9966. Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches* 2016: 17).

A poszt-Covid- és a long-Covid-tünetegyüttes részeként kialakuló és hosszan fennmaradó fáradékonyság tehát jelentős repülésbiztonsági kockázatot jelenthet, amelyet tovább súlyosbítanak a panaszok között gyakran előforduló koncentrációs problémák és alvászavarok, ezáltal fokozva a krónikus fáradtság mértékét. Ezen szövődmények prevalenciáját és időbeli lefolyását jelen kutatás kérdőíve is törekszik felmérni, és a később részletezett eredmények alátámasztják ezen panaszok hosszú időtartamú jelenlétét a vizsgált repülésben dolgozó populációban is.

A fáradtság jól dokumentált repülésbiztonsági jelentősége ellenére annak mérése napjainkban is elsősorban önbevallós kérdőívekkel történik, amelyek valóságtartalma megkérdőjelezhető – különösen az állami repülésre jellemző feladatorientáltság és teljesítménykényszer mellett. Jelen kutatás célja a poszt-Covid-fáradtság előfordulásának és időbeli jellemzőinek felmérése a repülésben dolgozó polgári és katonai személyek körében, valamint a fáradtság objektív mérési lehetőségeinek tudományos alapú megfontolása. A kutatás első szakasza kérdőíves felmérés formájában vizsgálja a poszt-Covid-tüneteket és azok repülésbiztonsági kockázatait. Az adatgyűjtés folyamatban van, jelen tanulmány előzetes eredményeket közöl.

A kutatás módszertanának bemutatása

Az empirikus vizsgálat bemutatása

Az elméleti bevezető részben bemutatottak alapján a Covid-19-fertőzés az elhúzódó tünetek (poszt-Covid- és long-Covid-szindróma) és az esetleges szövődmények miatt jelentős kockázatot jelenthet a repülésbiztonságra. A hipotézisek igazolása céljából empirikus vizsgálatot hajtottam végre, amelynek során online felületen elérhető kérdőív felvétele valósult meg. Az empirikus vizsgálat célja a Covid-19-fertőzést követően kialakuló tünetek és lehetséges szövődmények előfordulási gyakoriságának felmérése a repülésben dolgozók körében, valamint ezen panaszok repülésbiztonságra gyakorolt hatásának elemzése.

A kérdőívet önkéntes részvétel alapján, anonim módon tölthették ki az éríntettek. A résztvevőket a vizsgálat céljáról részletesen tájékoztatták, a részt vevő személyek írásban hozzájárultak adataik tudományos, kutatási célú felhasználásához. A vizsgálat az MH EK IKEB engedélyével rendelkezik. Az adatgyűjtés 2024 októberében kezdődött, és jelenleg is folyamatban van, így az ismertett eredmények részeredményeknek tekinthetők.

Az empirikus vizsgálat első lépése az adatbázis tisztítása és elemzésre történő előkészítése volt, ezt követte a leíró statisztikai elemzés, majd a hipotézisek mentén végrehajtott analitikus elemzés. Az analitikus elemzés során statisztikai próbákat (t-próba, Fisher-féle egzakt próba, Wilcoxon-teszt, a Cronbach-alfa meghatározása) alkalmaztam R Studio program segítségével. A hipotézisvizsgálat során alkalmazott szignifikanciaszint értéke $p \leq 0,05$.

A vizsgálati eszköz bemutatása

Az összeállított kérdőív 50 kérdést tartalmazott, öt fő részre tagolódott. Az első részben a szociodemográfiai adatokat mértem fel. A második részben az egyén Covid-oltottsági státuszára, a rizikófaktorok meglétére, és amennyiben Covid-19-fertőzésen esett át, akkor a Covid-betegség kapcsán jelentkező tünetek jellegére, időtartamára vonatkozó kérdések szerepeltek. A harmadik részben szereplő kérdések az egyén munkakörére, az azzal járó leterheltségre, a feladatok intenzitására és a munka-pihenés egyensúlyára irányultak. A kérdőív negyedik részében a Covid utáni munkába való visszatérést követően fennálló szubjektív panaszokra vonatkozó kérdések szerepeltek, amelyek befolyásolhatják az egyén korábbi munkaképességét, és repülésbiztonsági kockázatot jelenthetnek. Végül a jóllét és az alvászavarok felmérése következett a Covidot megelőző és a Covid-fertőzés utáni időszakban, nemzetközileg validált kérdőívek segítségével.

A jóllét mérésére a WHO általános jólléti skálájának (WBI-5) magyar változatát alkalmaztam, amelynek validitásvizsgálatát Susánszky és munkatársai végezték el (SUSÁNSZKY et al. 2006). A pszichometriai vizsgálatok alapján a kérdőív kiváló belső megbízhatósággal rendelkezik (Cronbach-alfa: 0,85). A magyar mintán mért átlagérték 7,8 pont (SD=3,8) (SUSÁNSZKY et al. 2006). Az athéni inszomniaskála (AIS) az alvászavarok felmérése és az inszomnia diagnosztizálására szolgál (SOLDATOS et al. 2000; 2003). A magyar változat pszichometriai jellemzői megfelelőnek bizonyultak, Cronbach-alfa: 0,86 (NOVÁK 2004). A továbbiakban a kérdőív tagolásának megfelelően ismertetem az eddigi eredményeket.

3.1. táblázat. *A vizsgálati minta korcsoportos megoszlása*

Korcsoport	Prevalenciáérték
<25 év	13,63%
26–35 év	10,60%
36–45 év	21,21%
46–55 év	31,81%
56–65 év	18,18%
>65 év	4,54%

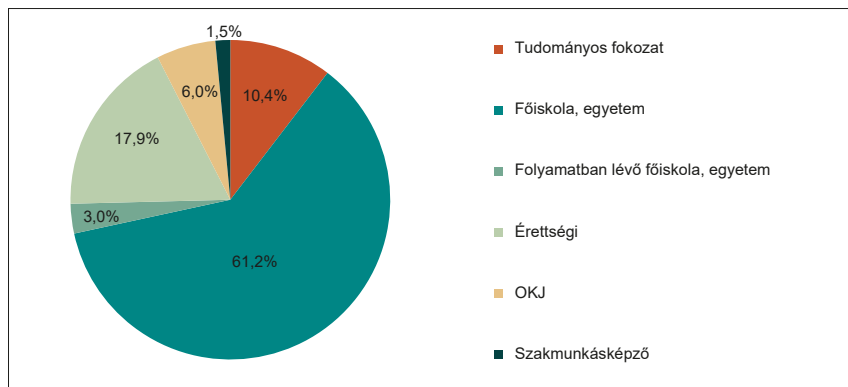
Forrás: a szerző szerkesztése

A vizsgálati minta bemutatása

A vizsgálati mintát 66 fő alkotta, akik az online kérdőívet kitöltötték. Szocio-demográfiai szempontból a nemi megoszlás tekintetében a válaszadók 79%-a férfi volt. Az átlagéletkor 44,85 év volt ($s = 13,65$), a korcsoportos megoszlást a 3.1. táblázat mutatja be. Az átlagéletkor a mintában a katonai repülésben megszokott korhoz képest magasnak tekinthető, ennek oka a kutatásban részt vevők kérdőívkitöltési hajlandósága lehet. Az adattorzulás elkerülése érdekében a kutatás folytatásában tervezett a fiatalabb populációt képviselő személyek bevonása, a katonai repülőorvosi vizsgálatokon megjelenő állomány, a pilóta- és repülésirányító-képzésben részt vevők és a tanuló pilóták bevonása a kérdőívet népszerűsítő kampány keretében.

A válaszadók túlnyomó többsége (77,6%) házas vagy párkapcsolatban élő, az egyedülállók körében az elváltak és a hajadonok/nőtlenek aránya közel azonos volt (10,4% vs. 12%). A legmagasabb iskolai végzettség szerinti megoszlás alapján megállapítható, hogy a válaszadók túlnyomó többsége felsőfokú végzettséggel rendelkezett.

Egészségi állapot szempontjából az átlagos BMI-érték a mintában 27,68 kg/m² ($s = 5,77$), a BMI-kategória szerinti megoszlást a 3.2. táblázat mutatja be. A BMI-nek a Covid-19 szempontjából mind a betegség súlyosságában, mind a várható szövődmények súlyosságában van szerepe. A nemzetközi szakirodalom a túlsúlyt a Covid-19-fertőzés és a kialakuló szövődmények szempontjából egyértelműen kiemelt rizikófaktornak tekinti (KAMAL et al. 2021; SANDLER et al. 2021; Gemelli Against Covid-19 Post-Acute Care Study Group 2020). A kutatás eddigi eredményeiben a túlsúly 37,87%-ban volt jelen, a kóros elhízás enyhe formája 19,69%-ban



3.1. ábra. A minta legmagasabb iskolai végzettség szerinti megoszlása

Forrás: a szerző szerkesztése

fordult elő, míg a súlyosabb elhízás 5% alatti értéket mutat. További adatelemzést igényel ennek a korosztályos megoszlása. A repülésben dolgozóktól fokozottabb egészségtudatos magatartás lenne elvárható a repülőorvosi engedély megvonását jelentő súlyosabb betegségek elkerülése érdekében.

3.2. táblázat. A vizsgálati minta BMI-kategória szerinti megoszlása

BMI-kategória	Prevalenciaérték
Normál	33,33%
Túlsúlyos	37,87%
Elhízott I.	19,69%
Elhízott II.	4,54%
Elhízott III.	4,54%

Forrás: a szerző szerkesztése

A krónikus alapbetegséggel rendelkezők aránya viszonylag magas, 44,8% volt. A leggyakoribb betegség (az esetek 50%-a) a magasvérnyomás-betegség volt, a második helyen a pajzsmirigybetegség (15,6%), míg a harmadik helyen az alvási apnoe állt 9,4%-os gyakorisággal. Ezek közül a magasvérnyomás-betegség összefügghet a kérdőív későbbi kérdéseiben is igazolt, magas stressz-szinttel járó repülési környezettel, valamint a magyar lakosság körében népbetegségnek

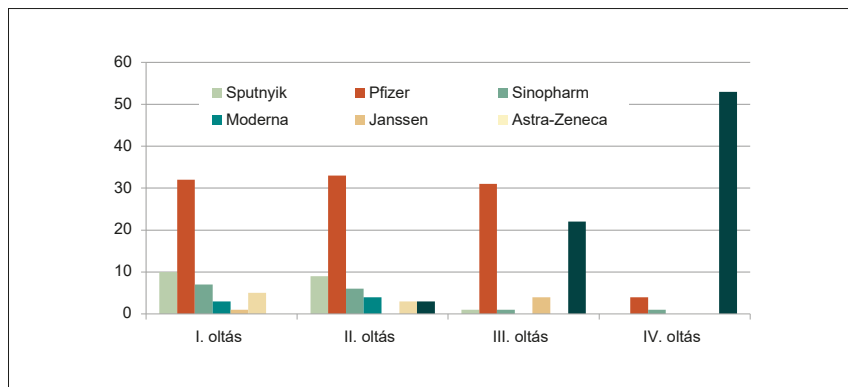
számító gyakori előfordulással. Az elhízás aránya alacsony a válaszadók között, így nem magyarázza önmagában a magasvérnyomás-betegség ilyen gyakoriságát. A pajzsmirigybetegek az immunrendszeri betegségek gyakoriságának emelkedésével együtt a teljes népesség arányában növekszik, feltételezhetően a modern életmóddal járó táplálkozási szokások és szintén a megemelkedett stressz-szint lehet részben a magyarázat, mivel az immunrendszer rendkívül érzékenyen reagál a stresszre. Az alvási apnoe általában alkati és többnyire túlsúllyal összefüggő egészségügyi probléma, azonban a mintában a túlsúly aránya nem volt jellemző, így érdekes adat az alvási apnoe túlsúly nélkül is magas jelenléte. Ennek okát további kutatással szükséges feltárni, mivel az alvási apnoe jelentős mértékben rontja az alvásminőséget, így nagymértékben hozzájárulhat a repülésbiztonsági rizikót jelentő fáradtság kialakulásához és fokozódásához is.

A válaszadók közül 34 fő nyilatkozott katonai vagy civil repülésben való részvételéről, ebből 20 fő a katonai repülésben, míg 14 fő a civil repülésben dolgozik. A kutatás egyik hipotézise szerint a katonai repülésben részt vevők között kevesebb alapbetegség van jelen, mivel rendszeresebben és szigorúbb szabályok szerint vannak szűrve, mint a civil repülésben dolgozók. A részeredmények jelenleg ezt a hipotézist nem igazolják, mivel a katonai csoportban a morbiditási arány (30%) nem mutat szignifikáns eltérést a civil csoporthoz képest (28,57%). Ennek meglepő adatnak magyarázata lehet egyrészt az alacsony elemszám és maga a szigorúbb egészségügyi szűrés, illetve a betegségek korai felismerése. Továbbá a kor eloszlását vizsgálva jelen mintában a katonák átlagéletkora 44 év, míg a civileké 38 év, tehát élettanilag is több alapbetegség várható a jelenlegi katonai csoportban. Valószínűsíthető, hogy az elemszám növelése segít ennek a hipotézisnek az alaposabb tisztázásában.

A Covid-19-oltással és -fertőzéssel kapcsolatos eredmények

A Covid-19 elleni védőoltás eredményei

A Covid-19 elleni védőoltás tekintetében az oltási hajlandóság a vizsgált populációban csökkenő tendenciát mutatott. Míg a válaszadók 88%-a egy, illetve 83%-a két oltást kapott, addig a három oltásban részesülők aránya már csak 56% volt, és mindössze 8% részesült négy oltásban. Az oltóanyagtípus oltásonkénti megoszlását a 3.2. ábra szemlélteti.



3.2. ábra. Covid-19-oltásra vonatkozó eredmények

Forrás: a szerző szerkesztése

Az oltóanyagtípus oltásonkénti megoszlásában jól látható, hogy a legtöbben Pfizer-oltást kaptak. Ez a jelenség általánosnak mondható. Az első két oltásban részesülők magas arányát magyarázhatja az is, hogy a Covid-19-pandémia idején a repülésben dolgozóknak kötelező volt az oltás felvétele, ám ez a szigorú szabályozás idővel enyhült, és így a harmadik és a negyedik oltás már csak ajánlott volt. Továbbá sok vitát és általános félelmet generált a lakosság körében az oltásokkal kapcsolatos oltási szövődmények lehetséges veszélye is.

A Covid-19-fertőzéssel kapcsolatos eredmények

A válaszadók 53,7%-a legalább egyszer, míg 25,4%-a többször is volt PCR-teszttel vagy gyorseszttel igazoltan Covid-pozitív. Figyelemre méltó adat, hogy a magas átoltottság ellenére is a válaszadók jelentős része volt Covid-beteg, és minden negyedik válaszadó többször is volt igazoltan Covid-fertőzött az oltottság ellenére. További adatelemzést igényel még az oltások ideje és a Covid-fertőzések ideje közötti kapcsolat. Az adat jelentőségét tovább árnyalja az a tény is, hogy a fertőzésen tünetmentesen is át lehet esni, amely esetben nem feltétlenül diagnosztizálják a kórt. Valamint 2023 óta a járványügyi rendszabályok enyhülésével jelentős mértékben csökkent a felső légúti panaszok esetén elvégzett szűrő jellegű Covid-tesztelések száma. Az ismétlődő Covid-fertőzéseknel az akut tünetek ugyan általában csökkennek, azonban a poszt-Covid-tünetek fellángolnak, és hosszabb

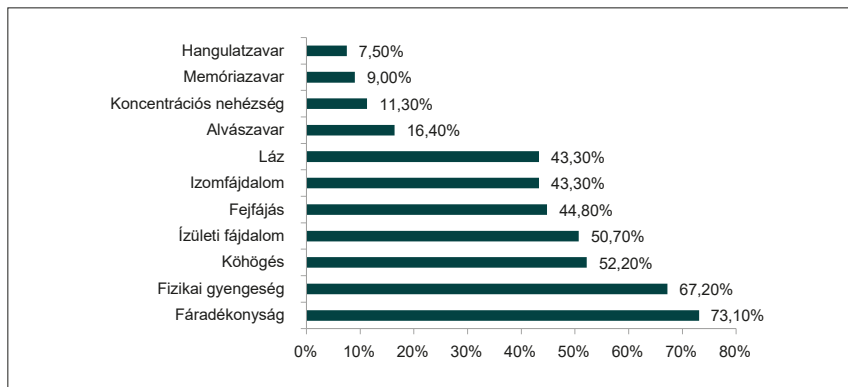
ideig maradnak fenn, mint az első fertőzésnél (SCHMIDT 2023; BOWE et al. 2022). Jelen kutatás adatai is enyhébb tüneteket mutatnak ismételt Covid-fertőzések esetén.

A Covid-19-fertőzés során tapasztalt tünetek gyakoriságának megoszlásában jól látható (3.3. ábra), hogy a vezető tünet a fáradékonyság (73,10%) volt, amely nagyságrendileg egyezik a járvány elején publikált nemzetközi kutatási adatokkal, és a fizikai gyengeség (67,2%). A Covid-panaszok és -szövődmények időbeli lefolyásának elemzésében az adatok alapján a fáradtság fokozatosan csökken ugyan, de sokáig fennáll. A kezdeti 73,1%-ról 1–3 hónap között lecsökken 34%-ra, de 6 hónappal a fertőzés után még mindig 21% a prevalencia, 9 hónappal a fertőzés után is 15%, azonban újra megemelkedik a fáradékonyság előfordulása 12 hónappal a fertőzés után (21%). Ezek alapján már az előzetes adatokból is igazolódni látszik jelen kutatás azon hipotézise, miszerint a fáradtság sokáig – minden ötödik válaszadónál 12 hónapig is – fennmarad a Covid-fertőzés után. Sőt, jelen előzetes adatok azt mutatják, hogy a kezdeti javulás után, egy évvel a fertőzést követően a fáradékonyság prevalenciája ismét emelkedik.

Az esetleges újrafertőződés pedig – még ha enyhébb tünetekkel is zajlik – várhatóan jelentős mértékben tovább fokozza ezt az ismételt fertőződés utáni poszt-Covid-időszakban. Az újrafertőződés veszélye igen magas, mivel az ismétlő oltások már nem kötelezők, a tesztelési hajlandóság is szignifikánsan csökkent. Mindezek mellett az újabb és újabb Covid-variánsokat a rendelkezésre álló gyors tesztek nem biztos, hogy kimutatják, laboratóriumi PCR-tesztre pedig már csak elenyésző mennyiségben küldenek be az orvosok mintákat. Így tehát nagy valószínűséggel marad diagnosztizálatlan az újrafertőződés, azonban annak szövődményei kialakulnak, sőt fokozódhatnak, miközben a beteg nincs tudatában az ismét fokozódó hibaforrás-kockázatnak.

A fáradtság, különösen a krónikus fáradtság kialakulásában és fokozódásában kulcsszerepet játszhat az alvászavar, amely szintén jellemző tünete a poszt-Covid-időszaknak (16,4%). Jelen kutatás adatai alapján az alvászavar 10% körül perzisztál végig a poszt-Covid- és a long-Covid-időszakban, a fertőzést követő 12 hónap után sem mutat javulást. Az alvászavar ezen makacs fennállása meglepő eredmény jelen kutatásban, és felhívja a figyelmet a repülésben dolgozók körében a krónikus fáradtság kialakulásának és fokozódásának veszélyeire. Azon repülőgép-balesetek, amelyek kivizsgálásában az utóbbi években repülésbiztonsági humánfaktor-szakértőként részt vettem, mind jelentős mértékben visszavezethetők voltak a pilóták krónikus kifáradására és az ebből adódó humánfaktor-hibákra.

Jelen kutatás fáradékonyságra és az azt fokozó alvászavarok előfordulására vonatkozó adatai figyelmeztető jelként értelmezhetők ezen hibák gyakoriságának



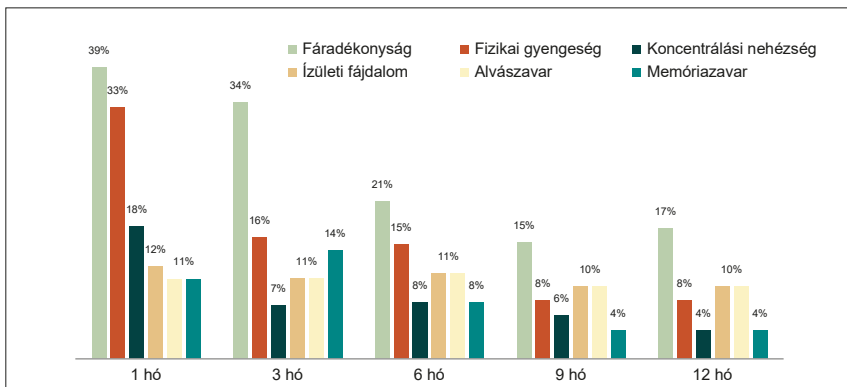
3.3. ábra. A Covid-19-fertőzés kapcsán észlelt tünetek gyakorisága ($N = 66$)

Forrás: a szerző szerkesztése

növekedésével kapcsolatban, így mindenképpen érdemes az eredményeket megosztani a repülésben dolgozókkal, és felmerül ezek beépítése egy poszt-Covid-időszakra aktualizált fáradtságmenedzsment-oktatási programba, amely illeszkedik a kutatás célkitűzései közé (új vizsgálati módszerek és ajánlások megfogalmazása a poszt-Covid repülésbiztonsági rizikóinak csökkentésére).

Habár a Covid-fertőzés során kialakuló koncentrációs nehézség (11,3%) és memóriazavar (9%) a válaszadók jelzései alapján a fáradékonysághoz képest jelentős mértékben kisebb prevalenciával fordul elő a fertőzést követően, ez később, a poszt-Covid- és long-Covid-időszakban megemelkedik. A koncentrációs zavar 3–9 hónap között szinte azonos százalékban perzisztál (6–8%), majd 12 hónappal a fertőzés után csökkenő tendenciát mutat, azonban a hozzá társuló memóriazavar a harmadik hónapban éri el csúcspontját (14%), és utána is csak lassan csökken. Ez a két szövődmény egymással szinergiában jelentős mértékben megemelheti a hibaszázalékot és az emberi hiba előfordulásának rizikóját, így látens hibaforrásként szerepelhetnek munkavégzés közben.

Az ízületi fájdalom és az izomfájdalom gyakorisága a fertőzést követően a fáradékonysághoz hasonlóan magas előfordulást mutat (50,7% és 43,3%), amely egy hónap alatt jelentős mértékben csökken ugyan (12%), azonban azt követően prevalenciája nem csökken, konstansan 10% körül mozgott a vizsgált egyéves időszak alatt. Az ízületi és izomfájdalom a fizikai mozgástér és a kifejtett izomerő korlátozottságával járhat, amely nehézséget és baleseti veszélyforrást jelenthet a



3.4. ábra. A Covid-19-fertőzés leggyakoribb tüneteinek

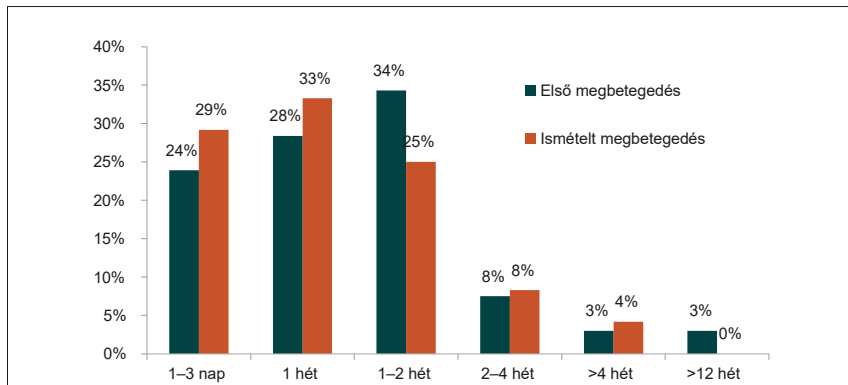
1, 3, 6, 9 és 12 havi prevalenciaértékei

Forrás: a szerző szerkesztése

repüléskiszolgálás munkafolyamataiban, bizonyos esetekben akár a repülés közben is. A nagy gyorsulások túlterhelés hatására kialakuló G-LOC (*loss of consciousness due to G forces*, gyorsulások túlterhelések hatására kialakuló eszméletvesztés okozta hirtelen cselekvőképtelenné válás) elkerüléséhez szükséges anti-G-manőverek (akaratlagos nagy erővel kifejtett izomfeszítések) hatékonysága csökkenhet.

A poszt-Covid-tünetek időbeli lefolyását elemző kérdések eredményei alapján megállapítható, hogy a tünetek egy része a fertőzést követően hosszú ideig fennmaradt. A leggyakoribb tünetek egyhavi, háromhavi, hathavi, kilenchiavi és tizenkét havi prevalenciaértékei alapján jól látható, hogy a fáradékonyság és a fizikai gyengeség mint vezető tünet magas arányban fordult elő, és a gyakoriság az idő előrehaladtával csökkenő tendenciát mutatott. Ezzel ellentétben a krónikus fáradtság kialakulásához jelentős mértékben hozzájáruló alvászavar szignifikánsan nem javul a 12 hónap alatt. A koncentrációs zavarok és a memória-zavarok pedig körülbelül hat hónappal a fertőzés után kezdenek csak csökkenni (3.4. ábra).

A válaszadók körében a fertőzés viszonylag enyhébb tünetekkel járt, erre utal, hogy 64,2% egyáltalán nem fordult panaszával orvoshoz, 29,9% háziorvosát kereste fel, míg kórházi ellátásra 3% szorult. A Covid-19-fertőzés tünehossza az első fertőzés alkalmával a válaszadók 86,6%-nál kevesebb, mint két hét volt, amely nagyjából megfelelt az ismételt fertőzésnél tapasztaltaknak (87,5%). Tehát a válaszok elemzése azt mutatja, hogy a Covid-fertőzés az esetek többségében enyhe lefolyású volt, és az ismételt Covid-fertőzések alkalmával sem volt rövidebb



3.5. ábra. A vizsgálati minta megoszlása a Covid-19-fertőzés tünethossza szerint

Forrás: a szerző szerkesztése

a betegség lefolyása. Az ismételt fertőzések esetében mindössze annyi állapítható meg az adatokból, hogy ezek alkalmával a megbetegedés tünetei nem maradnak fenn 12 hétnél tovább, míg az első fertőzés esetén a válaszadók 3%-nál a tünetek fennálltak még 12 héttel a fertőzés után is.

Mivel a fennálló krónikus betegségek a Covid-fertőzés esetében rizikófaktoroként szerepelnek, a kutatás egyik hipotézise szerint a krónikus betegségben szenvedők esetében a Covid-fertőzés súlyosabb tünetekkel jár, és hosszabb a gyógyulási idő. Így a kérdőív adatainak elemzése során vizsgáltam, hogy a krónikus betegségben szenvedők esetében a Covid-19-fertőzés tünetei hosszabb ideig állnak-e fenn, aminek igazolására a Fisher-féle egzakt tesztet használtam, amely azonban nem vezetett szignifikáns eredményre ($p=0,6217$). Ez az eredmény nem egyezik a nemzetközi szakirodalomban egyhangúlag leírt megfigyelésekkel, azonban az eredményeket torzíthatta az alacsony esetszám és a mintára jellemző magasabb átlagéletkor (44,85 év), illetve az ebből fakadó krónikus alapbetegségekkel kezelték magas aránya (44,8%). A jelen mintából hiányzó fiatalabb, egészségesebb korosztály képviselői torzíthatták a jelenleg közölt előzetes adatokat. A felmérés folytatásában nagy hangsúlyt kap a fiatalabb korosztály bevonása is, hogy homogénebb legyen a minta.

Az ismételt fertőzés tünethossza valamivel kedvezőbb képet mutatott a mintában. Az eltérés vizsgálatára a Wilcoxon-próbát alkalmaztam, szignifikáns eltérés a tünethosszok tekintetében nem igazolódott ($p=0,3997$). Ennek oka lehet az alacsony elemszám, tekintettel arra, hogy mindössze 25 válaszadó nyilatkozott úgy, hogy több alkalommal is volt Covid-19-fertőzése (3.5. ábra).

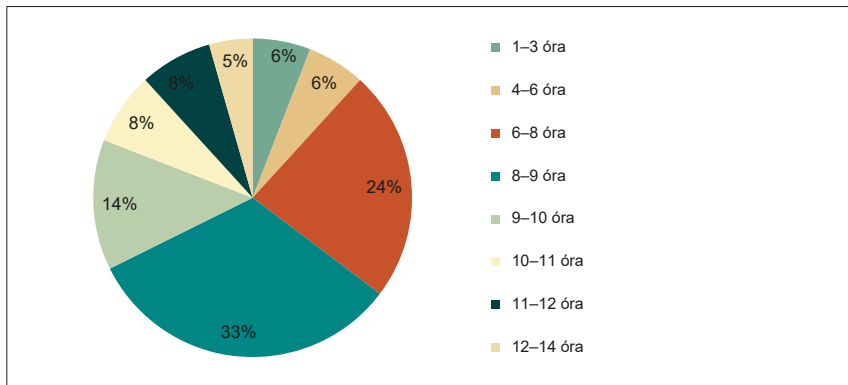
Az ismételt fertőzésen átesettek (25 fő) 64%-a enyhébbnek ítélte a tüneteit, 16% körülbelül ugyanolyannak, és 12% nyilatkozott úgy, hogy rosszabbak voltak a tünetei, mint az első fertőzéskor. Ez a tendencia nagyságrendileg egyezik a nemzetközi szakirodalomban fellelhető adatokkal. A szakirodalmi adatok alapján az ismételt fertőzésekben súlyosabb tünetlefordulás várható a krónikus alapbetegséggel rendelkezők esetében, így a jelen minta adatainak elemzésekor feltételeztem, hogy az ismételt fertőzés tünete súlyossága a krónikus alapbetegséggel rendelkezők körében rosszabb, mint a diagnosztizált betegségben nem szenvedőknél. Ennek igazolására a Wilcoxon-próbát alkalmaztam, amely azonban nem vezetett szignifikáns eredményre ($p=0,4221$). A fentebb részletezett korábbi feltételezés (a szakirodalmi adatok alapján a krónikus betegségben szenvedők esetében várható hosszabb tünettartam és súlyosabb tünetek) vizsgálatához hasonlóan itt is a jelen mintára jellemző magas átlagéletkor és az ezzel járó nagyobb krónikusbetegség-prevalencia okozhatja az adatok torzulását. A fiatalabb korosztály bevonásával ez a torzulás várhatóan ellensúlyozható lesz.

A munkavégzéssel kapcsolatos eredmények

A válaszadók napi átlagos munkaidő-megoszlásában látható, hogy a vizsgálati személyek 57%-ának a napi munkaideje 6–9 óra közötti, 35% dolgozik ennél többet és 12% ennél kevesebbet naponta (3.6. ábra).

A munkavégzéssel kapcsolatban a stressz, a monotónia és a leterheltség vonatkozásában fogalmaztam meg kérdéseket. A munkahelyi stressz és a monotónia mértékének becslésére a válaszadóknak ötfokozatú Likert-skálán kellett válaszolniuk. A válaszadók mindössze 16,4%-a nyilatkozott úgy, hogy egyáltalán nem, vagy csak kicsit érzi stresszesnek a munkakörét, 26,9% közepesen stresszesnek, míg 56,7%-a nagyon vagy kifejezetten stresszesnek tartja azt. Ezek alapján kijelenthető, hogy a repüléssel összefüggő munkavégzés többségében nagyon stresszes munkakörnek mondható.

A stressz mindössze akut fázisban javítja az emberi teljesítőképességet (SELYE 1965), amelyet igen rövid idő után a kimerülés fázisa követ, az eredeti szinthez képest jelentős teljesítményromlással. Az általában igen stresszesnek jelölt repüléssel összefüggő munkakörökben messze nem a teljesítményt fokozó *alarmreakció* jelenik meg, hanem a rutinfeladatok időkényszerben történő végrehajtása kapcsán a krónikus stressz okozta kifáradás. A poszt-Covid-tünetek repülésbiztonsági kockázatainak értékelésekor a munkakörök stressz-szintje mellett figyelembe

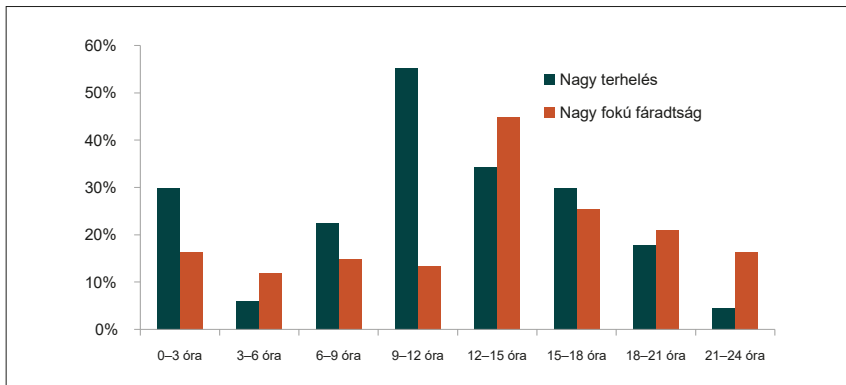


3.6. ábra. A vizsgálati minta napi átlagos munkaidő szerinti megoszlása
 Forrás: a szerző szerkesztése

kell venni a jelen kutatási adatokkal is igazolt igen nagy fokú fáradékonyság, alvászavarok, koncentrációs és memóriazavarok (*brain fog*) okozta fokozódó repülésbiztonsági kockázatokat is.

A válaszadók 64,1%-a szerint a munkájára nem jellemző a monotonia, 19,4% közepes fokú monotoniaról számolt be. Ez az eredmény valamelyest kompenzálhatja a fáradékonyság és a ködös agy okozta kockázatokat, mivel a monotonia önmagában is humánfaktor-hibaforrás lehet, így a változatos feladatok és az alacsony monotoniaszint éberebben tarthatja az emberi figyelmet. Azonban valószínűleg önmagában kevés ahhoz, hogy teljesen ellensúlyozza a humánfaktor-hibaforrás rizikójának a krónikus stressz és a poszt-Covid-időszakra jellemző szövődmények összessége által okozott emelkedését.

A munkahelyi leterheltség, feladatok denzitására vonatkozó kérdésekre adott válaszok alapján jelen kutatás előzetes adatai azt mutatják, hogy a válaszadók 55,2%-a szerint a legnagyobb fokú munkaterhelés a 9–12 óra közötti időintervallumra jellemző, míg 44,8% nyilatkozott úgy, hogy 12–15 óra között érzi magát a legfáradtabbnak. Figyelemre méltó az eredmények elemzése során az, hogy 12–15 óra között van a második legnagyobb leterheltség, ugyanakkor a résztvevők ezen időszak alatt érzik magukat a legfáradtabbnak. Azaz ezen időszak alatt a nagy munkaterhelés mellett a legrosszabb emberi teljesítőképesség várható a fáradtság miatt, és ez önmagában is a humánfaktor-hiba veszélyével jár. Ha mindezt a poszt-Covid-időszakra jellemző fokozott fáradékonysággal és koncentrációs



3.7. ábra. A vizsgálati minta megoszlása a munkaterhelés és a munkafáradtság időintervallumai szerint

Forrás: a szerző szerkesztése

zavarokkal társítjuk, akkor ez a 12–15 óra közötti időszak különösen veszélyes időzónának tekinthető az emberi hiba kockázata szempontjából.

A vizsgálati mintának a munkaterhelés és a munkafáradtság időintervallumai szerinti megoszlását a 3.7. ábra szemlélteti.

Ebből az eredményből újabb repülésbiztonsági ajánlás fogalmazható meg, különösen a poszt-Covid-időszakra vonatkozóan, miszerint ebben a sérülékeny időszakban 12–15 óra között érdemes jobban odafigyelni a kifáradás megelőzésére, akár több pihenő beiktatásával, akár a létszámtervezéssel csökkentett munkaterhelést biztosítani, ezzel csökkentve a repülésbiztonsági rizikót.

A Covid-19-fertőzést követő munkába állás a korábbiakban már ismertetett elhúzódó tünetek miatt számos nehézséggel járt a munkavállalók számára. Ezeknek a problémáknak a gyakoriságát ötfokú Likert-skálán kellett értékelniük a vizsgálati személyeknek. A könnyebb áttekinthetőség érdekében az alsó két kategóriát (kissé vagy egyáltalán nem jellemző) és a felső két kategóriát (nagyon vagy teljes mértékben jellemző) összevontan ábrázoltam. A leggyakoribb probléma a fáradtság és a fizikai gyengeség mellett a megszokott munkában való hamarabb bekövetkező kifáradás volt, ezt követte a rossz alvásminőség miatti fáradtság és a magasabb észlelt stressz (3.8. ábra).

A fáradtság és a nem megfelelő minőségű alvás növeli a hibázások gyakoriságát a munkavégzés során, ennek igazolására vizsgáltam az athéni inszomniaskála (AIS) poszt-Covid-pontszámát a hibázók és nem hibázók körében. A hibázók



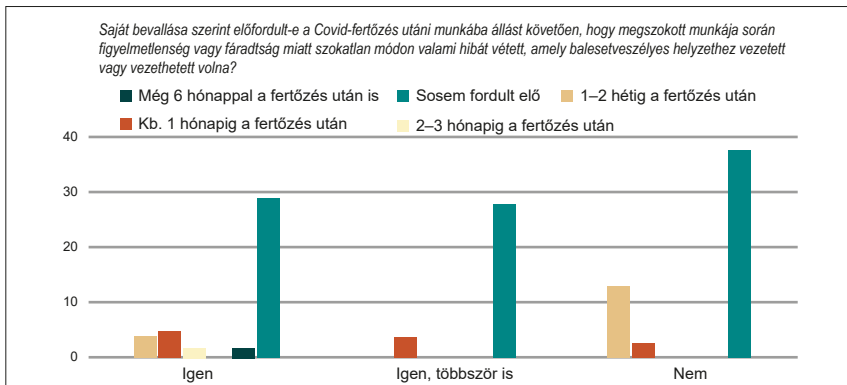
3.8. ábra. A Covid-19-fertőzést követő munkába állás során tapasztalt nehézségek prevalenciaértékei

Forrás: a szerző szerkesztése

poszt-Covid-átlagpontszáma (AIS) 8,04 volt, míg ugyanezen érték a nem hibázók körében 5,80. Az elemzéshez t-próbát végeztem, amely tendenciaszinten jelezte a különbséget ($t = -1,7115$; $df = 53,259$; $p = 0,09281$). A kutatás jelen tanulmányban végzett előzetes elemzése is igazolta, hogy azoknál, akiknél az alvászavarok nagyobb mértékben voltak jelen, azok körében a hibázási tendencia is magasabb volt.

A kérdőív rákérdezett a Covid-fertőzés utáni munkába állást követően az esetleg elkövetett hibák előfordulására. A válaszadók az anonimitásnak köszönhetően jelentős arányban vallottak be olyan munkahelyi hibákat, amelyeket Covid utáni munkába állást követően követtek el, és repülésbiztonsági rizikót, balesetveszélyt jelentett vagy jelenthetett volna. A válaszadók a Covid-fertőzést követő egy-két hónapig, egyesek még a fertőzést követő hat hónapig is vallottak be egy alkalommal elkövetett hibát, és a fertőzést követő körülbelül egy hónapig a válaszadók körében többször is előfordult munkavégzés közben elkövetett hiba, amely balesetveszélyt okozhatott.

Ez az eredmény igazolja a kutatás aktualitását és fontosságát is egyben, hiszen a célja pontosan ezeknek a poszt-Covid-időszakban elkövetett humánfaktor-hibáknak a megelőzése. A repülésben dolgozók ezek alapján valóban önmagukon is észlelték a poszt-Covid-szindróma okozta repülésbiztonsági rizikót. Emellett számos esetben következhetett be olyan hiba, amelyet nem észleltek, vagy a Reason-féle svájcsajt-elmélet (DUDÁS 2020) egyéb védelmi vonalai kiküszöbölték a hiba incidensben vagy balesetben történő manifesztálódását (3.9. ábra).

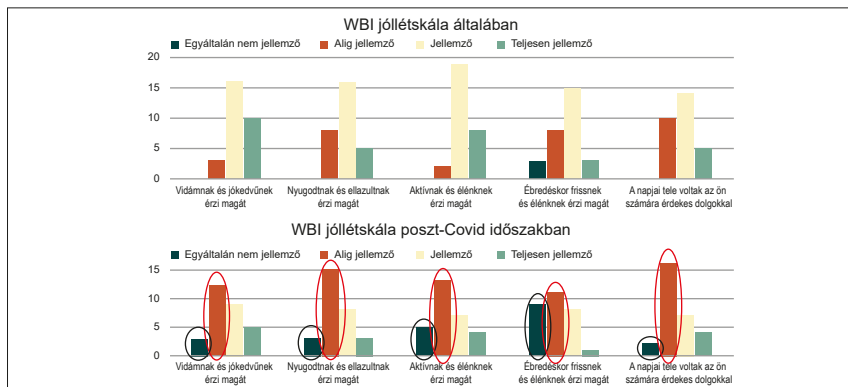


3.9. ábra. A Covid-fertőzés utáni munkába állást követően
elkövetett hibák előfordulása
Forrás: a szerző szerkesztése

Jólléttel és alvászavarral kapcsolatos eredmények

A vizsgálatban részt vevőknek a WBI-5 skálán (*well-being*, WBI – jóllét) kellett szubjektív jóllétükről nyilatkozniuk általánosságban (WBI-5_általános) és a poszt-Covid-időszakra (WBI-5_poszt-Covid) vonatkozóan. A mintában a mérőeszköz jó belső megbízhatósággal rendelkezett, a Cronbach-alfa értéke 0,791 és 0,893 volt, a két érték nem különbözött egymástól szignifikánsan, konfidencia-intervallumaik keresztezték egymást. A mintában a WBI-5_általános átlagértéke 10,01 pont volt (SD=2,502), míg a WBI-5_poszt-Covid átlagpontszáma 7,38 pont volt (SD=3,550). A két skála közötti eltérés elemzéséhez párosított t-próbát végeztem, amely szignifikáns eltérést mutatott a két skálaérték között ($t=6,9278$; $df=65$; $p=2,327e-09$), vagyis a poszt-Covid-jóllétskála szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott.

További érdekesség, hogy egy, a Magyar Honvédség hivatásos és szerződéses állománya körében végrehajtott 2022-es felmérésben (172 fő) a WBI-5 átlagos pontértéke 9,01 volt (SD=2,52 Cronbach-alfa: 0,82) (HORNYÁK 2022), ami azt jelenti, hogy jelen kérdőíves kutatás a repülésben dolgozók körében a Covidot megelőző időszakban magasabb jólléti pontértéket mutat, mint a 2022-es felmérés a Magyar Honvédség tágabb körében. Bár a jelen kutatásban civil személyek is részt vesznek, ez arra enged következtetni, hogy a repülésben dolgozók a nagy

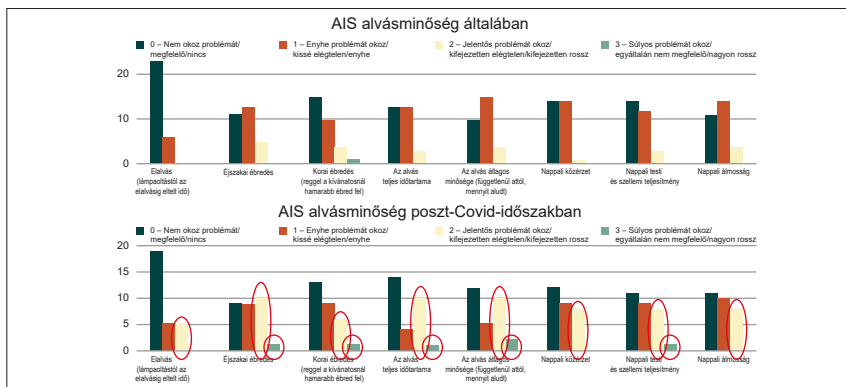


3.10. ábra. A WBI-5 általában és a poszt-Covid-időszakban
Forrás: a szerző szerkesztése

munkaterhelés, feladatorientáltság és teljesítménykényszer ellenére is jobban érzik magukat, mint a munkaköröktől független felmérés résztvevői.

Ezt az eredményt magyarázhatja, hogy a repülésben dolgozóké még napjainkban is speciális és ritka, megbecsült szaktudásnak számít, ezért munkahelyükön mondhatni kiváltságosabb helyzetben vannak, mint az átlagos populáció. Egy másik magyarázat lehet a jóllét élettani szempontjából, hogy a repülésben dolgozóknak rendszeres repülőorvosi alkalmassági vizsgálatokon kell részt venniük, motiváltak repülőorvosi engedélyeik megtartásában, így feltehetőleg nagyobb egészségtudatossággal jellemezhetők és óvják egészségüket, ennél fogva kevesebb a problémájuk, és magasabb a jóllétskálán a pontértékük, mint az átlagos populációé (3.10. ábra).

A tanulmányban számos helyen említettem az alvászavart a fáradékonyság fokozása kapcsán, jelentősége a poszt-Covid-fáradékonyság kialakításában és fenntartásában is igen nagy lehet. A kérdőív adatainak elemzése kimutatta, hogy bár az alvászavarok a fáradékonysághoz képest kisebb prevalenciával fordulnak elő a poszt-Covid-időszakban, azonban a fáradtsággal ellentétben a poszt-Covid-szövődményként kialakult alvászavarok nem mutatnak javulást az idő múlásával. Annak felmérésére, hogy a válaszadók között milyen volt az alvásminőség a Covid-fertőzés előtt és azt követően, a szubjektív alvászavar vizsgálatára szolgáló AIS-kérdőív felvétele történt a Covid-fertőzés előtt általánosságban és a Covid-fertőzés utáni időszakra vonatkozóan.



3.11. ábra. AIS általában
és a poszt-Covid-időszakban
Forrás: a szerző szerkesztése

A mérőeszköz kiemelkedően jó belső megbízhatósággal rendelkezett a mintában, a Cronbach-alfa értéke 0,909 volt mindkét skála esetében. Az AIS_átlános átlagpontszáma 0,59 pont volt (SD = 1,128), míg az AIS_poszt-Covid esetében az átlagpontszám 6,36 pont volt (SD=5,184). A két skála közötti eltérés vizsgálatához párosított t-próbát végeztem, amely szignifikáns eltérést mutatott a két skálaérték között ($t = -9,1877$; $df = 65$; $p = 2,317e-13$), vagyis a poszt-covidos AIS-mutató igen szignifikánsan magasabb értéket jelzett (3.11. ábra).

Összefoglalás

A repülésbiztonságban kulcsfontosságú és kikerülhetetlen az emberi tényező: a modern repülőtechnikák repülést segítő rendszereinek ellenére máig a humán faktor maradt a legfőbb hibaforrás, így tehát minden olyan tényezőt, amely emelheti a humánhiba-faktor előfordulását, érdemes és szükséges elemezni, és kutatni a rizikó csökkentésének módjait. A Covid-19-fertőzés leggyakoribb tünetei, poszt-Covid-, valamint long-Covid-szövődményei pontosan olyan problémák, amelyek jelentős mértékben ronthatják az emberi teljesítőképességet (például fáradtság, alvászavarok, ködös agy), ezzel nagy repülésbiztonsági rizikót jelenthetnek.

Jelen tanulmányban a magyarországi repülésben dolgozó katonai és civil közösség kérdőíves felmérése zajlik a poszt-Covid-panaszok és -szövődmények

előfordulási gyakoriságának, időbeli lefolyásának és súlyosságának felmérése azzal a céllal, hogy tudományos igényességgel értékelni lehessen a poszt-Covid-szövődmények repülésbiztonsági jelentőségét, és megfelelő módszereket, ajánlásokat fogalmazzunk meg ezen rizikó kezeléséhez. A felmérés adatainak előzetes elemzése megerősítette a feltételezést, hogy a fentebb említett poszt-Covid-panaszok jelentős mértékben és meglehetősen sokáig tapasztalhatók, egyes szövődmények (alvászavar, koncentrációs nehézség) nemcsak hosszan fennállnak, de prevalenciájuk konstans – a kérdőívben nyomon követett 12 hónap alatt nem csökkent, tehát kiemelt figyelmet kell fordítani ezek hosszú távú, kumulatív teljesítménycsökkentő hatására.

A közölt adatok és elemzések általános érvényű értékelhetőségét korlátozza a viszonylag kis elemszám (66 fő), a minta magas átlagos életkora (44,85 év) és az ebből következtethető magas arányban jelen lévő krónikus betegségek (44,8%). Az ebből fakadó adattorzulások ellensúlyozása érdekében a kutatás folytatásába aktívabban vonom be a fiatalabb korosztály képviselőit is.

Az előzetes eredmények alapján a kutatás két hipotézise (a fáradtság gyakoribb a poszt-Covid-időszakban és a poszt-Covid-tünetek hosszú ideig fennmaradnak) igazolódni látszik, míg egy hipotézis (a civil repülésben dolgozók esetében több krónikus betegség figyelhető meg, mint a katonai repülésben dolgozóknál) egyelőre megdőlni látszik. Azonban az elemszám, a megoszlás és a korfa tekintetében is bővíteni kell a mintát ezek végső bírálatához. A részeredmények alapján már megfogalmazhatók repülésbiztonsági ajánlások, hogy a fáradtság és az egyéb társuló szövődmények, valamint a magas munkahelyi stressz miatt kialakuló kumulatív fáradtság jelentős lehet a poszt-Covid-időszakban, és a rizikók elkerülésére hosszú ideig (akár 12 hónapig is) oda kell figyelni ezekre, és oktatási programba építeni az ismereteket.

A kérdőíves adatok alapján sérülékeny időszak azonosítható a munkahelyi leterheltség és a szubjektív fáradtság összefüggésében (12 és 15 óra között), amikor a nagy munkaterhelés nagy fokú fáradtsággal párosul, így jelentős hibaveszélyt okozhat, érdemes ennek csökkentésére munkaszervezésbeli megelőző lépéseket tenni a repülésbiztonság érdekében. Továbbra is tudományos kihívást jelent a kutatás második része, amelyben a fáradtság objektív mérésének lehető-ségeit vizsgáljuk.

THE AVIATION SAFETY ASPECTS OF POST-COVID SYNDROME, PARTICULARLY FATIGUE, AND THE POSSIBLE OBJECTIVE MEASUREMENT METHODS OF FATIGUE

It has been recognized since the dawn of aviation that it is not material resistance that limits the aerodynamic performance of an aircraft, but rather the boundaries of human performance, as humans constitute the 'brain of the aircraft' (Louise Blériot). Determining the limits of human performance is therefore of paramount importance for aviation safety. Among the lessons learned from the Covid-19 pandemic literature, numerous post-Covid complications have been described that can significantly influence human performance, such as cognitive impairment (brain fog), memory disorders, and sleep disturbances. Of particular importance is the increased fatigue that develops and persists for extended periods in a significant proportion of patients during the post-Covid period. Currently, there is no widely accepted objective method for measuring fatigue. Therefore, this research aims to examine the prevalence of post-Covid fatigue among domestic military and civilian aviation personnel and to explore the possibilities for objective fatigue measurement.

Keywords: aviation safety; human factor error; post-Covid, human performance, fatigue

Felhasznált irodalom

- BLÉRIOT, Louis (1922): Safety Coefficients and the Future of Aviation. *L'Aérophile*, 1, 305–306.
- BOWE, Benjamin – XIE, Yan – AL-ALY, Ziyad (2022): Acute and Postacute Sequelae Associated with SARS-CoV-2 Reinfection. *Nature Medicine*, 28, 2398–2405. Online: <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02051-3>
- BUZAI László (2004): A humán faktor szerepe a repülésbiztonsági rendszerek működtetésében. *Repüléstudomány.hu, Különszámok*. Online: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2004_cikkek/buzai_laszlo.pdf
- Doc 9966. *Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches* (2016). Montréal: International Civil Aviation Organization. <https://www.icao.int/publications/doc-9966-includes-complete-set-fatigue-management-implementation-manuals>
- DUDÁS Zoltán (2020): A leggyakoribb hibák a légi közlekedésben. A Piszkos Tizenkettő. *Repüléstudományi Közlemények*, 32(3), 51–59. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.4>
- Gemelli Against COVID-19 Post-Acute Care Study Group (2020): Post-COVID-19 Global Health Strategies: The Need for an Interdisciplinary Approach. *Aging Clinical and Experimental Research*, 32, 1613–1620. Online: <https://doi.org/10.1007/s40520-020-01616-x>
- HALPIN, Stephen J. et al. (2021): Postdischarge Symptoms and Rehabilitation Needs in Survivors of Covid-19 Infection: A Cross-Sectional Evaluation. *Journal of Medical Virology*, 93(2), 1013–1022. Online: <https://doi.org/10.1002/jmv.26368>

- HORNÁK Beatrix (2022): *A mentális állóképesség mérésének és fejlesztésének lehetősége a Magyar Honvédség hivatásos és szerződéses személyi állományának körében*. PhD-értekezés. Budapest: Nemzeti Közszerzői Egyetem Hadtudományi Doktori Iskola. Online: https://hdi.uni-nke.hu/document/hdi-uni-nke-hu/Hornyak_Beatrice_doktori%20%C3%A9rtekezés%C3%A9s.pdf
- KAMAL, Marwa et al. (2021): Assessment and Characterisation of Post-COVID-19 Manifestations. *The International Journal of Clinical Practice*, 75(3), e13746. Online: <https://doi.org/10.1111/ijcp.13746>
- KIRKHAM, William R. – WICKS, S. Marlene – LOWREY, D. Lee (1982): *G-Incapacitation in Aerobatic Pilots: A Flight Hazard*. Technical Report FA-AM-82-13. Oklahoma City: Civil Aeromedical Institute Federal Aviation Administration. Online: www.skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2756.pdf
- MTT (2021): A Covid-19 vírusfertőzésen átesett – és visszamaradó károsodásokat szenvedő – poszt-Covid szindrómás betegek gondozási protokollja. *Magyar Tudógyógyász Társaság*, 2021. március 25. Online: <https://tudogyogysz.hu/News/News/30443>
- National Academies of Sciences, Engineering és Medicine (2024): *A Long COVID Definition: A Chronic, Systemic Disease State with Profound Consequences*. Washington, DC: National Academies Press. Online: www.nap.nationalacademies.org/catalog/27768/a-long-covid-definition-a-chronic-systemic-disease-state-with
- NOVÁK Márta (2004): *Alvászavarok és életminőség*. PhD-értekezés. Budapest: Semmelweis Egyetem Doktori Iskola.
- PETER, Raphael S. et al. (2022): Post-Acute Sequelae of Covid-19 Six to 12 Months After Infection: Population Based Study. *BMJ*, 379, e071050. Online: <https://doi.org/10.1136/bmj-2022-071050>
- SANDLER, Carolina X. et al. (2021): Long COVID and Post-infective Fatigue Syndrome: A Review. *Open Forum Infectious Diseases*, 8(10), ofab440. Online: <https://doi.org/10.1093/ofid/ofab440>
- SCHMIDT, Charles (2023): Do Repeat COVID Infections Increase the Risk of Severe Disease or Long COVID? *Scientific American*, 2023. február 15. Online: www.scientificamerican.com/article/do-repeat-covid-infections-increase-the-risk-of-severe-disease-or-long-covid/
- SELYE János (1965): *Életünk és a stressz*. Budapest: Akadémiai. Online: www.archive.org/details/eletunkesastressz/page/n7/mode/2up
- SOLDATOS, Constantin R. – DIKEOS, Dimitris G. – PAPARRIGOPOULOS, Thomas J. (2000): Athens Insomnia Scale: Validation of an Instrument Based on ICD-10 Criteria. *Journal of Psychosomatic Research*, 48(6), 555–560. Online: [https://doi.org/10.1016/S0022-3999\(00\)00095-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3999(00)00095-7)
- SOLDATOS, Constantin R. – DIKEOS, Dimitris G. – PAPARRIGOPOULOS, Thomas J. (2003): The Diagnostic Validity of the Athens Insomnia Scale. *Journal of Psychosomatic Research*, 55(3), 263–267. Online: [https://doi.org/10.1016/s0022-3999\(02\)00604-9](https://doi.org/10.1016/s0022-3999(02)00604-9)
- SUSÁNSZKY Éva et al. (2006): A WHO jól-lét kérdőív rövidített (WBI-5) magyar változatának validálása a Hungarostudy 2002 országos lakossági egészségfelmérés alapján. *Mentálhigiéné és Pszichoszomatika*, 7(3), 247–255. Online: <https://doi.org/10.1556/mental.7.2006.3.8>
- ZHOU, Hetong et al. (2020): The Landscape of Cognitive Function in Recovered COVID-19 Patients. *Journal of Psychiatric Research*, 129, 98–102. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jpsy-chires.2020.06.022>

Gyarmati József – Hegedűs Ernő –
Gávay György

A 3D-nyomtatás kutatásának eredményei az NKE HHK Haditechnikai Tanszéken

A tanulmány bemutatja a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Logisztikai Intézet (NKE HHK KLI) Haditechnikai Tanszékének 3D nyomtató laboratóriumaiban elért, additív gyártástechnológiához kapcsolódó kutatási eredményeket, amelyek elsősorban a katonai logisztika tudományterületéhez köthetők. Az NKE HHK KLI Haditechnikai Tanszék kutatásainak célja az additív gyártástechnológia alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata a katonai logisztikában, az iparban és a katonai-műszaki felsőfokú képzésben. A kutatás során vizsgálták a fémek, a műanyagok, a szálerősítéses kompozitanyagok 3D-nyomtatásának, valamint az Atomic Diffusion Additive Manufacturing, azaz atomi diffúziós additív gyártás (ADAM) fémnyomtatási technológia alkalmazásának lehetőségeit. A vizsgálatok kiterjedtek a 3D-nyomtatás alkalmazhatóságára gépjárművek és UAV-k alkatrészeinek – tartók, fogaskerekek, bolygómművek – gyártására és pótlására. A főként a robotikában alkalmazott hullámhajtómű tervezése és 3D-nyomtatása, valamint a robotjárművek összeállítása szintén a kutatás részét képezte. A tanszék bevezette az Autodesk Fusion 360 alapú 3D modellezés oktatását, valamint két 3D nyomtató laboratóriumban megvalósította a nyomtatás gyakorlati oktatását az NKE HHK-n zajló katonai-műszaki felsőfokú képzésben a BSc-hallgatók, a PhD- és Erasmus-kutatók, valamint a Horizon Europe-pályázók számára. A kutatási tapasztalatokat az European Defence Agency (EDA) munkaülésén is megvitatták a kutatók.

Kulcsszavak: Haditechnikai Tanszék, 3D-nyomtatás, additív gyártástechnológia, katonai logisztika, katonai-műszaki felsőfokú képzés

Bevezetés

A tanulmány ismerteti az NKE HHK KLI Haditechnikai Tanszékén (a továbbiakban: Haditechnikai Tanszék) zajló kutatásokat, amelyek az additív gyártástechnológia (AM-technológia) alkalmazási lehetőségeinek feltárása érdekében folynak 2022 óta. A kutatók célja az innovatív additív gyártástechnológiáknak, a fémek, műanyagok és kompozitanyagok 3D-nyomtatása alkalmazási lehetőségeinek a vizsgálata a katonai logisztikában és a katonai-műszaki felsőfokú képzésben (VÉGVÁRI 2022).

A tanulmány továbbá egyes korszerű AM-technológiák részletes bemutatására és azok alkalmazási lehetőségeinek, tapasztalatainak ismertetésére vállalkozik. Bemutatja az ADAM-technológiájú 3D fémnyomtatást, annak alkalmazási lehetőségeit, a zárt belső szerkezetek, cellák előállításának lehetőségét és előnyeit, valamint a magas olvadáspontú fémek nyomtathatóságát. Ismerteti a kombinált – vágott rövid szálú, emellett folyamatos szálfektetésű – szálerősítéses kompozit műanyag alkatrészek nyomtatásának egyes lehetőségeit. Kitér a fém alkatrészek szálerősítéses kompozitra cserélhetőségének kérdésére is.

A tanulmány bemutatja a Haditechnikai Tanszék 3D nyomtató laboratóriumai-ban elért, AM-technológiához kapcsolódó kutatási eredményeket. A kutatásokhoz kapcsolódóan a Haditechnikai Tanszéken kialakított laboratóriumok lehetővé tették az AM-technológiához kötődő 3D-modellezés oktatásának bevezetését, valamint két 3D nyomtató laboratóriumban gyakorlati nyomtatási tevékenységek kutatási célú megvalósítását az NKE HHK-n zajló katonai-műszaki felsőfokú képzésben, a BSc-hallgatók, a PhD- és Erasmus-kutatók, valamint a Horizon Europe-pályázók számára.

Az NKE HHK 2022-ben több különféle technológiájú, köztük fém-, valamint szálerősítéses kompozit nyomtatására alkalmas 3D nyomtatót szerzett be. Ennek oka, hogy a 3D-nyomtatás napjainkban találja meg a helyét a katonai logisztika és az üzemeltetés területén, valamint a katonai felsőoktatásban (CLEMENS 2022; *European Military Additive Manufacturing Symposium* 2021). Az ADAM-technológiájú nyomtatás – a Markforged Metal X fémnyomtató – az amerikai haderő katonai logisztikai eszköztárában 2018-ban jelent meg (MOLITCH-HOU 2020). A Haditechnikai Tanszék 2022-ben kezdte meg kutatásait a Markforged Metal X fémnyomtatóval. A nyomtató által alkalmazott ADAM-technológia lehetővé teszi a magas olvadáspontú fémek nyomtathatóságát, ezáltal olyan fémek jelennek meg ezen a területen, amelyeknek egyértelmű hatása van a haditechnika fejlődésére. Lehetőség nyílik már a zárt belső szerkezetű anyagok (zárt cellák) előállítására.

Egyes alkatrészek 3D-nyomtatott alkatelemmel való pótlása esetében a mechanikai terhelés mértéke vagy az adódó hőterhelések, élettartam-követelmények egyértelműen megkövetelik a fém alkatrészek alkalmazását. A tanszék részére beszerzett fémnyomtató a fent említett technológiát alkalmazza, és a Haditechnikai Tanszék két év alatt mintegy 200 különféle gépelem és próbatest 3D-nyomtatását végezte el a Metal X típusú fémnyomtatóval.

Napjainkban egyes fejlett 3D műanyagnyomtatók már képesek folyamatos üvegszál-, szénaszál- vagy kevlaraszál-erősítést beépíteni a nyomtatott termékekbe, amelynek alapanyagát emellett vágott szénaszálerősítéssel is elláthatják.

A szálerősítéses műanyagok a 3D-nyomtatásban – a vágott és/vagy folyamatos szálerősítésű kompozit műanyagok nyomtatásának terjedése a 3D műanyag-nyomtatásban – olyan új alapanyagot jelentenek, amelyek szilárdsága megközelítheti egyes könnyűfémekét. Egy ilyen AM-technológiával legyártott, folyamatos szálerősítéssel és vágott szálerősítéssel egyaránt erősített kompozit műanyag gépelem szilárdságtani mutatói kedvezők – elsősorban a szálerősítés által egyetlen síkban szilárdabbá tett, egy irányban adódó terhelések esetében. Az NKE HHK által beszerzett 3D nyomtatók egyike egy szálerősítéses műanyag technológiájú, MarkForged Onyx Pro típusú kompozit nyomtató. Az e nyomtatónál alkalmazott korszerű alapanyag-technológia és az AM-technológia együttes alkalmazása már lehetővé teszi egyrészt akár a fém gépjárműalkatrészek pótlását kisebb fajlagos tömegű műanyagokkal, másrészt a pótalkatrészek rugalmas előállítását.

Mindezek figyelembevételével feltételezhető, hogy létezik a járműalkatrészeknek olyan halmaza, amelyek esetében – a pótalkatrész additív gyártása során – lehetséges a fém műanyaggal való helyettesítése, és az AM-technológia alkalmazása lehetővé teszi a fém gépjárműalkatrészek pótlását kisebb fajlagos tömegű műanyagokkal. Célszerű tehát megvizsgálni a fém alkatrészek műanyag 3D-nyomtatott alkatrésszel történő pótlásának lehetőségét az alábbi előnyök miatt: kisebb szerkezeti tömeg, alacsonyabb gyártási költség, a fém alkatrész 3D-nyomtatásához képest csekélyebb gyártási idő, valamint kedvező korrózióval szembeni ellenálló képesség utólagos felületkezelés nélkül is.

A Haditechnikai Tanszék két év alatt mintegy 100 különféle gépelem 3D-nyomtatását végezte el a MarkForged Onyx Pro típusú szálerősítéses kompozit nyomtatóval. A tapasztalatokat a European Defence Agency (EDA) 3D-nyomtatás munkacsoportban való részvételünk során megvitattuk. 2024 őszén az NKE HHK képviselte magát az EDA a 3D-nyomtatás katonai logisztikai alkalmazását vizsgáló munkacsoportjában (Additive Manufacturing for Logistic Support Project Working Group, AMLS).

Napjainkra az AM-technológia széles tárháza áll rendelkezésre 3D-nyomtatott alkatrészek előállításához (BADIRU–VALENCIA–LIU 2020: 948). Az AM-technológia több alapvető technológiája, például a 3D-nyomtatás valójában nem új, hanem mintegy három évtizedre tekint vissza, és elkerülhetetlenné vált az AM-technológiák katonai alkalmazása.

A katonai logisztikában alkalmazható AM-technológiák jelentősége

Az alapanyagok széles spektrumának köszönhetően a jelentősebb európai haderők már számos olyan alkatrészt tudnak előállítani, amelyek beszerzése hosszadalmas és körülményes lenne. Az AM-technológiák alkalmazásával új lehetőségek nyíltak az alkalmazó állomány igényein alapuló saját fejlesztésekre és a technikai eszközök alkatrészeinek pótlására, azok továbbfejlesztésére. A technológia katonai területen való térnyerése egyértelműen új igényként jelentkezik a katonai logisztikában, mivel szükség van képzésekre, eszközökre, alapanyagokra, szoftverekre. Ezt a gondolatmenetet folytatva a beszerzés és a logisztikai ellátási láncok aktualizálása, fejlesztése, fizikai és kibervédelme is felmerül új követelményrendszerként.

A katonai logisztika fejlesztésének igényével foglalkozik az EDA AMLS panelje. A szervezetnek több munkaülésein, valamint más rendezvényen is sikerült eredményes munkával megfogalmaznia a területet érintő problémákat, és olyan folyamatot elindítania, amelynek előrehaladtával megteremthető a jól megfogalmazott követelményrendszer, valamint a nemzetek közötti együttműködés alapjai. Az EDA AMLS foglalkozik saját munkacsoportjainak működésirányításával, az AM-technológiákkal, a logisztikai ellátási lánc működésével, törvényi keretekkel és szabályzókkal, minőségirányítással, humán erőforrással és képzéssel, valamint információmenedzsmenttel és IT-vel (3rd European Military Additive Manufacturing Symposium 2025).

A 3D-nyomtatás dinamikusan terjed az iparban, valamint a katonai logisztika területén is. Az AM-technológiák számos irányát alkalmazzák már a katonai célokra, és a felhasználási területek igényei határozzák meg azok megfelelőségét (DARUKA et al. 2024b; 2024a). Ezek közé tartozik az oktatás, a kutatás és a fejlesztés, a prototípusgyártás és a modellezés, valamint az egyedi gyártás, a sorozatgyártás (kis, közepes, nagy sorozat) vagy a tömeggyártás.

A tudományos probléma megfogalmazása

A megoldandó tudományos probléma a katonai logisztika területén elsősorban ott adódik, hogy napjaink NATO-ajánlása szerint a járművek alkatrészeit még távoli térségekben, missziókban is biztosítani kell a műveleti alkalmazás során, valamint a rendszerben tartás ideje alatt. Azonban az alkatrészek biztosítása nem minden

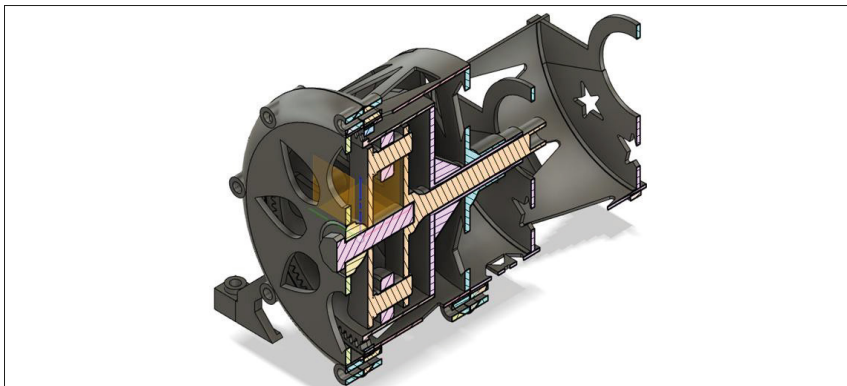
esetben oldható meg a missziós területre telepített szakanyagraktár készleteiből. Emellett békeidőszakban, a haderő hazai területen végzett tevékenysége során sem minden esetben garantálható az alkatrészellátás – különösen több évtizede rendszerben álló technikai eszközök esetében. Ezekben a helyzetekben egyes NATO-tagállamok – elsősorban az Egyesült Államok és Németország – haderői az AM-technológiával, 3D-nyomtatással előállítható pótalkatrészek – köztük fém és műanyag alkatrészek – szükség szerinti egyedi gyártását kezdték meg az utóbbi években.

Magyarország 2021. évi Nemzeti Katonai Stratégiája kimondta, hogy egyes új technológiák, például a 3D-nyomtatás katonai alkalmazása alapjaiban változtatja meg a jelenlegi hadviselés szabályait és eljárásrendjét [1393/2021. (VI. 24.) Korm. határozat]. A 3D-nyomtatás a Magyar Honvédségben bevezetendő technológia. Konkrét felhasználási területeit tekintve vizsgálat tárgyát képezte a katonai logisztikában alkalmazott gépjárművek alkatrészpótlása 3D-nyomtatási technológia alkalmazásával, valamint a kiképzési célú eszközök és anyagok 3D-nyomtatási lehetőségei is.

Gyakorlati alkalmazások

A járműtechnika tekintetében fémből és kompozit anyagból egyaránt 3D-nyomtatják a hűtőrendszer egyes elemeit – hűtőfolyadékcsövek és azok tartói –, amelyek beépítési próbái is lezajlottak (VÉGVÁRI–HEGEDŰS–ZENTAY 2022). A katonai egyenruhának és a gépjárműtechnikai eszközöknek is fontos műanyag elemét képezik a bepattanó kötések, amelyek kutatását és 3D-nyomtatását szintén elvégezték (VÉG et al. 2024). A gépjárműlámpatestek additív gyártásának egyik lehetősége a litofántechnológia, amelynek kutatása hallgatói munka keretében zajlott.

Az egyetemi képzés, oktatás támogatása területén is jól hasznosítható az AM-technológia. Ilyen terület a sebességváltó-modell kialakítása 3D-nyomtatással oktatási célból, amelynél az automata sebességváltóban alkalmazott Wilson-rendszerű kapcsolt bolygóművet valósították meg (GYARMATI et al. 2022). Emellett 3D modellezés tárgyát képezte a lánc talpas jármű kormányzása is (GYARMATI 2023). Oktatási célú modell kialakítására került sor 3D-nyomtatási technológiával a forgó dugattyús befecskendezőszivattyú tehermentesítő szelepe esetében is. Számos oktatási bolygóművet is nyomtattak – nem egyet hallgatói tudományos diákköri pályamunka keretében. Hallgatói munka a nagy áttételi viszonyú – főként a robotikában alkalmazott – hullámhajtómű tervezése és nyomtatása is (4.1. ábra).



4.1. ábra. A hullámhajtómű tervezése
és nyomtatása hallgatói munka
Forrás: a szerzők szerkesztése

Az AM-technológia anyagtudományi oldalának megismerésére és alkalmazására adott lehetőséget a fémnyomtatás esetében a rendelkezésre álló ADAM-technológiájú nyomtató, amellyel – más fém alapanyagok mellett – hőálló Inconel különleges fémötvözet és alacsony olvadáspontú réz egyaránt nyomtatható. Komplex geometriákat, zárt belső cellákat, összetett belső üregeket, valamint a konvencionálístól eltérő fogprofilú és anyagú fogaskerékpárokat, bolygóműveket – köztük réz bolygóművet – is nyomtattak. Innovatív és távlati, a kutatás-fejlesztés szempontjából perspektivikus 3D-nyomtatási eredmény az UGV-járműfejlesztés kutatása és e területen az alkatrészek nyomtatása, a komplett robotjárművek összeállítása.

Az AM-technológia szempontjából kiemelkedően fontos területként képezték vizsgálat tárgyát a 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai (RÁKOSI 2023). Távlati kutatás volt a 4D nyomtatás és az okosanyagok alkalmazása lehetőségeinek vizsgálata (VÉG 2023). Vizsgálat tárgyát képezte általában a 3D-nyomtatás alkalmazása a repülő-szakterületen és az UAV-k gyártásában és pótalkatrész-ellátásában, valamint a 3D fémnyomtatással gazdaságosan gyártható könnyített szerkezetű alkatrészek alkalmazhatóságának vizsgálata. A jövő lehetősége az optikai elemek 3D-nyomtatással történő előállítására, amely területen kísérleteket folytattak le (VÉGVÁRI 2024). Az AM-technológia részeként, a 3D modellezéshez kapcsolódóan vizsgálták a topológiai optimalizálás, a generatív tervezés és a 3D-nyomtatás kapcsolatát, amelybe az Autodesk Fusion 360 szoftver ismereteire oktató hallgatók is bekapcsolódtak (HEGEDŰS et al. 2024).

A katonai szempontból alkalmazható 3D-nyomtatási technológiák általános ismertetése

Általános technológiák

FDM/FFF-technológia

Az FDM/FFF (*fused deposition modelling/fused filament fabrication*) szálhúzásos nyomtatási eljárás során egy vagy több nyomtatófej a tekercsben lévő, hőre lágyuló anyagszálat olvasztja meg, majd rétegről rétegre rakja le, és az egyes rétegek mindig hozzátapadnak az előző réteghez. Ez az eljárás alapvetően műanyag, valamint kompozit anyagok felhasználását teszi lehetővé.

ADAM-eljárás

Az ADAM-eljárás első fázisa szintén ugyanezen az elven működik, azonban ez esetben viasz hordozóanyagba ágyazott fémszemcséből építi fel a munkadarabot a nyomtató. A kinyomtatott előgyártmány a mosási folyamatot követően szinterkemencében kapja meg végső minőségi mutatóit, valamint méretét.

SLA-technológia

Az SLA (*stereolithography*) 3D nyomtatók a tárgyak elkészítéséhez folyékony műgyanta alapanyagot használnak, amelyet az építési területen rétegről rétegre lefektetnek, majd egy lézer segítségével összekötnek, és megkeményítenek.

SLM-technológia

Az SLM (*selective laser melting*), a fémporok szelektív lézerolvasztása elvén működő eljárás során a nyomtató nagy energiájú lézersugarat használ fel a fémpor megolvasztáshoz, amely szinte bármilyen összetételű lehet. Lehetőség nyílik ezáltal gépjárművek, munkagépek vagy repülő eszközök fém alkatrészeinek előállítására is. Szükség esetén tábori körülmények között is alkalmazható. A fémek lézerporágyas fúziós technológiája esetén a felület minősége gyakran

nem felel meg a felhasználási követelményeknek, ezért a termék előállításakor szükséges a csatlakozófelületek megmunkálása forgácsolással, anyagleválasztó technológiával.

További technológiák

Az SLS- (*selective laser sintering*) technológia alapján működő 3D nyomtatók porállagú alapanyagot (műanyag, fém) használnak az építésre, amelyet a nyomtatófej a nyomtatókamra tálcájára a kívánt rétegvastagságban elterít, majd egy lézer felolvasztja az egyes rétegeket, amelyek összeolvadnak egymással (HATOS et al. 2024).

A Polyjet nyomtatók a nyomtatás során folyékony fotopolimer cseppeket kötnek össze UV (ultraviola) -fényforrás segítségével. A Binder Jetting nyomtatási eljárás során a rétegenként lefektetett finomszemcsés poros alapanyagra kötőanyagot permeteznek, amely megszilárdul. A DLP (*digital light processing*) nyomtatók fotopolimer alapanyagot használnak fel a tárgyak felépítésére. Egyszerre egész rétegeket keményítenek meg egy fényforrás és egy digitális tükör felhasználásával.

Alapanyagok

Műanyagok

Az alkalmazható műanyagok széles spektruma magában foglalja az ABS (acrylonitrile butadiene styrene) erős, kopásálló és strapabíró műanyagot, a nylon erős, kopásálló és könnyű műanyagot kiváló mechanikai tulajdonságokkal, az ASA (acrylonitrile styrene acrylate) hőre lágyuló műanyagot jó UV-állósággal, kedvező mechanikai és esztétikai tulajdonságokkal. A további alapanyagok közé tartozik a DIRAN tartós és szívós, nylonalapú hőre lágyuló műanyag, a PLA (polylactic acid) jó UV-állósággal és rétegtapadással, ugyanakkor alacsony nedvességállósággal rendelkező merev és erős műanyag. A PETG (polyethylene terephthalate glycol-modified) erős, tartós, kopásálló és hőálló anyag jó mechanikai tulajdonságokkal, a TPU (thermoplastic polyurethane) rugalmas műanyag jó ütésállósággal és kopásállósággal. A PC (polikarbonát) magas szakító- és hajlítószilárdsággal rendelkező erős műanyag, a HIPS (high-impact polystyrene) nagy tartósságú és ütésállóságú polisztirol.

Fémek

A fém alapanyagok közé tartoznak a bronzötvözetek, a rézötvözetek, a szerszám- és martenzites acélok, a rozsdamentes acélok, az alumíniumötvözetek, a titán és a titánötvözetek, valamint a nemesfémek (arany, platina, ezüst).

Kompozitok

A kompozit anyagok kategóriájába sorolhatók a műanyag- és fémporkeverékek, a műanyagok és más, nem fém porok keverékei (például farost, gipsz, kőpor), a műanyag- és mikroszálkeverékek, valamint a folyamatos szálerősítés (szénszál, üvegszál, kevlar).

Az ADAM 3D fémnyomtatási technológia részletes ismertetése

Alkalmazható alapanyagok és képességek

Az ADAM-technológiánál alkalmazható alapanyagok közé tartoznak a szerszám-acélok, a rozsdamentes acél, a hőálló inconel (például Inconel 625 vagy 718), valamint a réz. Az ADAM fémnyomtatási eljárás alkalmas komplex geometriák, például zárt cellás belső szerkezetű gépelem gyártására (például giroid kitöltéssel, összetett furatokkal), magas olvadáspontú fémek (például inconel–nikkel tartalmú hőálló ötvözet) nyomtatására (például turbinalapát, kipufogószelep, hőcserélő), alacsony olvadáspontú fémek (például réz) nyomtatására, valamint az alapanyagok gyors cseréjére. A fentiekre más fémnyomtatási technológiák nem, vagy csak kevésbé alkalmasak.

A technológiai folyamat

Az ADAM 3D fémnyomtatási eljárás három lépésben valósul meg: nyomtatás, mosás, szinterezés. Ennek megfelelően lett berendezve a Haditechnikai Tanszék laboratóriuma is (4.2. ábra). Az ADAM-technológiájú MarkForged Metal X 3D fémnyomtató polimermátrixba kötött fémporokat extrudál, a műanyag 3D-nyomtatáshoz



4.2. ábra. ADAM-technológiájú 3D fémnyomató laboratórium: nyomtató, mosó és szinterkemence, háttérben a gázellátó rendszer

Forrás: a szerzők felvétele

hasonló, hagyományos olvasztott szál leválasztásos módszerrel. A nyomtató második feje vékony kerámia elválasztóréteget nyomtat, amely a gyártmány megtámasztása érdekében felépített támasztékok leválasztására szolgál. Az ADAM fémnyomtatási technológia alkalmazása során a nyomtató – az Eiger szoftver alkalmazásával – a nyomtatott tárgyakat az FFF-technológiának megfelelően rétegről rétegre, hőre lágyuló polimerrel és viasszal kötött fémporból gyártja le.

A mosási folyamat és annak jelentősége

A nyomtatás után a viasz kötőanyag eltávolítása következik mosással. A kinyomtatott zöld alkatrészt kötőanyag-mentesítő alkatrészmosó állomásba helyezik. A kötőanyagot ekkor kivonják a munkadarabból olyan módon, hogy gépi úton, melegített (50–54 °C hőmérsékletű) és 12–23 órán keresztül áramoltatott oldószerben kimossák belőle a viaszt. Az Eiger szoftver szelekteléskor az alkatrész vastagságával összefüggően kiszámítja a várható mosási időt. Az Eiger szoftver által – a leírt alkatrésztömeg megadását követően – számított időtartamú mosás megfelelőségét a modell tömegcsökkenésének mérésével ellenőrzik.

A nyomtatás után tömegmérés következik, majd a mosási idő letelte után újabb tömegmérést végeznek. Ezeket az adatokat a szoftverben rögzítik. Amennyiben a tömegvesztés nem éri el a kívánt mértéket, további mosási ciklusokat kell

alkalmazni a megfelelő viasztartalom-csökkenés eléréséig. A nem megfelelő időtartamú mosás a kemence viaszos eltömődését okozhatja, amely jelentős üzemeltetési problémákhoz vezethet.

A mosást addig kell folytatni, amíg az Eiger szoftver által számított megfelelő tömegcsökkenés be nem következik. A mosási fázisban a zöld alkatrészből az oldószeres fürdés során kizárólag a viasztartalom oldódik ki, míg a megmaradó polimertartalom összefogja az alkatrészt a szinterezési folyamatig, létrehozva a barna alkatrészt.

A szinterezési folyamat és annak paraméterei

Az alkatrész a hőkezelő kemencében történő szinterezés során éri el az öntvényminőséget. A folyamat során az immár barna mosott alkatrészek kerülnek a szinterező kemencébe, amely 22–27 órán keresztül és maximum 1482 °C hőmérsékleten szinterezi a fém alkatrészeket. A modellt argon védőgázban hevítik a fém olvadáspontjáig egy kamrában, hogy megkapják a végleges alkatrészt.

A technológia jellegzetessége, hogy a kamrás hevítés (szinterezés) során az elkészített modell térfogata csökken, bizonyos geometriák mellett esetleg deformálódhat is. Az 1 : 6 alap-magasság alkatrészarány felett fokozódik a deformáció veszélye. A technológia alkalmazása során a nyomtatvány – például D2 szerszámacél alapanyag esetén – az eredeti méretéhez képest akár 10%-os zsugorodást is elszenvedhet, amelyet az alkalmazott Eiger tervezőprogram számított nyomtatásiméret-ráhagyással kompenzál.

Opcionálisan a kemence nemcsak a szinterezést, hanem argonhűtésű hőkezelést is végezhet. A szinterezési idő így 37 órára növekszik, viszont az anyagtulajdonság javítására vonatkozó lehetőségek bővülnek. Az alkatrész hőkezelése igény szerint természetesen külön hőkezelő kemencében is megoldható.

A szinterezés utolsó fázisa és az anyagtulajdonságok

A szinterezési folyamat során minden nem fémes adalékanyag kiég a modellből a szinterező kemencében, amely argon védőgázzal védi meg a fémeket az oxigénnel való reakciótól. A szinterezés utolsó fázisában 2,4% hidrogéntartalmú argon gázkeveréket alkalmaznak a kemencében. A távozó gázokkal együtt távozik a szinterezett alkatrészből kiégő maradék műanyagtartalom is.



4.3. ábra. Különféle próbatestek nyomtatás utáni hőkezelése a szinterkemencében
Forrás: a szerzők felvétele

A mosott 3D-nyomtatott alkatrészek a kemencében fémformátumú alkatrésszé alakulnak át, majd lehűlés közben zsugorodnak. Mivel a zsugorodás mértékével a nyomtatást vezérlő szoftver (Eiger) a tervezési fázisban számol, és korrekciókat végez, a késztermék a kívánt (tervezett) méretben állítható elő.

Tervezési irányelvek és korlátok

Tervezési segédlet ad támpontot például ahhoz, hogy az 1 : 6 átmérő-magasság arány felett figyelembe kell venni a függőleges tájolású szinterezés esetleges deformáló hatását. Az ADAM-technológia elnevezése arra a fontos jellemzőre utal, amely szerint a nyomtatás fémportartalmú filament segítségével rétegenként történik. Ezek a rétegek azonban a szinterezés során homogén anyagú termékké olvadnak össze, lényegében minden irányban azonos szilárdsági jellemzőket garantálva (4.3. ábra).

Vizsgálták az ezzel a technológiával előállított alkatrészek méretpontosságát és felületi minőségét, valamint szilárdságát is. Összességében a technológia korlátai és lehetőségei egyaránt dokumentáltak, jellemzői ismertek. Az ADAM-technológiával készült alkatrészek alkalmasak további gépi megmunkálásra, felületkezelésre vagy akár hőkezeléssel történő szilárdságnövelésre is.

Alkalmazási területek és perspektívák

Az ADAM-technológiájú 3D fémnyomtatás alkalmazása jelenleg és a jövőben is előnyös az olyan hőálló, nehezen önthető és nehezen megmunkálható ötvözetek esetében, amelyek 700 °C-ig hőállóak és szilárd keménységűek (22 HRC, 237 HB, 280 HV). Ilyen fém például az inconel, amelynek az alkalmazása gázturbinák és turbófeltöltők turbinaalkatrészeinél egyaránt fontos.

Az inconel csak vákuumban önthető, mivel egyébként a fém olvadási hőmérsékleténél a Ni és a Cr alkotóelem és ötvöző kiégne. A 3D fémnyomtatás – különösen a magas olvadáspontú anyagok nyomtatására alkalmas ADAM-technológia – fejlődésének egyik kulcsterülete a nyomtatható fém alapanyagok anyagtudományi szempontból történő fejlesztése és a paletta bővítése.

A magas olvadáspontú fémek jelentős szerepet játszanak a turbinalapátok, a gázturbina-gázsebességfokozók és -gázsugárkormányok, a rakétahajtóművek, a kipufogószelepek, a hőcserélők gyártásában. Emellett rozsdamentes acél, alumínium, szerszámacélok, titán, továbbá réz is nyomtatható ADAM-technológiával, amelyhez jelenleg zajlik az alapanyag-paletta bővítése és fejlesztése.

A szálerősítéses kompozit anyag 3D-nyomtatási technológiájának részletes ismertetése

A technológia alapjai és fejlődése

Napjainkban a műanyagnyomtatás területén a szálhúzásos vagy a szálolvasztásos technológia tekinthető alapvetően elterjedtnek (*fused filament fabrication*, FFF). A műanyag 3D-nyomtatásánál megkülönböztetünk homogén műanyag és szálerősítésű műanyag termékeket. Az FFF-technológiához készített filamentek – a PET-, PETG-, ASA-, ABS- és nylonpolimerek esetében – széles körben alkalmaznak például rövidre vágott karbonszálakat a polimerek adalékaként 15–20% körüli mennyiségben.

Rövidre vágott szálak – üvegszál vagy szénszál – ilyen mértékű adagolásával a hajlítószilárdság kétszeres-háromszoros értékűre növelhető a 3D-nyomtatott szerkezeti elemnél. Újabb lehetőség az AM-technológiában a műanyagok folyamatos szálerősítése, mivel napjainkban már nemcsak az alapanyagba kevert mikroméretű szálak, hanem emellett további, az építési rétegekbe helyezett folyamatos szálerősítés is elkészíthető, tovább javítva ezzel a szilárdsági mutatókat.

A kombinált erősítési technológia előnyei

A szálerősítéses műanyagok 3D-nyomatása – a vágott vagy folyamatos szálerősítésű kompozit műanyagok nyomtatásának terjedése a 3D műanyag-nyomatásban – olyan új alapanyagot jelent, amelynek a szilárdsága megközelítheti egyes könnyűfémekét. A 70-es évek óta ismert, hogy a 30% üvegszálkitöltéssel erősített poliamid sűrűsége mindössze 20%-kal növekszik, miközben fajlagos szakítószilárdsága több mint a kétszeresére nő (HILDEBRAND 1977).

Napjainkra már széles körben vizsgálták a különféle szálak mechanikai tulajdonságait a 3D-nyomatott műanyag kompozit szerkezetekben, és egyebek mellett előnyösnek találták az üvegszál hajlítószilárdságra gyakorolt hatását (TÓTH–KOVÁCS 2020: 5). Az is ismert, hogy a 20% rövid szénszállal erősített poliamidminták a nyírószilárdság 50%-os javulását mutatják, emellett jobb tapadást mutatnak a nyomtatott rétegek között (RADZUAN et al. 2023).

Kézenfekvő a két technológia – a rövidre vágott szénszál-, illetve a folyamatos szálerősítés – kombinálása a nyomtatott poliamidtermékben. Napjainkban egyes fejlett 3D műanyagnyomatók már képesek folyamatos üvegszál-, szénszál- vagy kevlaraszál-erősítést beépíteni a nyomtatott termékbe, amelynek alapanyagát emellett vágott szénszálerősítéssel is elláthatják.

A Markforged Onyx Pro technológia jellemzői

A Haditechnikai Tanszék kompozitnyomatásra Markforged Onyx Pro nyomtatót alkalmaz. Technológiáját tekintve a Markforged Onyx Pro nyomtató szálhúzásos (FFF) típusú, adagolója dupla fogaskerekes, kopásálló, kompozitra felkészített konstrukció. Képes folyamatos szálerősítéses munkadarabok nyomtatására és zárt cellák létrehozására különféle kitöltésekkel.

A nyomtató munkatere $320 \times 130 \times 160$ mm, a létrehozott rétegvastagság 100–200 μm . A teljesítmény maximuma 350 W. Az ajánlott nyomtatófej-hőmérséklet 210–220°C, míg a nyomtatótálca-hőmérséklet 60°C. Az eszköz képes folyamatos szálerősítéses – üvegszál-erősítésű – munkadarabok nyomtatására. Jelenleg a Markforged által forgalmazott legnagyobb, szálerősítéses Onyx (poliamid) nyomtatására alkalmas műanyagkompozit-nyomtató az FX-20, amelynek munkatere $525 \times 400 \times 400$ mm méretű, amely már alkalmas lehet egyes ipari szintű alkatrészgyártási igények kiszolgálására is.

Az Onyx kompozit anyag tulajdonságai

Az alkalmazott PA6 Onyx kompozit nyomtatószál kis méretű, rövid szénuszálakat tartalmaz, ezáltal jelentős terhelhetőség és alkatrésztartósság is elérhető, miközben az alkatrész hőmérséklettűrése 130–140 °C fölé is növelhető. A PA alapanyag ezáltal alkalmas a gépjárművek motorterében elhelyezett alkatrészek és tartók gyártására.

Az Onyx mátrixanyag jellemzői: nylon (PA6 poliamid), rövid (vágott) szálú szénszálerősítéssel (szakítószilárdság: 40 MPa; hajlítószilárdsága: 90 MPa). Ebben helyezik el a folyamatos szálerősítést, kizárólag az x–y síkban. Az üvegszál szakítószilárdsága 240 MPa. A mátrixszál kompozit szerkezet, maximális szilárdsága üvegszállal erősített alapanyaggal 200 MPa, míg nagy szilárdságú HSHT (*high strength high temperature*) üvegszál esetében 400 MPa. A fejlettebb Markforged nyomtatók folyamatos szénszál-erősítésű Onyx alapanyaggal 550 MPa szilárdságot érnek el.

Gyakorlati alkalmazási lehetőségek

A Markforged Onyx Pro nyomtató képes folyamatos szálerősítéssel zárt cellák egyidejű létrehozására is. Összességében a szálerősítésű 3D-nyomtatás alkalmazásával felmerülhet új alkatrészek tervezése más műanyagnyomtatási technológiákhoz képest kisebb tömegű és nagyobb szilárdságú kivitelben. A rövid és folyamatos szálerősítéssel rendelkező, különféle kitöltésekkel legyártott kompozit szerkezetű 3D-nyomtatott Onyx-alkatrészek szilárdságát szakirodalmi adatok alapján még tovább lehet növelni topológiai optimalizálással (SZEDERKÉNYI et al. 2022: 82; KOVÁCS et al. 2024: 29–48).

A járművek alkatrészpótlásának lehetőségeire, illetve a meghibásodott alkatrész pótlásával egyidőben kivitelezett fejlesztésre az FFF-eljárások nagyon jó lehetőséget nyújtanak. Az ilyen jellegű tevékenység alapja a *reverse engineering*, amikor egy sérült vagy hiányzó alkatrészt kell a rendelkezésre álló adatokból újramodellezni az elérhető technikai eszközökkel. A technikai eszközök a kézi mérőműszerektől a 3D szkennerekig terjedhetnek.

A 3D-modellezés és -nyomtatás helye a katonai oktatásban és az NKE-n jelenleg kutatott technológiák

Az AM-technológiák integrációja a katonai logisztikába

Az AM-technológiák alkalmazásának beillesztése a katonai logisztikába már megkezdődött. A szövetségi környezet előnye a kutatási eredmények és az erőforrások megosztása, valamint a standardizálás lehetősége. A nemzeteknek lehetősége van olyan tiszteket és szakembereket képezni, akik alkalmasak lesznek az AM-technológiák menedzselésére akár saját nemzeti, akár szövetséges környezetben.

A jól felkészült technikai tisztek képzéséhez a jövőben elengedhetlenné válik az AM-technológiákkal való megismerkedés. Szükségessé vált a katonai területen alkalmazható AM-technológiák meghatározásának és kiválasztásának képessége, valamint azok logisztikai igényeinek pontos meghatározása.

Az NKE HHK kutatási tevékenysége

Az NKE HHK három tanszéke is aktívan foglalkozik a 3D-nyomtatás katonai felhasználásának kutatásával. A Haditechnikai Tanszék a képzésébe is beépítette a szakrajz- és géprajztémájú tantárgyak tananyagába a 3D modellezés (CAD) alapjait, illetve a hallgatókat ösztönzi a tudományos versenymunkák 3D-modellezés- és -nyomtatás-alapú kivitelezésére és elkészítésére. Ennek a tevékenységnek jó alapot biztosít a tanszékek többéves pályázatokon alapuló eddigi kutatási munkája. A 3D modell elkészítése, az anyagválasztás és a szeletelőprogram beállítása olyan ismereteket igényel, amelyek oktatását a diákoknak a tanszék megkezdte.

Technológiai portfólió és kutatási fókusz

Az NKE HHK-n jelenleg három tanszék kutatja az AM-technológiák felhasználási lehetőségeit, a kutatási igényeknek megfelelő mértékben kooperálva. A Haditechnikai Tanszék rendelkezik a legszélesebb portfólióval, mivel FDM- (műanyag és kompozit) és ADAM-technológiájú fémnyomtatási képességekkel egyaránt rendelkezik.

Az FDM-alapú műanyag- és kompozitnyomtatási lehetőségek kutatása azok elterjedtsége és az esetleges alkalmazáskor relatív alacsony infrastrukturális igénye miatt mondható ideálisnak. A kadétek gyorsan elsajátíthatják a szükséges műszaki alapokat, pedagógiai szempontból kifejezetten előnyös, hogy rövid idő alatt lehet pozitív tapasztalatokat szerezni, és a tervezési, előkészítési, illetve nyomtatási folyamatok problémás területei jól detektálhatók.

Biztonsági szempontok és technológiaválasztás

A fém alapanyagú 3D-nyomtatás kutatása és oktatása olyan technológiát követel meg, amely esetében a biztonság nagyobb hangsúlyt kell hogy kapjon. Az ADAM- és az SLS-technológiát ezért célszerű volt összevetni.

Az ADAM-technológia az alkalmazott Markforged Metal X rendszerrel ki-küszöböl több olyan tényezőt, amely a már említett előkészítési és nyomtatási folyamatokban játszik szerepet. A nyomtatási paramétereket felhőalapú rendszerben határozzák meg, és ezáltal a munkadarab struktúrája, anyagának homogenitása stabilabb lesz.

Oktatási alkalmazások

Kiemelt figyelmet kapott a 3D-nyomtatás oktatásban betölthető szerepe, mivel a kadétek bevonásával az oktatást segítő eszközök nyomtatására is lehetőség van. A Haditechnikai Tanszék AM-technológiát célzó kutatási tevékenysége során nagy hangsúlyt fektet a műveleti területen alkalmazható nyomtatási eljárásokra (Kovács et al. 2024).

Eredmények és következtetések

Az ADAM-technológia főbb megállapításai

Az ADAM fémnyomtatási eljárás képes komplex geometriák és zárt cellás belső szerkezetű gépelemek gyártására, magas és alacsony olvadáspontú fémek nyomtatására, valamint az alapanyagok gyors cseréjére. Az ADAM-technológia szinterezési

fázisa során a nyomtatott rétegek homogén anyagú termékke olvadnak össze, lényegében minden irányban azonos szilárdsági jellemzőket garantálva.

A kompozit technológia előnyei

A kombinált – vágott rövidszálú, emellett folyamatos szálfektetésű – szálerősítéses kompozit műanyag-alkatrészek nyomtatása lehetőséget teremt egyes fém alkatrészek szálerősítéses kompozitra cserélésére. Az alkatrészek műanyag 3D-nyomtatott alkatrésszel történő pótlása előnyös a kisebb szerkezeti tömeg, az alacsonyabb gyártási költség, a fém alkatrész 3D-nyomtatásához képest csekélyebb gyártási idő, illetve a kedvező korrózióval szembeni ellenálló képesség miatt.

Gyakorlati alkalmazási eredmények

A 3D-nyomtatott, folyamatos üvegszál-, illetve rövidre vágott szénszál-erősítéses, nagy szilárdságú, hőálló Onyx poliamid kompozit alkatrész – gépjármű-hűtőrendszerbe kísérletileg beépített hűtőfolyadékcső – hő- és vegyianyag-állósága, hőterheléssel és rezonanciával szembeni ellenálló képessége alkalmassá tette a fém hűtőcső pótlására. Az alkatrésszellátást még távoli térségekben, missziókban is biztosítani lehet a műveleti alkalmazás során, illetve a rendszerben tartás ideje alatt 3D-nyomtatással.

A gyakorlati megvalósítás eredményei

Az NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszéken a gépelemek 3D-nyomtatásának végrehajtása során különböző fém alapanyagok felhasználásával elkészített legfontosabb alkatrészek a következők voltak: 220 darab fém próbatest, köztük 33 darab 17-4PH Stainless Steel V1 anyagú kocka, fém fogaskerékpár (D2 szerszámacél), valamint különféle fém tartó- és csatolóelemek (17-4PH Stainless Steel V1 anyagból, üreges kitöltéssel nyomtatva).

Több mint 200 darab próbatest készült el. Elmélyült kompetencia alakult ki a Markforged Eiger szoftverének kezelésében, valamint az ADAM nyomtatási technológia alkalmazásában. Vizsgálták a topológiai optimalizálás és a generatív tervezés lehetőségeit.

Összegzés

A tanulmány egyes korszerű AM-technológiák és alkalmazási lehetőségeik, tapasztalataik vizsgálatára vállalkozott a logisztika területén. A kutatás során megállapították, hogy mind az ADAM fémnyomtatási technológia, mind a folyamatos szálerősítéses kompozit nyomtatása jelentős potenciállal rendelkezik a katonai alkalmazások területén.

Az ADAM-technológia különösen alkalmas komplex geometriájú, hőálló fém alkatrészek gyártására, míg a kompozit technológia lehetőséget teremt költség-hatékony, könnyű alternatívák előállítására. Mindkét technológia hozzájárulhat a katonai logisztika hatékonyságának növeléséhez, különösen távoli műveleti területeken történő alkalmazás esetén.

A katonai oktatásban betölthető szerep szintén jelentős, mivel ezek a technológiák új kompetenciák elsajátítását teszik lehetővé a jövő katonai szakemberei számára. Az NKE HHK kutatási eredményei azt mutatják, hogy a magyar katonai felsőoktatás képes lépést tartani a nemzetközi fejlődéssel ezen a területen.

RESULTS OF 3D PRINTING RESEARCH AT THE LUPS FMSOT DEPARTMENT OF MILITARY TECHNOLOGY

This paper presents the research results of the Department of Military Technology at the Military Logistics Institute, Faculty of Military Science and Officer Training, Ludovika University of Public Service (LUPS FMSOT), which are related to additive manufacturing technology, primarily in the field of military logistics. The aim of the research conducted by the Department of Military Technology at the Military Logistics Institute, Faculty of Military Science and Officer Training at the University of Public Service is to investigate the application possibilities of additive manufacturing technology in military logistics, industry, and military-technical higher education. The research examined the potential of 3D printing of metals, plastics, fiber-reinforced composites, and the application of Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) metal printing technology. The studies covered the applicability of 3D printing for the production and replacement of components for vehicles and UAVs, such as brackets, gears, and planetary gears. The design and 3D printing of wave drive systems, mainly used in robotics, and the assembly of robotic vehicles were also investigated. The department introduced Autodesk Fusion 360-based 3D modeling education and implemented practical printing education in two 3D printing laboratories for BSc students, PhD and Erasmus researchers, and Horizon Europe applicants in the military-technical higher education

at LUPS FMSOT. The researchers also discussed their research experiences at meetings of the European Defence Agency (EDA).

Keywords: Department of Military Technology, 3D printing, additive manufacturing, military logistics, military-technical higher education

Felhasznált irodalom

- 1393/2021. (VI. 24.) Korm. határozat Magyarország Nemzeti Katonai Stratégiájáról.
- 3rd European Military Additive Manufacturing Symposium (2025). *European Defence Agency*, 2025. február 19. Online: www.eda.europa.eu/news-and-events/events/2025/04/08/default-calendar/3rd-european-military-additive-manufacturing-symposium
- BADIRU, Adedeji B. – VALENCIA, Vhance V. – LIU, David (2020): *Additive Manufacturing Handbook - Product Development for the Defense Industry*. [H. n.]: Routledge – CRC Press.
- CLEMENS, M. (2022): The Use of Additive Manufacturing in The Defense Sector. *3Dnatives*, 2022. június 30. Online: www.3dnatives.com/en/the-use-additive-manufacturing-defense-sector300620224
- Composites (2023). Markforged. Online: <https://admasys.hu/wp-content/uploads/2024/09/Markforged-kompoziti-3d-nyomatatas-alapanyagok-muszaki-adatlapja.pdf>
- DARUKA Norbert et al. (2024a): A 3D nyomtatási képesség kialakításának lehetőségei és korlátai a Magyar Honvédségben. *Hadtudomány*, 34(E-szám), 27–39. Online: <https://doi.org/10.17047/Hadtud.2024.34.E.27>
- DARUKA Norbert et al. (2024b): A 3D-nyomtatási technológia oktatásának lehetőségei és feltételei a műszakitiszt-képzésben. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(1), 5–18. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.1.1>
- European Military Additive Manufacturing Symposium (2021). Die Deutsche Gesellschaft für Wehrtechnik e.V. Online: www.veranstaltungen.dwtsgw.de/anlage?i=3266&c=GZNvHVIKHEb-TUFx&n=000025_programme.pdf
- GÁVAY György (2023): Logisztikai járművek alkatrészpótlása 3D nyomtatási technológia alkalmazásával. *Katonai Logisztika*, 31(3–4), 208–232. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-3-4-208>
- GYARMATI József (2023): Lánctalpas jármű kormányzása és ennek 3D modellezése. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(3), 51–61. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.3.5>
- GYARMATI József – HEGEDŰS Ernő – GYÖRGY GÁVAY (2022): Automata sebességváltóban alkalmazott kapcsolt bolygóművek – Wilson-váltó. Harkocsi-sebességváltó modell kialakítása 3D nyomtatással oktatási célból. *Műszaki Katonai Közlöny*, 32(3), 113–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.7>
- HATOS István et al. (2024): Effect of Energy Density on the Mechanical Properties of 1.2709 Maraging Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion. *Materials*, 17(14), 3432. Online: <https://doi.org/10.3390/ma17143432>
- HEGEDŰS Ernő et al. (2024): Topológiai optimalizálás, generatív tervezés és a 3D-nyomtatás. Az additív gyártástechnológia ipari alkalmazhatóságának vizsgálata. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(2), 141–154. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.2.10>
- HILDEBRAND, Christfried (1977): *Műanyagok az építészetben*. Budapest: Műszaki.

- Into the 3rd Dimension | 3rd MLG Marines create metal parts using a 3D printer (2020). *DVIDS*, 2020. március 17. Online: www.dvidshub.net/image/6144131/into-3rd-dimension-3rd-mlg-marines-create-metal-parts-using-3d-printer
- KOVÁCS Zoltán et al. (2024a): Harctéri 3D-nyomtatók alkalmazási lehetőségei és alapvető technikai követelményei. *Hadtudományi Szemle*, 17(2), 5–15. Online: <https://doi.org/10.32563/hsz.2024.2.1>
- KOVÁCS Zoltán et al. (2024b): Kitöltési mintázatok a 3D-nyomtatásban és azok hatása az alkatrész tulajdonságaira. *Hadmérnök*, 19(2), 29–48. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2024.2.3>
- MOLITCH-HOU, Michael (2020): Metal X 3D Printer Begins Operations at U.S. Military Base. *3DPrint.com*, 2020. február 7. Online: www.3dprint.com/263151/metal-x-3d-printer-begins-operations-at-u-s-military-base
- RADZUAN, Nabilah Afiqah Mohd et al. (2023): Mechanical Analysis of 3D Printed Polyamide Composites under Different Filler Loadings. *Polymers*, 15(8), 1846. Online: <https://doi.org/10.3390/polym15081846>
- RÁKOSI Sára et al. (2023): A 3D-nyomtatás biztonságtechnikai és környezetvédelmi aspektusai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(1), 133–148. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.1.10>
- SZEDERKÉNYI Balázs et al. (2022): Additív gyártástechnológiával készített, folytonos szállal erősített kompozitok szimulációs elemzése. *Gép*, 73(3–4), 82–87. Online: https://www.pt.bme.hu/publikaciok/1535_open_Szederkenyi_et_al_GEP_2022.pdf
- TOLD Roland et al. (2021): Manufacturing a First Upper Molar Dental Forceps Using Continuous Fiber Reinforcement (CFR) Additive Manufacturing Technology with Carbon-Reinforced Polyamide. *Polymers*, 13(16), 2647. Online: <https://doi.org/10.3390/polym13162647>
- TÓTH Csenge – KOVÁCS Norbert Krisztián (2020): Characterization of Short Fiber-Reinforced Polylactic Acid Composites Produced with Fused Filament Fabrication (FFF). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 903, 012031. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012031>
- VÉG Róbert (2023): A 4D nyomtatás és az okosanyagok alkalmazásának lehetőségei. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(4), 77–89. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.4.6>
- VÉG Róbert et al. (2024): Bepattanó kötések helye, szerepe, valamint 3D-nyomtatási technikával történő előállításának lehetősége a haditechnikában. *Hadmérnök*, 19(1), 21–40. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2024.1.2>
- VÉGVÁRI Zsolt (2023): A 3D nyomtatás felhasználási lehetőségei a műveleti logisztikában. *Katonai Logisztika*, 31(1–2), 177–198. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-1-2-177>
- VÉGVÁRI Zsolt (2024): Optikai elemek 3D-nyomtatással történő előállításának lehetőségei. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(2), 115–126. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.2.8>
- VÉGVÁRI Zsolt – HEGEDŰS Ernő – ZENTAY Péter (2022): A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei I. rész. *Haditechnika*, 56(6), 56–60. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.56.6.09>

Halmi Lajos

A pilóták és a légiutas-kísérők fiziológiai monitorozása valós időben

Kihívások és lehetőségek

Az utóbbi évtized technológiai fejlődése új lehetőségeket teremtett a pilóták, a légiutas-kísérők, valamint a fedélzeten szakszolgálati tevékenységet ellátó személyzet fiziológiai kondíciójának valós idejű monitorozására. A hordható szenzorok és biometrikus adatelemző berendezések nem kizárólag a személyzet egészségi állapotának nyomon követésében játszanak fundamentális szerepet, hanem a repülésbiztonság növelésében is jelentős potenciállal rendelkeznek. A tanulmány az időben és térben egyaránt hosszú munkavégzés, a repülőgépen fellépő rendkívüli behatások, valamint az oxigénhiányos környezet emberi szervezetre gyakorolt hatásait vizsgálja. A szerző elemzi az intelligens egészségügyi struktúrák repülőgépek fedélzetén történő alkalmazásának lehetőségeit, továbbá az ehhez kapcsolódó kihívásokat. A korszerű infokommunikációs technológiák által generált fiziológiai adatok integrációja javíthatja a döntéshozatali folyamatokat, és hozzájárulhat a repülésbiztonság növeléséhez.

Kulcsszavak: fiziológiai teljesítmény, hordható szenzor, rendkívüli munkakörülmények, repülésbiztonság, biometria

Bevezetés

Az olyan összetett feladatok és küldetések során, amelyek nagy mennyiségű információ időérzékeny körülmények közötti feldolgozását igénylik – például a repülésben részt vevő személyzet, a légi forgalom irányítása (*air traffic management*, ATM), valamint műszaki munkák esetén – az adott feladatot végrehajtó operátoroknak magas szintű automatizációs támogatás nyújtható a működési teljesítmény javítása érdekében. A dinamikusan adaptálható ember-gép interfészek és interakciók (*human-machine interface*, HMI) potenciálisan képesek modulálni a kognitív terhelést, növelve ezzel a döntéstámogató rendszerek autonómiáját (SULISTYAWATI–WICKENS–CHUI 2011). Ennek tudatában érdemes számításba venni a neurofiziológiai monitorozási rendszerek alkalmazását mint az ember-gép interfész adaptációjának katalizátorát.

A leginkább vizsgálható fiziológiai jellemzők az emberi szervezet egészén a következők: agyi aktivitás (például EEG), szív- és légzőrendszeri működés (például EKG, légzésmonitorozás), a szemmozgás és a pupillaméret változása. Emellett az arckifejezések és a hangminták elemzése is értékes információval szolgálhat a repülésben részt vevők kognitív állapotának becslése érdekében. Minden egyes technológia eltérő szintű és minőségű betekintést enged a humán teljesítmény területére, legyen az fizikai vagy mentális státusz, ezáltal különböző mértékben képes befolyásolni, illetve figyelmeztetni a szakembereket (GARDI et al. 2019).

A külső környezet szempontjából egyaránt releváns a különféle berendezések vizsgálata, hiszen egyes érzékelők érzékenyebbek lehetnek például az elektromágneses interferenciára (*electromagnetic interference*, EMI), míg mások a zajra és a rezgésre reagálnak negatívan. Ezek a tények vezettek oda, hogy jelentős kutatási érdeklődés mutatkozik a különböző neurofiziológiai jellemzők és az érzékelőtechnológiák iránt a repülésipari szektorban, többek között a multimodális monitorozás technológiájára, amely több érzékelő kombinálását jelenti a megbízhatóság növelésére. A repülés és a kutatás ezen területe folyamatosan fejlődik, és a jövőben még pontosabb, a repülést kevésbé befolyásoló monitorozási rendszereket vezetnek be a repülés, a repülésirányítás és más kritikus feladatkörökben dolgozók számára (PONGSAKORNSATHIEN et al. 2022).

A pilóták és a légiutas-kísérők fiziológiai terhelése

Számos egészségügyi tényező és fiziológiai hatás tulajdonítható a repülésnek, amelyek közül némelyek jelentéktelennek mondhatók, míg mások olyan fontosak, hogy különös figyelmet igényelnek a repülésbiztonság érdekében. Adott esetekben a fiziológiai tényezők akár vészhelyzeteket is generálhatnak a repülési feladat során, amelyek veszélybe sodorhatják a feladat biztonságos végrehajtását. Azoknak, akik a repülésben és az ahhoz kapcsolódó feladatokban részt vesznek, ismerniük kell az alábbi kulcsfontosságú, biztonságot befolyásoló tényezőket: hypoxia (oxigénhiány), hiperventiláció (túllégzés), középfül- és arcüreggyulladások, térorientációs zavar, szén-monoxid (CO) -mérgezés, stressz és kimerültség, dehidratáció (vízhiány), hőmérséklet okozta terhelés, valamint sugárzás. A felsorolt egészségügyi tényezők közül néhányat bontok ki részletesen, amelyek a fedélzeti munkahelytől függetlenül azonos szinten érintik a repülésben részt vevő teljes állományt (*Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge* 2023).

Középfül- és arcüregproblémák

A repüléssel együtt járó emelkedések és süllyedések során a testüregekben lévő gázok a külső és a belső légnyomás különbsége következtében tágulnak. Abban az esetben, ha a táguló gáz kiáramlása akadályoztatva van, nyomásnövekedés jön létre az érintett területen, amely erős, sok esetben elviselhetetlen fájdalmat okoz. Ezek a következők lehetnek: fülfájás, arcüregi fájdalom, fogfájás, valamint átmeneti halláscsökkenés.

A középfül, ahol gyakran fellépnek nyomáskülönbség okozta rendellenességek, egy kis üreg a koponyacsontban, amelyet a dobhártya választ el a külső fülcsatornától. A külső és a belső környezet közötti nyomáskülönbséget sok esetben az Eustach-kürt egyenlíti ki – más néven fülkürt –, amely egy cső, és az orrüreget a középfüllel köti össze. Fő funkciója a dobüregben lévő nyomáskiegyenlítés, amely lehetővé teszi, hogy a dobhártya két oldalán a nyomás egyenlő legyen. Ezek a csövek általában zárva vannak, de rágás, ásítás vagy nyelés során nyílnak, ezáltal lehetővé válik a nyomáskülönbség kiegyenlítése (SUMMERFIELD et al. 2018).

Hőstressz

A repülőgép fedélzetén dolgozók számára további fiziológiai kihívást jelent a hőstressz. Az emberi szervezet számára a 15–30 °C érték közötti környezeti hőmérséklet a legkomfortosabb, azonban a pilótafülke egyes repülőgéptípusokon jelentősen meghaladhatja ezt a tartományt. Az 1960-as években pilóták arról számoltak be, hogy forró napokon, a kifutón várakozva, a kabin hőmérséklete közel 60 °C-ig emelkedett, jóllehet a korszerű technikai eszközökön a sokféle légcserélő berendezésnek köszönhetően ez a probléma orvosolható (DORR 2006).

Az izzadságkiválasztás okozta jelenségek tovább ronthatják a helyzetet, mivel növelik a páratartalmat, és üvegházhatás-szerű jelenséget idéznek elő. A legújabb hűtőrendszerek már a páratartalom szabályozásának figyelembevételére is alkalmasak, ezáltal növelve a munkakörnyezet kényelmét. A hőstressz mindamellett nem csupán kényelmetlenséget okoz, a személyzet tagjai nagyobb fáradtságot és csökkent munkateljesítményt tapasztalhatnak szélsőségesen változó hőmérséklet hatására. Ez csökkentheti a teljesítményt, és jelentős biztonsági kockázatot jelent. Bár a technológiai fejlődés csökkentette a hőstressz hatásait, a probléma továbbra is jelen van, és érdemes foglalkozni az ezáltal okozott lehetséges hatások összességével (SHETTY–LAWSON–SHAHNEH 2015).

Sugárzás: természetes és mesterséges forrásokból

A sugárzásnak való kitettség – annak ellenére, hogy nem szembesülünk vele közvetlenül, és nem is érzékeljük – hasonlóképpen ártalmas hatással van az emberi szervezetre. A légkör általában bizonyos szintű védelmet biztosít a Nap és egyéb források, például a kozmikus sugárzás káros behatásaitól, azonban ez a védelem a földfelszínen fejt ki a leghatékonyabb hatást, nem azokban a magasságokban, ahol a repülések zajlanak.

Nagy magasságban lényegében kevesebb légkör védi a legénységet, így a védelem egy része a repülőeszköz struktúrájára hárul, különösen a kabin üvegezése és a sárkányszerkezet rétegei határozzák meg, milyen mértékben képes kiszűrni a sugárzást – ami nem minden esetben kielégítő. Egy tanulmány becslése szerint egy 30 000 láb magasságban 56 percig repülő pilóta ugyanakkora UVA-sugárzásnak van kitéve, mint aki 20 percet tölt szoláriumban (SANLORENZO et al. 2015).

Közismert, hogy a nagy magasságban dolgozók jelentősebb kockázatnak vannak kitéve egyes daganatos betegségekkel szemben, azonban folyamatos egyeztetések folynak arról, hogy ezen megnövekedett kockázat mögött kizárólag a kozmikus sugárzás áll-e. További kérdéseket vet fel, hogy bizonyos esetekben a betegség kialakulásának kockázata növekszik, ugyanakkor a halálozással járó betegség kockázata stagnál (RASLAU et al. 2016). Ez újabb kutatási irányok megnyitásához vezet, azzal a kérdésfelvetéssel, hogy milyen mechanizmuson keresztül idézhet elő klinikai elváltozásokat, ha ilyenek kialakulnak, milyen vizsgálati módszerekkel lehet azokat feltárni, valamint hogy a repülésbiztonsági kockázatok szempontjából milyen mélységű elemzés indokolt a jelenség kapcsán.

Az eszközök tervezésénél a mérnökök teljesen nem képesek kiküszöbölni a kozmikus sugárzásnak való kitettséget a repülési feladatok során, mindazonáltal a nyugdíjkorhatár már magasabb, ami növeli az életpálya során összesített sugárterhelést. Emiatt fontos továbbra is figyelmet fordítani a sugárzás okozta veszélyekre és azok egészségügyi hatásaira, továbbá megoldásokat találni a lehetséges káros hatások enyhítésére (SUMMERFIELD et al. 2018).

A korszerű diagnosztikai eszközök integrációja

A pilóták és a légiutas-kísérők átfogó fiziológiai állapotának nyomon követéséhez olyan komplex, hordozható és feltehetően érintésmentes érzékelőkből álló rendszer



5.1. ábra. A szenzorok lehetséges felhelyezési pontjai az emberi testen

Forrás: a szerző szerkesztése

jelentheti a megoldást, amelyet részben a repülőgép rendszereibe lehet integrálni, részben pedig közvetlenül a repülőszemélyzet számára kell kialakítani. Az érzékelők adatait és információit a dinamikus repülési környezet szélsőséges feltételei mellett is validálni kell, amit olyan többretegű rendszer részeként kell megvalósítani, amely a repülőgép és az életfenntartó rendszerek teljesítményét szimultán figyeli.

Az eszközöknek működniük kell a légnyomás-ingadozások, a G-erők, a rezgések, a hőmérséklet- és páratartalom-változások, az egyéb rendkívüli hatások, valamint a személyzet többretegű felszerelése alatt is. A fiziológiai reakciók bizonyos specifikus stresszorokra laboratóriumi körülmények között – például barokamrában vagy centrifugában – jól vizsgálhatók, ugyanakkor a repülés során jelentkező környezeti, fizikai és pszichológiai hatások teljes spektruma ilyen kontrollált környezetben nem állítható elő.

A legrelevánsabb mérési paraméterek közé tartozik a véroxigénszint, a szöveti oxigenizáció, a hemoglobin, a hemodinamika (véráramlás), a kardiorespiratorikus funkció (az oxigénszállító képesség a vázizomzatba tartós fizikai aktivitás során), az autonóm idegrendszeri aktivitás és az elektrofiziológiai válaszok. Ezek és további fiziológiai mutatók vizsgálatának kombinálásával válunk képessé pontosabban meghatározni a pilóták, a légiutas-kísérők, illetve egyéb szakszolgálati személyek kognitív és funkcionális állapotát. Az 5.1. ábra bemutatja a szenzorok lehetséges felhelyezési pontjait az emberi testen, amelyek optimális elhelyezése kulcsfontosságú a pontos mérések biztosításához.

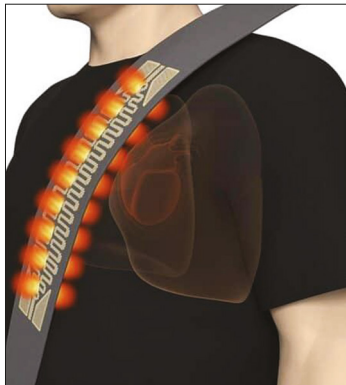
A légi közlekedésben alkalmazható legígéretesebb hordozható érzékelők közé tartozik a pulzoximetria (a vér oxigénszintje mellett a pulzust is méri), a funkcionális közeli infravörös spektroszkópia (*functional near-infrared spectroscopy*, fNIRS – az agyi aktivitást vizsgálja), a légzési gázcseré monitorozása, az elektrokardiogram (EKG) és az elektroencefalogram (EEG). Történtek már szenzoros megfigyelések repülési körülmények között – például az fNIRS segítségével, amellyel egy esetben igazolták az agyi szöveti oxigenizáció csökkenését komplex légi manőverek során (KOBAYASHI–TONG–KIKUKAWA 2002).

Ezek az eszközök azonban alkalmanként hibás adatokat generálnak, ennek eredményeképpen további vizsgálatuk és a mérések lehetséges átgondolása finomhangolhatja a kutatások eredményeit. További kutatások szükségesek annak meghatározásához is, hogy pontosan mely szenzorok kombinációjából állhat össze az optimális, többmódusú fiziológiai monitorozó rendszer, amely minimalizálja a külső zavaró hatásokat, maximalizálja a viselési komfortot, nem akadályozza a vészhelyzeti vagy más eljárások végrehajtását, és a lehető legtöbb releváns adatot biztosítja (SHAW–HARRELL 2023).

A viszonylag újnak számító érintésmentes fiziológiai monitorozórendszerek szintén integrálhatók a katonai és a civil repülésbe, azonban ezek pontossága elmaradhat a hordozható érzékelőkéitől, és speciálisabb felhasználási területtel rendelkeznek. Valószínűsíthető, hogy ezek a berendezések inkább kiegészítik a hordozható érzékelők által gyűjtött adatokat, mintsem helyettesítik azokat. Mivel egyes hordozható érzékelők diszkomfortosak lehetnek a repülőszemélyzet számára, nagy igény várható olyan passzív és diszkrét rendszerekre, amelyek képesek detektálni a személyzet fiziológiájában bekövetkező finom változásokat.

Az érintésmentes rendszerek jellemzően a kardiopulmonális (a szív és a tüdő együttes működése) és a légzési válaszokra koncentrálnak, különösen az öt alapvető életfunkcióra: pulzus, légzési gyakoriság, testhőmérséklet, vérnyomás és oxigénszaturáció (LEONHARDT–LEICHT–TEICHMANN 2018). Emellett egyre gyakrabban integrálnak a meglévő egységekbe videóalapú elemzést (például fej- és testmozgás, arckifejezés), hangvizsgálatot, okulometriát (szemmozgás-nyomonkövetés), ballisztokardiográfiát (a szívverés által előidézett apró mozgások) és hőmérsékleti képelemzést.

Többek között a személyzet megjelenésében és bőrszínében bekövetkező apró változások alapján következtetni lehet a vérkeringésre, a tekintet és a pislogás gyakoriságából pedig a terhelés és a fáradtság mértékére. Az érintésmentes rendszerek integrációjának mértéke függhet a repülőgép kialakításától, a repülési feladat természetétől, valamint a repülésben részt vevők ruházatától és felszerelésétől. Az életfunkciók mérésének pontossága egyénenként is eltérő lehet: szakállal,



5.2. ábra. Övbe épített érintésmentes szenzor

Forrás: a szerző szerkesztése

különböző bőrszínnel vagy fejtakaróval rendelkező személyzetek esetén egyéni kalibrálásra lehet szükség, mivel az általánosított struktúrák nem minden esetben biztosítanak stabil kompatibilitást.

Ezen túlmenően az érintésmentes módszerek sok esetben megnövekedett adatfeldolgozási kapacitást igényelnek, ami növelheti az elemzés idejét – különösen olyan esetekben, amikor a változások minimálisak, és a jel-zaj arány javítása érdekében erősítésre is szükség van (SHAW–HARRELL 2023).

Példa az érintésmentes rendszerekre egy nemrég fejlesztett bioszenzor, amelyet repülőgépek üléseinek biztonsági övébe integráltak, és képes érintés nélkül mérni a légzést és a szívverést. Ez az egység vezetékek vagy közvetlen bőrfelület érintése nélkül, rádióhullámok segítségével érzékeli a kardiopulmonális jeleket. Ezenfelül a repülőgép kabinjának szimulált környezetében is stabil működést figyeltek meg a berendezésen. Ez a technológia különösen hasznos a pilóták, a légiutas-kísérők vagy az utasok egészségügyi állapotának és éberségének folyamatos monitorozására (JAMWAL 2024). Az 5.2. ábra az övbe épített érintésmentes szenzor felépítését mutatja be.

Bioszenzorok alkalmazása a katonai műveletekben

Az aktuális földi támogatóegységek lehetővé teszik összetett tervezési tevékenységek végrehajtását valamennyi bevetés előtt, az egyes repülőeszközöktől

a kötelékig akár kiterjedt földrajzi területeket lefedve. Ennek eredményeként valószínűsíthető, hogy a jövőbeni repülőgéprendszerekben – és általában a jövő védelmi rendszereiben – a földi támogató rendszerek figyelembe veszik az emberi tényezőt, azon belül is az egészségi és stresszszintet az egyén szintjén. Ez lehetővé teszi a fedélzeten dolgozók aktuális kondíciójának értékelését és validálását pszichofizikai állapotuk alapján.

A biometrikus szenzorok képezhetik ennek az előremutató területnek az alapját, jöllehet ezeket szükséges kiegészíteni olyan szintű földi támogatási réteggel, amely a bevetésen részt vevő személyzet egészségügyi adatainak gyűjtését és értelmezését szolgálja ki. Ez a szint jelentheti azt a hiányzó láncszemet, amely lehetővé teszi a földi támogatóstruktúrák számára, hogy az összes olyan tényezőt figyelembe vegyék a bevetés megtervezése során, amely hozzájárul a katonai tevékenység sikeréhez. Ezek a következők: a repülőszemélyzet testéről származó bioszenzor-adatok, a katonai járművek szenzorainak információi, valamint az egészségügyi és az általános stresszre vonatkozó adatok.

Mindezen információk és a berendezések által képzett rendszer segítségével képessé válunk észlelni, amikor egy pilóta vagy földi kezelő a veszélyes szintű túlterhelés, stressz, kimerültség, fizikai vagy mentális kimerülés, illetve alvás-megvonás állapotába kerül, így lehetőség nyílik a parancsnokoknak korrekciós lépéseket tenni, lehetővé téve ezzel a korai beavatkozást. A bioszenzor fedélzeti integrációja a repülő- és egyéb rendszerekben főleg taktikai (egyéni harci eszköz) és operatív (magasabb szervezeti egység) szinten jelentős, míg stratégiai szinten a hangsúly az információs és a felhőrendszerekből származó adatok kezelésén van. A légi alkalmazások esetében kritikus szempont a költség, a méret, a tömeg és az energiafogyasztás, különösen katonai repülőgépek esetén.

A bioszenzor-hálózatok új koncepcióként jelentek meg a tudományban: hordozható és implantálható érzékelőkből álló hálózati struktúrák, amelyek képesek biológiai, pszichológiai és kémiai információkat mérni, digitális adatokká alakítani – és ami fundamentális, valós idejű visszajelzést nyújtani a katonák egészségi állapotáról és teljesítményéről. Ezek a hálózatok folyamatos monitorozást tesznek lehetővé a fedélzeti és egyéb rendszerekben, elősegítve a katona vészhelyzetének korai felismerését és egészségvédelmét.

Egy példa az intelligens sisakoké, amelyek valós időben képesek EEG-jeleket mérni, ezzel a pilóták kimerültségének felismerésében segíthetnek. A 2010-es évek közepétől láthatunk példákat ezekre a technológiákra, amelyek hordozható bioszenzor beépítését teszik lehetővé a pilótasisakba, valós időben jelentve az oxigénszintet, a véráramlást és a pulzust. A rendszer riaszt, ha a pilótát az

eszméletvesztés veszélye fenyegeti, akár nagy G-erő-hatású manőverek során, továbbá hypoxia vagy egyéb egészségügyi krízis jeleinél a sisak kijelzőjén és a repülőgép fedélzeti műszerein figyelmeztetés jelenik meg.

Ha a repülőgép-vezető nem reagál, vagy eszméletét veszti, a fedélzeti számítógép átvesszi az irányítást, és robotpilóta-üzemmódba kapcsol. Ez a technológia különösen fontos a korszerű és számítógép-alapú manőverezőrendszerek korában, ahol a pilótának nem mindig van ideje reagálni. A bioszenzor-hálózatok nemcsak konvencionális platformokhoz, hanem parancsnoki-irányítási hálózatokhoz is csatlakoztathatók – légi és tengeri műveletek esetében internetes felhőalapú kommunikációval, szárazföldi hadműveletek esetében pedig további vezeték nélküli rendszerek kapcsolatával. Ezeknek a rendszereknek teherbírónak, széles körben alkalmazhatónak, hibatűrőnek és költséghatékonynak kell lenniük (ALBERTONI–SORVILLO 2024).

Összegzés

A tanulmány központi kérdése, hogy a korszerű neurofiziológiai és biometrikus eszközök hogyan alkalmazhatók a pilóták, a légiutas-kísérők és a fedélzeti szakszolgálati személyzet valós idejű fiziológiai állapotának monitorozására a repülésbiztonság javítása érdekében. Rávilágítottam, hogy a fejlett hordozható és érintésmentes szenzorok – például EEG, EKG, pulzoximetria, infravörös spektroszkópia – milyen információkat képesek szolgáltatni a humán teljesítményről és kognitív állapotról. Választ kaptunk arra is, hogy az ember-gép interfészek (HMI) dinamikus adaptációja és a multimodális megfigyelés növelheti a döntéshozatali folyamatok megbízhatóságát.

Látható volt, hogy a repülés közben fellépő jelentős fiziológiai kihívások – a hypoxia, a hiperventiláció, a középfül- és arcüregproblémák, a stressz, a kimerültség, a hőstressz és a sugárzás hatásai – mind fontos tényezők, amelyek ronthatják a személyzet teljesítményét. E tényezők korai detektálása alapvető a repülésbiztonság fenntartása szempontjából, hiszen a megelőző intézkedések lehetővé teszik a személyzet aktuális kognitív és fizikai állapotának optimalizálását.

A kutatás kiemelte a korszerű diagnosztikai eszközök integrációjának technikai és gyakorlati kihívásait. A repülési környezet extrém paraméterei – mint a G-erők, a rezgések, a hőmérséklet-ingadozások és az elektromágneses interferencia – jelentős hatással lehetnek a szenzorok megbízhatóságára, éppen ezért az ideális monitorozórendszernek egyszerre kell pontosnak, diszkrétnek és kényelmesnek

lennie, miközben nem akadályozza a repülési tevékenységet. Ezen célok elérése érdekében további kutatások szükségesek a szenzorok és az adatfeldolgozó algoritmusok optimalizálásában.

A katonai alkalmazások szempontjából a bioszenzor-hálózatok fejlesztésére külön figyelmet kell fordítani, például az intelligens sisakok vizsgálatával, amelyekben a beépített szenzorok lehetőséget kínálnak a pilóták állapotának valós idejű követésére és az automatikus beavatkozásra vészhelyzetek esetén. Ezek a technológiák nemcsak a személyzet egyéni védelmét szolgálják, hanem hozzájárulnak a missziók sikerességéhez és a parancsnoki döntéshozatali folyamatok megalapozásához is.

Összegezve: a tanulmány rámutat arra, hogy a fiziológiai és neurofiziológiai állapot valós idejű követése elengedhetetlen elemévé válik a jövő repülési rendszereinek – mind a polgári, mind a katonai alkalmazások területén. A folyamatos technológiai fejlődés révén egyre pontosabb és szélesebb körben alkalmazható rendszerek jelennek meg, amelyek hozzájárulnak a repülésbiztonság további növeléséhez, miközben csökkentik a humán tényezők által okozott kockázatokat.

REAL-TIME PHYSIOLOGICAL MONITORING OF PILOTS AND CABIN CREW: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Recent technological advancements have created new opportunities for real-time monitoring of the physiological condition of pilots, cabin crew, and other personnel performing operational duties on board aircraft. Wearable sensors and biometric data analysis devices play a fundamental role not only in tracking crew health status but also possess significant potential for enhancing flight safety. This study examines the effects of prolonged duty periods in both temporal and spatial dimensions, extraordinary in-flight stressors, and hypoxic environments on the human body. The potential applications of intelligent health monitoring systems on board aircraft are analyzed, along with the associated challenges. The integration of physiological data generated by modern infocommunications technologies can improve decision-making processes and contribute to enhanced flight safety.

Keywords: *physiological performance, wearable sensors, extraordinary working conditions, flight safety, biometrics*

Felhasznált irodalom

- ALBERTONI, Alessandro – SORVILLO, Riccardo (2024): Sensors and Cognitive Support for Pilot Health and Performance Assessment. In *2024 IEEE International Humanitarian Technologies Conference (IHTC)*. Bari: IEEE, 1–5. Online: <https://doi.org/10.1109/IHTC61819.2024.10855007>
- DORR, Robert F. (2006): *Air Combat. An Oral History of Fighter Pilots*. New York: Berkley Books.
- JAMWAL, Tanya (2024): Contactless Biosensor For Instant Physiological Monitoring. *Electronics For You*, 2024. november 18. Online: <https://www.electronicsforu.com/news/contactless-bio-sensor-for-instant-physiological-monitoring>
- KOBAYASHI, A. – TONG, Andrew – KIKUKAWA, Azusa (2002): Pilot Cerebral Oxygen Status During Air-to-Air Combat Maneuvering. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 73(9), 919–924.
- LEONHARDT, Steffen – LEICHT, Lennart – TEICHMANN, Daniel (2018): Unobtrusive Vital Sign Monitoring in Automotive Environments—A Review. *Sensors*, 18(19), 3080. Online: <https://doi.org/10.3390/s18093080>
- Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge* (2023). U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- PONGSAKORNSATHIEN, Nichakorn et al. (2019): Sensor Networks for Aerospace Human-Machine Systems. *Sensors*, 19(16), 3465. Online: <https://doi.org/10.3390/s19163465>
- PONGSAKORNSATHIEN, Nichakorn et al. (2022): Wearable Cardiorespiratory Sensors for Aerospace Applications. *Sensors*, 22(13), 4673. Online: <https://doi.org/10.3390/s22134673>
- RASLAU, David et al. (2016): Prostate Cancer in Pilots. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 87(6), 565–570. Online: <https://doi.org/10.3357/AMHP.4453.2016>
- SANLORENZO, Martina et al. (2015): The Risk of Melanoma in Airline Pilots and Cabin Crew. *JAMA Dermatology*, 151(1), 51–58. Online: <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2014.1077>
- SHAW, David M. – HARRELL, John W. (2023): Integrating Physiological Monitoring Systems in Military Aviation: A Brief Narrative Review of Its Importance, Opportunities, and Risks. *Ergonomics*, 66(12), 2242–2254. Online: <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2194592>
- SHETTY, Janardhana – LAWSON, Craig P. – SHAHNEH, Amir Z. (2015): Simulation for Temperature Control of a Military Aircraft Cockpit to Avoid Pilot's Thermal Stress. *CEAS Aeronautical Journal*, 6, 319–333. Online: <https://doi.org/10.1007/s13272-015-0149-0>
- SULISTYAWATI, Ketut – WICKENS, Christopher D. – CHUI, Yoon Ping (2011): Prediction in Situation Awareness: Confidence Bias and Underlying Cognitive Abilities. *The International Journal of Aviation Psychology*, 21(2), 153–174. Online: <https://doi.org/10.1080/10508414.2011.556492>
- SUMMERFIELD, Douglas et al. (2018): Physiologic Challenges to Pilots of Modern High Performance Aircraft. In KUŞHAN, Melih Cemal (szerk.): *Aircraft Technology*. London: IntechOpen, 43–73. Online: <https://doi.org/10.5772/intechopen.75982>

Huszár Zsolt – Majorosné Lublói Éva Eszter –
Kátai-Urbán Lajos

Az építőipari segédstruktúrák által okozott súlyos balesetek alapeseményeinek és megelőzési lehetőségeinek vizsgálata

Az építőipar világszerte az egyik legveszélyesebb iparág, amelyben a dolgozókat mindennap súlyos baleseti kockázatok fenyegetik. Ez az ágazat a különböző munkafolyamatok és a veszélyes környezet miatt különösen hajlamos a munkahelyi balesetekre. Az építőipari balesetek egyik leggyakoribb esete az ideiglenes struktúrák területén bekövetkezett szerkezeti baleseteké és a jelentős tüzeseteké. Ezek közé tartozik többek között a homlokzati és a teherhordó állványzatok, valamint a betonszerkezetekhez alkalmazott zsaluzati rendszerek összeomlása. Az ideiglenes struktúrák építése, teher alatti használata, valamint az elbontásuk során bekövetkező balesetek elkerülésére dokumentálható megelőzési tervet készíthetünk, amelyhez a lehetséges balesetek okainak feltárását tartalmazó átfogó vizsgálat szükséges. Ennek első három lépése a struktúrák műszaki kialakításának ismertetése, alkalmazási technikájuk elemzése, valamint a leggyakoribb építési és bontási hibák, emberi mulasztások vizsgálata. A tanulmány célja, hogy bemutassa, és vizsgálatokkal igazolja, hogy lehet új módszertant kidolgozni, amellyel ezek a súlyos, akár katasztrofális hatással is járó balesetek elkerülhetők.

Kulcsszavak: építőipar, zsaluzat, homlokzati állvány, baleset, megelőzés, munkavédelem

Bevezetés

A munkabalesetet az 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről úgy határozza meg mint az a baleset, amely a munkavállalót a szervezett munkavégzés során vagy azzal összefüggésben éri, annak helyétől, időpontjától és a sérült munkavállaló közrehatásának mértékétől függetlenül. A munkavégzéssel összefüggésben következik be a baleset, ha a munkavállalót a foglalkozás körében végzett munkához kapcsolódó közlekedés, anyagvételezés, anyagmozgatás, tisztálkodás, szervezett üzemi étkeztetés, foglalkozás-egészségügyi szolgáltatás és a munkáltató által nyújtott egyéb szolgáltatás igénybevétele során éri.

A munkahelyi balesetek a munkavégzés során bekövetkező, nem kívánt események, amelyek sérülést, egészségkárosodást vagy halált okozhatnak. Ezek a balesetek nemcsak az érintett munkavállalókra és családjaikra vannak hatással,

hanem jelentős gazdasági és társadalmi következményekkel is járnak. A biztonságos munkakörnyezet kialakítása és a megfelelő kockázatértékelési, valamint baleset-megelőzési intézkedések alkalmazása elengedhetetlen a munkahelyi balesetek számának csökkentése érdekében.

A munkabalesetek alakulása fontos indikátora egy ország munkavédelmi helyzetének és munkahelyi biztonságának (BUJNÓCZKI 2017). Magyarországon az elmúlt évtizedben folyamatosan változó gazdasági, technológiai és jogszabályi környezetben kellett a vállalatoknak és a munkavállalóknak alkalmazkodniuk a biztonsági előírásokhoz. A statisztikai adatok elemzése alapján megfigyelhető, hogy bár a munkavédelmi intézkedések fejlődtek, a munkabalesetek száma továbbra is jelentős kihívást jelent.

Építőipari balesetek

Az Országos Munkavédelmi és Munkaügyi Főfelügyelőség (OMMF), valamint a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) adatai szerint az elmúlt tíz évben a munkabalesetek száma Magyarországon ingadozó tendenciát mutatott. 2013 és 2019 között a munkabalesetek száma folyamatos növekedést mutatott, ami részben a munkaerőpiac bővülésével és az ipari termelés növekedésével magyarázható. 2020-ban a Covid-19-járvány hatására csökkent a bejelentett munkabalesetek száma, ami a gazdasági leállásokkal és az otthoni munkavégzés elterjedésével állt összefüggésben. 2021-től ismét növekedés volt tapasztalható, főként az építőipar és a feldolgozóipar területén.

A halálos kimenetelű munkabalesetek száma évről évre ingadozott, azonban a tendencia azt mutatja, hogy az ipari és építőipari munkaterületeken kiemelten magas a halálesetek aránya. A legsúlyosabb évek közé tartozott 2018 és 2019, amikor a halálos munkabalesetek száma meghaladta a 80 főt évente. 2020-ban a járvány miatt csökkent a halálos balesetek száma, azonban 2021-ben és 2022-ben ismét emelkedő tendencia volt megfigyelhető.

A munkabalesetek megoszlása ágazatonként eltérő, az adatok alapján az alábbi szektorokban fordul elő a legtöbb munkabaleset. Az építőiparban a magasból leesések, az építési területeken előforduló balesetek, például az anyagmozgatás és a földmunkák során történők gyakoriak. A feldolgozóiparban a gépi berendezésekkel kapcsolatos balesetek, a vágások, a törések és az égési sérülések jellemzők. A mezőgazdaságban gépkezelési hibák, állatokkal kapcsolatos balesetek fordulnak elő, míg a közlekedési és logisztikai szektorban a gépjárművezetők balesetei és a rakodás közbeni sérülések a jellemzők.



6.1. ábra. A KSH közlése szerinti halálos munkabalesetek száma nemzetgazdasági ágak szerint

Forrás: 4.1.1.45. A munkabalesetek száma nemzetgazdasági ágak szerint [é. n.]

A Központi Statisztikai Hivatal adatait tekintve (6.1. ábra) a halálos munkabalesetek ágazati megoszlásánál szintén első helyen szerepel az építőipar.

Az építőipar világszerte az egyik legveszélyesebb iparág, amelyben a dolgozókat mindennap súlyos baleseti kockázatok fenyegetik. Ez az ágazat különböző munkafolyamatok és veszélyes környezetek miatt különösen hajlamos a munkahelyi balesetekre (SZERÉNYI 2017).

Az építőipari balesetek többféle formát ölthetnek. A leggyakoribb típusok a következők:

- leesés a magasból;
- segéd- és ideiglenes szerkezetek összeomlása;
- árkok és munkagödrök beomlása;
- munkaeszközök és gépek okozta balesetek;
- tárgyak leesése;
- elektromos balesetek;
- a fizikai megterhelésből eredő balesetek.

Az építőipari balesetek közül kiemelkedően magas arányban fordulnak elő magasból való lezuhanások, amelyek nem csupán súlyos sérülésekhez vezetnek, hanem gyakran halálos kimenetelűek. Az ilyen típusú balesetek gyakran kapcsolódnak

állványzathoz, létrákhoz, tetőszerkezetekhez, illetve nem megfelelően biztosított munkaállványokhoz. A veszély különösen magas azokban az esetekben, amikor a munkavégzés több méter magasságban történik, és a munkavállalók nincsenek megfelelően kiképezve vagy felszerelve az esések elleni védekezésre.

A magasból való lezuhanás nemcsak egyéni tragédia, hanem súlyos gazdasági és társadalmi következményekkel is jár. A sérült munkavállaló hosszú távon ki-eshet a munkaerőpiacról, rehabilitációs ellátásra szorulhat, miközben a munkáltató számára nagy anyagi terhet jelenthet a baleset következményeinek kezelése.

Az építőipari segédszerkezetek, különösen a zsaluzatok és a teherhordó nehézállványok baleseti forrásai és azok megelőzésének lehetőségei

A segédszerkezetek összeomlásának leggyakoribb esetei a vasbeton szerkezetek építésénél használatos zsaluzati rendszerek katasztrófái. A zsaluzatokkal kapcsolatos baleseteket általában két nagy csoportra lehet osztani: vízszintes szerkezetek összeomlása és függőleges zsaluszerkezetek tönkremenetele, szétszakadása.

Vízszintes zsaluzatok

Vízszintes zsaluzatok alatt általában a födém- és konzoloslemez-zsalukat, a gerendazsalukat, valamint a lépcső zsaluzatát értjük. A födémzsaluzatok közül Magyarországon a legelterjedtebb zsaluzati rendszer a fatartós födémrendszer. Szerkezete egyszerű, fő- és fióktartós rendszeren alapul, ahol a végső teherátadás az acéltámaszokon keresztül történik az alsó födémre.

Általában a fő- és fióktartók azonos keresztmetszetű ragasztott fatartók, I profilú kialakítással. A főtartókra általában a nyírástönkremenetel, míg a fióktartókra a hajlítástönkremenetel a jellemző túlterhelés esetén. A zsaluzat beton felőli felületét a háromrétegű ragasztott fenyő zsalutáblák alkotják, azonban gyakori a fenolbevonatos rétegelt lemez használata is. Miután a fatartók egymáshoz való illesztése, kapcsolata nem fix kötésű, csak fektetett, illetve átlapolt kialakítású, ezért nagyon jól követhető vele a változatos geometriájú alaprajzú szerkezetek zsaluzása. Természetesen használatos az alumíniumkeretes födémzsalurendszer is, valamint annak ejtőfejes változata, azonban keretrendszere miatt kötöttebbek a geometriai lehetőségei.

Függőleges zsaluzatok

A függőleges zsaluzatok csoportjába a fal- és pillérzsaluzatok tartoznak. A falzsaluzatok a korszerű zsaluzati rendszerben gondolkodva két fő csoportra oszthatók szerkezetük alapján: fatartós rendszerű nagy táblás zsaluzatok és keretes zsalurendszerek.

A fatartós nagy táblás falzsaluzatok szerkezeti elvüket tekintve inkább a múltat idézik modern köntösben. Ez azt jelenti, hogy a klasszikus faltartók helyett modern, ragasztott I szelvényű fatartók veszik fel a terhet, és adják át a korszerű dupla U profilú keresztartókra. Héjazata ragasztott rétegeltlemez-tábla, fenolbevonattal, azonban szabad éllelkel.

A keretes zsalurendszerek jellemzően acél tartókeretbe foglalt rétegeltlemez-zsaluhéjjal rendelkeznek. Ezek a legkülönbözőbb táblaszélességektől, általában 10–15 cm-es raszterugrásokban, szintmagas (270–300–330 cm), illetve fél elem magasságú (120–150 cm) elemekig, gyorsrögzítő kapcsokkal illeszthető rendszerek. Daruval, illetve kézi erővel (szintmagas táblák esetében ezek alumíniumkeretesek) mozgatható szerkezetek.

A földémszaluzatok összeomlása

A legtöbb földémbaleset a szerkezet betonozásakor következik be. Az egyik ok a már többször említett vízszintes terhek nem megfelelő felvétele. Ilyenkor az ékelés vagy az andráskeresztek hiányában a zsaluzat vízszintesen, oldalirányba kimozdul, és összeomlik. A másik oka a hirtelen túlterhelés lehet, amely sűrű konzisztenciájú beton esetén előfordulhat, ha valamilyen oknál fogva a betonszivattyú nincs folyamatos mozgásban, és egy helyre akár fél vagy egy köbméter betont is kinyomhat, ami 3–4-szeres túlterhelést okozhat a földémnek.

Ilyen esetekben leggyakrabban a fatartók teherbírása merül ki, és egyszerűen eltörrik, magával húzva a zsalutáblákat a betonacéllal és a betonnal együtt. Hasonló baleset történhet, ha nem a statikai tervek alapján történik a zsaluzat helyszíni szerelése, a tartók kiosztása, túlterhelés jön létre, és leszakad a földém (HUSZÁR – MAJOROSNÉ LUBLÓY 2022).

Gyakori eset a konzolos erkélylemezek leszakadása a zsaluzat vízszintes kihorgonyzásának hiánya miatt. Konzolok esetében a zsaluzatot nem lehet a síkban két irányban kiékelni, csak andráskeresztekkel vagy földszint feletti lemez esetén ferde kitámasztásokkal lehet a szerkezetet stabilizálni. Sokszor a kivitelező

azt feltételezi, hogy a konzol negatív nyomatékú vasai, amelyek vissza vannak kötve a födémbe, a zsaluzat vízszintes terheit felvevő horgonyként működhetnek. A betonacél-szerelést szigorúan tilos az építés alatt bármilyenű terhek felvételére használni.

Különösen veszélyesek azok a konzolos megoldások, ahol hőhid-megszakító elemek vannak beépítve a lemez és a födém közé. Itt ugyanis minimális a konzolba, illetve a lemezbe benyúló toldás nélküli vashossz, vagyis azok a betonozás előtt és alatt semmiképp nem tudnak horgonyként működni.

A kétoldali falzsaluzat szétszakadása

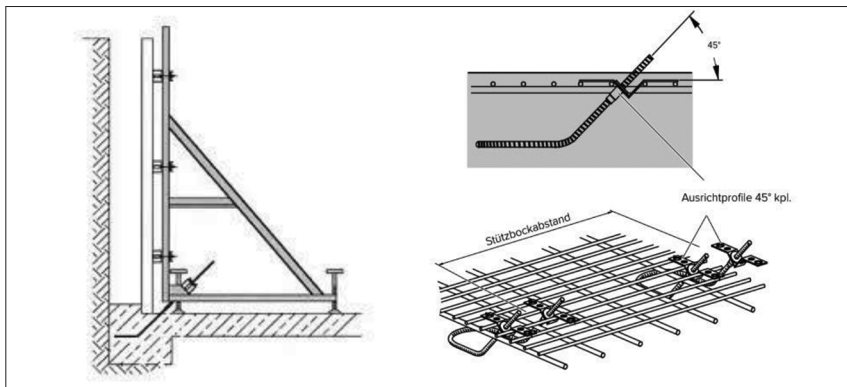
A korszerű keretes falzsalut összekötő elemek, az úgynevezett gyorskapcsok feladata összekapcsolni a táblákat, és biztosítani a zsaluzat síktartását. Robusztus, erős kapcsok ezek, azonban tévhit, hogy a beton nyomásának felvételére is alkalmasak lennének, mivel ezeknek a kapcsoknak a teherbírása nem több mint 8,00 kN. Az acélkereten keresztül áthatott betonnyomást, amely elérheti a 90kN/m² is, az átkötési csavarszárnak, vagyis a menetbordás betonacéloknak kell felvennie.

Amennyiben ezek a csavarszárok nincsenek minden táblacsatlakozásnál befűzve, akkor a betonnyomást a kapcsoknak kellene felvennie, amire nincsenek méretezve. Ilyen esetekben bizonyos betonmagasság felett a kapcsok eltörnek, szétszakadnak, és a zsaluzat kinyílik. Azontúl, hogy a készülő vasbeton szerkezet tönkremegy, a nagy nyomással kiömlő beton elsodorja az ott tartózkodókat. Amennyiben ez több emelet magasban lévő függeszto állványon van, akkor a beton mindent letaszít a mélybe.

Az egyoldalú falzsaluzat káresetei

Az egyoldalú falzsaluzatok jellemző kialakítása, amikor a készülő vasbeton fal-szerkezet egyik oldalán már meglévő szerkezet van, például résfal vagy cölöpfal. Ilyenkor az építendő falnak csak az egyik oldalát zsaluzzuk be. A kétoldalú falzsalunál a betonnyomást az egymással szemben lévő zsalutáblák közti menetbordás betonacél veszi fel, azonban ez a módszer az egyoldalú zsaluk esetén nem alkalmazható.

Ilyen esetekben a zsaluzatot nagy teherbírású támasztó bakokkal kell gyámolítani, amelyek a betonnyomást az alaplemezbe bebetonozott horgonyokon



6.2. ábra. Az egyoldalú falzsalu kitámasztása, horgonyzása

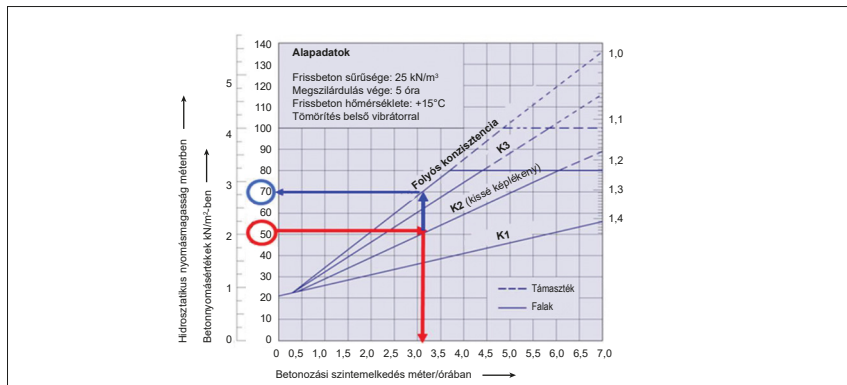
Forrás: Safescreen [é. n.]

keresztül tudják felvenni. Gyakori baleseti forrás, amikor az előre bebetonozandó menetbordás betonacél horgonyokat rossz magasságra kötik be az alaplemez vasalásába a betonozása előtt. Amennyiben a felső hálózathoz betonozzák be, akkor a fellépő 80–100 kN-os erők hatására az alaplemez felső öve felszakad, és a robusztus bakokkal együtt szétszakad a zsaluzat.

Másik jellemző hibaforrás, amikor nem használják az alaplemezbe elhelyezendő horgonyokat (6.2. ábra), hanem csak hagyományos ferde támasszal próbálják felvenni a betonnyomást (SZERÉNYI–BÁRSONY 2020). Ilyen esetekben a beton nyomásából kialakuló rúdírányú erő függőleges komponense miatt a zsaluzat felemelkedik, és alul nagy nyomással kiömlik a beton. A leggyakoribb sérülés ilyenkor a dolgozók lábtörése.

A statikai vizsgálatok figyelembevétele

A földemzsaluzatok esetén általában a balesetek nem a tervezett betonnyomás hirtelen megnövekedésétől következnek be. A földem betonozásakor a folyós beton területe miatt a zsaluzatot nem igazán lehet túlterhelni, még figyelmen kívül hagyható vagy hibás betonpumpa esetén sem. Ez azt jelenti, hogy egy átlagos 20–25 cm vastag földemlemez esetén ez a hirtelen bekövetkező lemezvastagság maximum másfél-kétszerese lehet a tervezettnél. Figyelembe véve a beton átlagos 2300 kg/m³-es testsűrűségét ez a többletterhelés maximum 450–500 kg/m² zsalu



6.3. ábra. A betonnyomás alakulása a hidrosztatikus nyomásmagasság függvényében

Forrás: Safescreen [é. n.]

extra terhet jelent a zsaluzatra. Ez a biztonsági tényezők figyelembevételével nem jelent túl nagy kockázatot.

Ezzel ellentétben a falzsaluzatoknál súlyos veszélyt jelent a nem tervezett betonnyomás. Az átlagos korszerű keretes falzsaluzat teherbírása 60 kN/m². Ez vibrált beton esetén a beton hidrosztatikai nyomását figyelembe véve azt jelenti, hogy a betonozási sebesség korlátozása nélkül két – két és fél méter magas zsaluzatot lehet bebetonozni biztonsággal. Ennél magasabb vasbeton falak építése esetén alkalmazni kell a betonozási sebesség korlátozását. Ezt szemlélteti a 6.3. ábra.

Elemzés

A fentiek alapján elmondható, hogy a zsalubalesetek nagy része emberi mulasztás miatt következik be, ami megelőzhető lenne. A zsaluzatok összeszerelésénél a legnagyobb probléma a művezetés hiánya, illetve a végeredmény szakszerűtlen ellenőrzése. Korábban, a 60–70-es években is történtek balesetek, azonban akkoriban inkább a gyenge emelőszerkezetek és a munkavédelem hiánya okozta ezeket (HUSZÁR – MAJOROSNÉ LUBLÓY – KÁTAI 2024).

A mai korszerű építéstechnika ellenére a szakértelem hiánya okozza a legtöbb balesetet. Míg korábban a zsaluzási munkát ácsbrigádok végezték szakképzett munkavezetőkkel, addig ma a LEGO-jellegű elemes rendszerek összerakását már betanított munkások végzik, sokszor hiányos műszaki ismeretekkel. Nem

tudják felmérni a baleset veszélyét, mert nincsenek tisztában a beton nyomásával, súlyával, nem ismerik a zsaluszerkezetek teherbírását, statikai terhelhetőségüket. Nagyobb műszaki fegyelemmel a balesetek elkerülhetők lennének.

A szakaszbiztonsági modell

A balesetek elkerülésének módszerére a következő szakaszbiztonsági modellt dolgoztuk ki. A szakaszbiztonsági modell öt lépésből álló, szakaszalapú megelőző módszertan, amely a zsaluzási munkák minden fázisát külön kockázati egységként kezeli. A modell célja, hogy a leggyakoribb összeomlási okokat a kivitelezés logikájába beépítve semlegesítse, nem utólagos ellenőrzéssel, hanem előzetes biztonsági tervezéssel.

A modell első eleme a stabilitási előfeltételezés, vagyis az alapszintű biztosítás. Minden zsaluzási munka kizárólag akkor kezdhető meg, ha az alátámasztást biztosító felület geotechnikailag és statikailag igazoltan teherbíró. Alapelve, hogy semmilyen zsaluzati elem nem építhető „később biztosítjuk” alapon.

A második elem a szakaszolt szerelési-teherbírási összerendelés. Minden szerelési fázishoz meg kell határozni a maximális ideiglenesen megengedett terhelést, és ezt a dolgozók felé jelöléssel és oktatással is kommunikálni kell. Például az első szakaszban teheranyag nem helyezhető el, vagy csak 3–5 fő tartózkodhat a szerkezeten.

A harmadik elem a helyszíni terhelési-figyelési protokoll. A kivitelezés során mobil mérőeszközökkel (például lehajlásmérő, betonnyomás-érzékelő stb.) kell követni a zsaluzat állapotváltozásait, úgymint süllyedés, kilengés, tehereloszlás-változás. Riasztási küszöbök állíthatók be kritikus értékekhez.

A negyedik elem a dinamikus betonozási algoritmus. A betonozás során nem szabad szakaszfüggetlenül vagy irányítás nélkül haladni, hanem a szerkezeti viselkedés szerint kell haladni, például belső zónák előbb, peremrészek utána. A betonszivattyú kezelője statikai utasítás alapján dolgozik, nem rutinból.

Az ötödik elem a tudásalapú jogosultsági rendszer. A zsaluzási munkákhoz szerepköralapú jogosultság szükséges: csak képzett személy állíthat össze támaszrendszert, csak jogosult kezelő helyezhet el betonacélt vagy betont, minden fázis végén kijelölt szakértői ellenőrzés szükséges. Nem elég az általános munkavédelmi oktatás, konkrét zsaluzási jogosultság kell.

A módszertani előnyök közé tartozik, hogy rendszerszintű, nem a végső ellenőrzésre épít, hanem a folyamatba ágyazott biztonságra. Szakaszos és rugalmas, minden zsaluegység külön értékelhető. Technológiai nyitottság jellemzi, beépíthető

digitális érzékelés vagy BIM-alapú figyelés. Tudásorientált, a legnagyobb kockázati tényezőt, az emberi hibát képzéssel és szerepkiosztással szorítja vissza.

A homlokzati állványok katasztrófáinak vizsgálata, elemzése, a balesetek megelőzésének vizsgálatai, kutatása és fejlesztése

A homlokzati állvány ideiglenes, általában moduláris felépítésű térbeli szerkezet, amelyet épületek külső homlokzatán végzett építési, felújítási, karbantartási vagy szerelési munkák biztonságos elvégzésére használnak. Feladata, hogy teherbíró munkafelületet és közlekedési útvonalat biztosítson a munkavállalók, a szerszámok és a kisebb építőanyagok számára a homlokzat teljes magasságában.

A moduláris állványrendszer

A moduláris állványrendszer olyan munkavégzést, védelmet és megtámasztást szolgáló állványzat, amely sokoldalúan felhasználható, moduláris csomóponti állványrendszerként. A teherhordó függőleges állványcsövek Ø 48,3 mm átmérőjű acélcsővekből készülnek, amelyekben 50 cm-enként hegesztett rozettaelemek találhatók. Ezek a rozettaelemek lehetővé teszik akár nyolc csatlakozás létrehozását, vízszintes és átlós irányban egyaránt.

A vízszintes merevítők hossza változó, így az állványzat alapterülete derékszögű vagy ferde szögű lehet. A vízszintes merevítők szabványos hosszmeretei a következők: 0,74 m, 0,82 m, 0,9 m, 1,01 m, 1,13 m, 1,25 m, 1,5 m, 1,8 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 4 m. Ezek a szabványos méretek elősegítik a munkavégzést, a védelmet, a zsálati vagy madárkalitka típusú állványzatok gyors és optimális térbeli kialakítását. A moduláris koncepció különösen ideális lépcsőháztornyok, pódiumok, lelátók stb. kialakításához. A vízszintes és átlós merevítők mindkét vége speciális csatlakozókkal és beépített ékkel van ellátva, amelyek lehetővé teszik a gyors és biztonságos rögzítést a függőleges rozettaelemekhez.

Keretes homlokzati állványok

A homlokzati keretes állványrendszerek az építőiparban alkalmazott állványtípusok közül az egyik legelterjedtebb és leggyakrabban használt megoldást jelentik

a függőleges, külső síkon végzett építési és felújítási munkák biztonságos kiszolgálására. Ezt a típusú állványrendszert elsősorban vakolási, hőszigetelési, festési, nyílászárócseréhez kapcsolódó munkálatok, valamint tetőszegélyhez vagy homlokzati elemekhez történő hozzáférés céljából telepítik.

A keretes állványokat jellemzően épületek homlokzatánál állítják fel, tehát a sík mentén követik a fal kontúrját, és keretes rendszerük révén gyorsan, szabályozott módon szerelhetők össze (HUSZÁR – MAJOROSNÉ LUBLÓY 2023). Legnagyobb előnyük az egyszerű, előre gyártott, szabványosított elemekből való összeállíthatóság, amely nemcsak felgyorsítja a kivitelezést, hanem a munkavégzés biztonságát is nagymértékben növeli.

A keretes állványrendszer biztonságát az átlós merevítők, a homlokzathoz való mechanikus rögzítések, valamint az állvány teljes geometriájának stabilitása biztosítja. Az állványt rendszerint az épülethez kell rögzíteni acél kötőelemekkel, amelyeket falkapcsok vagy dübelezett rögzítőhorgonyok közvetítenek. Ezek a horgonyzások minden szinten, meghatározott vízszintes és függőleges osztásban helyezkednek el, figyelembe véve a szélterhelést, az állvány magasságát és a várható terhelést.

Az ilyen típusú állványok jellemzően 20–40 méter magasságig alkalmazhatók gazdaságosan, azonban speciális kialakítással akár 60 métert is elérhetnek. A keretes rendszer teherbírása munkaszintenként általában 150–300 kg/m² közötti, így elegendő 2–3 dolgozó, a munkához szükséges anyagok és szerszámok biztonságos elhelyezésére.

A homlokzati állványok összeomlásának okai, a balesetek elemzése

A homlokzati állványok statikai és biztonságtechnikai rendszerek, amelyeknek célja a magasban történő munkavégzéshez szükséges biztonságos munkafelület és közlekedési út biztosítása. Mivel ezek az állványrendszerek ideiglenes szerkezetek, statikai kapacitásuk korlátozott, és érzékenyek a kivitelezési hibákra, a karbantartási hiányosságokra és a külső hatásokra. Az állványrendszer összeomlása nem csupán szerkezeti károkat, hanem személyi sérüléseket vagy halált is okozhat.

Nem megfelelő statikai tervezés

Az egyik leggyakoribb strukturális ok a hiányos vagy hibás statikai számítás. A homlokzati állványoknak meg kell felelniük az MSZ EN 12810 és az MSZ

EN 12811 szabvány előírásainak, amelyek meghatározzák a szerkezeti elemek teherbírását, a lehajlási határokat, a stabilitási kritériumokat és a csatlakozási követelményeket. Amennyiben az állvány méretezése nem veszi figyelembe a tényleges terheléseket, például szélteher, hőteher, anyaghalmozás, akkor a szerkezet nem lesz képes a biztonságos teherviselésre.

A megelőzés módjai közé tartozik a statikai méretezés minden konkrét helyszínre és felhasználási célra, a gyártói rendszerengedélyek és rendszerleírások pontos követése, a helyszínspecifikus szélteher és geotechnikai adottságok figyelembevétele, valamint a szakértői tervek jóváhagyása és dokumentálása.

Helytelen vagy hiányos kivitelezés

Az állvány összeomlásához vezethet a szerelés során elkövetett hibás gyakorlat, például a hiányzó merevítők, a túl kevés vagy rosszul rögzített horgonyzás, a nem rendszerazonos elemek alkalmazása vagy a járófelületek nem megfelelő rögzítése. A kivitelezési hibák következtében az állvány elveszti globális merevségét vagy lokális stabilitását, ami oldalirányú vagy torziós instabilitáshoz vezethet.

A megelőzés érdekében a szerelést kizárólag képzett állványozó szakemberek végezhetik, a gyártó által előírt szerelési utasítások betartása kötelező, minden építési fázisban műszaki ellenőrzés szükséges, valamint dokumentált átadási-átvételi eljárás az állvány használatbavétele előtt.

Nem megfelelő alátámasztás és alapozás

Az állványok összeomlásának gyakori oka az egyenetlen vagy puha talajon történő hibás teherátadás. Az állítható, menetorsós lábak nem megfelelő szintezése, az elcsúszó fapallók vagy a csapadékos időszakban megcsúszó alátámasztás következtében az állvány lábai közül az egyik megcsúszhat, és az egész rendszer megbillenhet. A megelőzés módjai közé tartozik a talaj előzetes vizsgálata és szükség esetén teherbíró felület kialakítása, például betonlapok, acélgerendák, az állítható, menetorsós lábak precíz beállítása, vízszintezése műszerrel, lejtős terepen megfelelő alátámasztó szerkezetek (ékek, támgerendák) beépítése, valamint a rendszeres talajellenőrzés, különösen csapadékos időszak után.

Túlterhelés

A padlószintek túlterhelése (például építőanyag, zsákos ragasztó, vödrök, eszközök halmozott elhelyezése) meghaladja az állványtervben megengedett felületterhelést. Ez a járófelületek deformációjához vagy beszakadásához, hosszabb távon pedig a függőleges szerkezeti elemek túlterheléséhez vezet. A megelőzés érdekében szükséges a terhelési korlátok szigorú betartása (például 150–300 kg/m², a tervezési osztály szerint), a külön anyagfelhúzó platformok vagy emelőkosarak alkalmazása. A munkavezető feladata a rendszeres tehereloszlás-ellenőrzés, valamint a padlók vizuális ellenőrzése minden munkanap elején.

Időjárási hatások

Különösen veszélyes tényező a védőhálóval borított állvány, amely vitorlaszerű felületként működik nagy szélben. Az ilyen jellegű szélteher kritikus horgonyzási pontokat képes kiszakítani a falazatból, és az állvány billenéséhez vagy borulásához vezethet. A hó- és jégteher is túlterhelheti a szinteket, míg az eső csúszóssá teheti a járófelületeket. A megelőzés módjai közé tartozik a statikailag méretezett, rögzített védőháló használata, a szélterhelési zóna figyelembevétele a tervezés során, a munkamegszakítás előírása viharjelzés vagy szállókések esetén (>50–60 km/h), valamint az időjárási körülmények követése és a napi előrejelzés beépítése a munkaszervezésbe.

Karbantartási és ellenőrzési hiányosságok

Az állványrendszerek elhasználódása, használat közbeni kopása vagy sérülése meggyengíti a szerkezeti integritást. Ha a rendszeres vizsgálat és karbantartás elmarad, a meglazult csatlakozásokat, a sérült bilincseket, a repedezett padlólapokat és a rozsdás elemeket nem cserélik időben, ami váratlan szerkezeti hibákhoz vezethet (Safescreen [é. n.]). A megelőzés érdekében szükséges a szemrevételezéses ellenőrzés minden munkanap előtt, a sérült elemek azonnali kivonása a forgalomból, a havi részletes műszaki felülvizsgálat dokumentálása, valamint az állvány teljes vizsgálata rendkívüli időjárás vagy túlterhelés után.

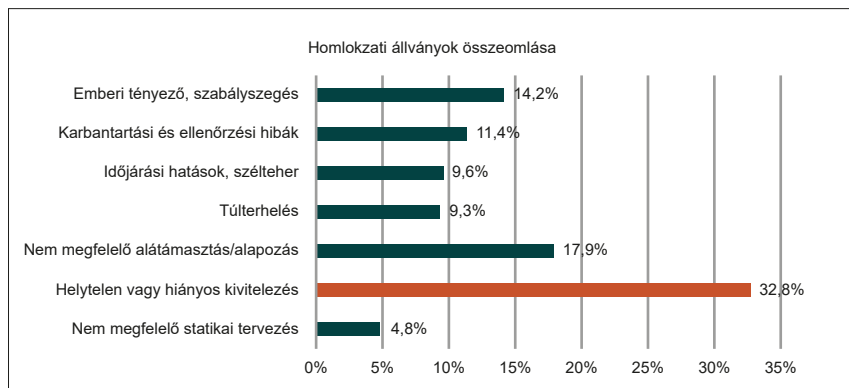
Emberi tényező – hibás használat, szabályszegés

A nem megfelelő oktatás, a munkafegyelem hiánya és a szabályok szándékos megszegése (például a védőkorlát eltávolítása, a szintek önkényes módosítása, az idegen elemek beépítése) fokozott balesetveszéllyel jár. A szervezetlen anyagmozgatás, a rendezetlen közlekedés, a nem kijelölt feljárók használata vagy a nem engedélyezett eszközök, például létra állványon belüli alkalmazása közvetlen baleseti kockázat.

A megelőzés érdekében szükséges az állványhasználati oktatás minden dolgozó számára, az írásos munkavédelmi szabályzat a helyszínen, a heti munkavédelmi bejárás és jegyzőkönyvezett ellenőrzés, valamint a felelős állványbiztonsági személy kijelölése.

Elemzés

A homlokzati állványok összeomlása ritkán egyetlen hiba következménye, sokkal inkább a tervezés, a kivitelezés, a használat és a fenntartás során egymásra épülő hiányosságok eredője. A rendszer biztonságos működése csakis akkor garantálható, ha minden szakaszban (a tervezéstől az elbontásig) szabványosított és dokumentált folyamatok mentén történik a munkavégzés. Az állvány nem csupán ideiglenes munkafelület, hanem komplex, önálló statikai rendszer, amely



6.4. ábra. Az állványok összeomlásának okai

Forrás: US Occupational Safety and Health Administration 2024

ugyanolyan figyelmet és szakértelmet igényel, mint az épület, amelyen dolgoznak. A megfelelő tudás, képzés, anyaghasználat, valamint a szakszerű ellenőrzés és karbantartás kulcsszerepet játszik abban, hogy az állvány ne veszélyforrás, hanem biztonságos munkakörnyezet legyen.

Elemezve az állványkatasztrófák okait (6.4. ábra) egyértelmű, hogy a vezető tényező a helytelen vagy hiányos kivitelezés 32,8%-kal. Amennyiben ehhez még hozzáadjuk az alapozási hibákat, valamint az ellenőrzés hiányosságainak hibáit, összességében az állvány átadásakor, vagyis a műszaki átadásakor ez az arány már 62,1%. A statisztikák, illetve a kivitelezői tapasztalat azt mutatja, hogy bármilyen gondossággal jár is el a kivitelező, nagyon gyakori a fenti hibaforrás. Ezért fogalmazódott meg a kérdés, hogy milyen módon lehetne ezeket a hibákat, ha nem is előre kiküszöbölni, de az átadás előtt 100%-os pontossággal megtalálni, és utána javítani.

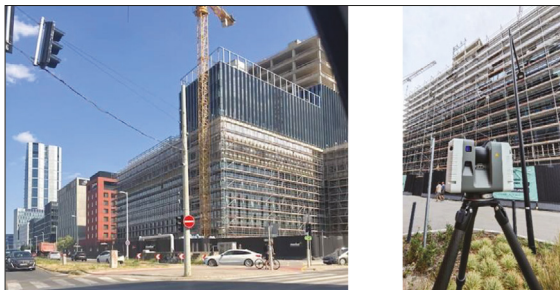
Új módszertan fejlesztése: a 3D-szkennelés alkalmazása

Az állványkatasztrófák megelőzésére a következő módszert dolgoztuk ki, amelyet a gyakorlatban egy budapesti építkezésen alkalmaztunk először (6.5. ábra).

Első lépésként az elkészült állványzatot LiDAR-szenzoros lézerszkennerral felmérjük, aminek eredményeként a térben pontok összetett halmazát, úgynevezett 3D pontfelhőt kapunk (6.6. ábra).

A pontfelhőből az Archicad építésztervező program segítségével 3D modellt készítünk, amelyen a teljes állványzat térben végigjárható. A kapott 3D modell segítségével olyan térbeli megvalósulási terv jön létre, amely minden részletében a valóságban megépített állványzatot ábrázolja, bármilyen nézetben, bármilyen járőrfelületi szinten, a legrészletesebb csomópontok megmutatásával.

A 6.7. ábrán a teljes állványfelületet mutatjuk meg axonometrikus ábrázolásban, míg a 6.8. ábrán egy lábdieszka rögzítését lehet elemezni, ahol jól láthatók az illesztések, az elemek kapcsolatai. Ezután két elemzőmódszer jöhet számításba a hibák feltárására. Az egyik, hogy a műszaki ellenőr manuálisan bejárja az állványzatot a monitor előtt ülve a 3D modell segítségével, és megkeresi a hibákat, vagy használva a mesterséges intelligencia programozható lehetőségét erre kifejlesztett hibakereső szoftverrel megkeresteti azokat. Csak ezen hibák kijavítása és visszaellenőrzése után kaphatná meg a kivitelező az állvány műszaki használhatóságának jogosítványát.



6.5. ábra. 3D szkennelés az állványról

Forrás: a szerzők felvétele



6.6. ábra. A 3D-s pontfelhő az állványról

Forrás: a szerzők szerkesztése



6.7. ábra. A 3D-s megvalósulási terv az állványról

Forrás: a szerzők szerkesztése



6.8. ábra. A 3D-s megvalósulási részletterr az állványról

Forrás: a szerzők szerkesztése

A 3D fotószkenner alkalmazása forradalmi előrelépést jelenthet a homlokzati állványok biztonsági ellenőrzésében. Az objektív és pontos mérési adatok alapján a rendszer lehetőséget biztosít a gyors döntéshozatalra, ami jelentősen csökkentheti a szerkezeti hibákból adódó balesetek kockázatát. Bár a technológia bevezetése kezdeti beruházást és speciális szaktudást igényel, hosszú távon az építőipari munkavégzés biztonságának növeléséhez és a munkabalesetek megelőzéséhez járulhat hozzá. Az automatizált ellenőrzési rendszerek alkalmazása így nemcsak a munkavédelmi előírásoknak való megfelelést segíti, hanem hatékonyabb és megbízhatóbb munkafolyamatot is eredményezhet.

Összefoglalás

Az építőipari segédszerkezetek közül a legismertebb és legtöbbet alkalmazott két típus, a vasbeton szerkezetek építésénél használt zsaluzatok és a szakipari munkáknál alkalmazott homlokzati állványok által okozott balesetek elemzésével és azok megelőzésével foglalkoztunk. A zsaluzatok építésekor, alkalmazásakor előforduló balesetek – amelyek jellemzően a zsaluzat összeomlását jelentik – elemzése nagyon heterogén munka.

A monolit vasbeton szerkezetek összes fajtáját még felsorolni is hosszú lenne, kezdve a lakó- és középületektől az ipari, közlekedési, vagy éppen a vízügyi létesítményekig, nemhogy azok építéstechnológiáját elemezni a zsaluzatokon keresztül. Éppen ezért az ezen szerkezetek által okozott balesetek is végtelen hosszú lajstromot alkotnak, sok-sok tényezővel számítva. Ezzel szemben a homlokzati állványok sokkal szűkebb műszaki tartalommal és jóval kevesebb alternatív lehetőséggel

bírnak, természetesen itt is találunk kivételeket, azonban a paletta sokkal kevésbé színes, mint a zsaluzatoké. Ez elmondható az általuk okozott balesetekről is.

Talán pont ezért a balesetek megelőzésének módszerére két különböző úton indultunk el a két szerkezettypusnál. A zsaluzatok esetében szakaszolt, megelőző módszertan alkalmazását javasoltuk, öt alappillírrre támaszkodva, amelynek szigorú betartása mellett várhatóan csökkenne a zsaluösszeomlással járó balesetek száma. Ezzel szemben az állványzatok esetén utólagos, nem folyamatos ellenőrzési módszertant fogalmaztunk meg. Újszerűsége a megvalósulási terv elemzésén alapul.

A hagyományos értelemben vett megvalósulási tervet a szerkezet, az objektum elkészülte után rajzolják meg, aminek a célja, hogy minden, ami az eredeti tervhez képest másképp épült meg, dokumentálva legyen. A mi esetünkben az állványzat megvalósulási tervét nem valaki tervezi vagy készíti el, hanem a fent említett pontfelhős mérésből, illetve az abból alkotott 3D modellből épül fel a valóság alapján. Ennek hibaelemzése és a hibák korrigálása után lenne csak kiadható az állvány használatbavételi műszaki engedélye.

Természetesen a két módszer kombinálva a leghatékonyabb. Persze a zsaluzatok esetében az effajta utólagos ellenőrzés módszeréhez még sok kérdést fog feltenni a mérnöktársadalom.

INVESTIGATION OF THE BASIC EVENTS AND PREVENTION POSSIBILITIES OF SERIOUS ACCIDENTS CAUSED BY AUXILIARY STRUCTURES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

The construction industry is one of the most dangerous industries worldwide, with workers at risk of serious accidents every day. This sector is particularly prone to workplace accidents due to different work processes and hazardous environments. One of the most common cases of construction accidents is of structural accidents and major fires in the area of temporary structures. These include, among other things, the collapse of façades and load-bearing scaffolding, as well as the formwork systems used in concrete structures. To avoid accidents during the construction and use of temporary structures under load, as well as accidents during their demolition, we can prepare a documentable prevention plan, which requires a comprehensive investigation that includes the exploration of the causes of possible accidents. The first steps of this are the description of the technical design of the structures, the analysis of their application techniques, and the examination of the most common construction and demolition errors and human errors. The aim of the study is to demonstrate and prove by studies that a new methodology can be developed to avoid these serious, even catastrophic accidents.

Keywords: construction, formwork, façade scaffolding, accident, prevention, occupational safety

Felhasznált irodalom

1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről.

4.1.1.45. *A munkabalesetek száma nemzetgazdasági ágak szerint* [é. n.]. Központi Statisztikai Hivatal. Online: www.ksh.hu/stadat_files/egc/hu/egc0043.html

ABAS, Nor Haslinda et al. (2020): Causes of Accidents Involving Scaffolding at Construction Sites. *Journal of Technology Management and Business*, 7(1), 75–86. Online: <https://doi.org/10.30880/jtmb.2020.07.08.007>

BALOGH K. et al. (2018): *Munkahelyi egészség és biztonság az építőiparban*. Budapest: [k. n.].

BERGER Ádám et al. (2024): The Importance of the Resistance of Reinforced Concrete Remediation Bunds, Improvement Options. *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, 9(Különszám), 18–24.

BUJNÓCZKI Tibor (2017): *Munkavédelem munkáltatóknak, munkavállalóknak*. Piliscsév: Műszaki.

ÉRCES Gergő et al. (2023): Fire Safety in Smart Cities in Hungary with Regard to Urban Planning. *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, 13(2), 104–128. Online: <https://doi.org/10.5595/001c.91474>

HOFFMANN, Friedrich H. (1993): *Schalungstechnik mit System*. Berlin: Bauverlag.

HUSZÁR Zsolt (2023): Comparative Analysis of Sliding Formwork Systems and Self Climbing Formwork Systems and Their Work and Accident Protection. *American Journal of Research Education and Development*, 4, 62–75.

HUSZÁR Zsolt – LUBLÓY Éva Eszter (2023): Homlokzati állványtüzek. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(4), 91–101. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.4.7>

HUSZÁR Zsolt – MAJOROSNÉ LUBLÓY Éva Eszter (2022): Construction Accidents of Reinforced Concrete Structures Due to Formwork Collapse. *American Journal of Research Education and Development*, 2, 31–45.

HUSZÁR Zsolt – MAJOROSNÉ LUBLÓY Éva Eszter – KÁTAI-URBÁN Lajos (2024): Frequent Formwork Accidents During the Construction of Monolithic Reinforced Concrete Structures, Including Causes and Prevention. *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, 9(Különszám), 60–67. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/vedelemtudomany/article/view/17971/14791>

KANYÓ Ferenc – VARGA Ferenc (2016): Sportcsarnoktűz a Testnevelési Egyetemen. *Védelem Katasztrófavédelmi Szemle*, 23(1), 47–49.

KAPU László (2012): *Monolit vasbeton szerkezetek. Fortélyok és praktikák a tervezéstől a megvalósításig*. Budapest: TERC Kft.

NAGY Csaba [é. n.]: Munkabalesetek – mennyire veszélyes az építőipar? *Építő Élet*. Online: www.epitoelet.hu/munkabalesetek-mennyire-veszelyes-az-epitoipar/

NOWOBILSKI, Tomasz – HOŁA, Bożena (2021): The Qualitative and Quantitative Structure of the Causes of Occupational Accidents on Construction Scaffolding. *Archives of Civil Engineering*, 65(2), 121–131. Online: <https://doi.org/10.2478/ace-2019-0023>

Safescreen [é. n.]. *Hünnebeck*. Online: www.huennebeck.com/safescreen

US Occupational Safety and Health Administration (2024): *Commonly Used Statistics: Most Frequently Violated Standards*. Online: <https://www.osha.gov/data/commonstats>

Kirovne Racz Reka Magdolna

Az éghajlatváltozás hatása a katasztrófavédelmi műszaki képességekkel szemben támasztott követelményekre, különös tekintettel a műszaki innovációkra

Az éghajlatváltozás következtében világszerte növekszik a szélsőséges időjárási események gyakorisága és intenzitása, ideértve az özvízszertű esőzéseket, a hőhullámokat, az aszályokat, a viharokat és az árvizeket. Ezek a jelenségek nagy kihívások elé állítják a katasztrófavédelmet, nem csupán a beavatkozási szakaszban, hanem a felkészülés, a megelőzés és a következményfelszámolás időszakában egyaránt. A hatékony védekezés és a gyors reagálás megfelelő műszaki képességeket igényel, amelyek magukban foglalják az infrastruktúra, az eszközrendszer, az információtechnológia, valamint a humánerőforrás-bázis technikai tudásának fejlettségét. A tanulmány célja bemutatni, hogy az éghajlatváltozás miként alakítja át a katasztrófavédelmi műszaki képességek rendszerét, továbbá milyen technikai és műszaki stratégiai fejlesztések szükségesek a jövőbeli kockázatok kezeléséhez. A műszaki innovációk – úgymint az automatizált monitoringrendszerek, a drónalapú adatgyűjtés, a moduláris eszközpark, valamint az energiafüggetlen mobil eszközök – integrációja elengedhetetlen feltételévé válik annak, hogy a katasztrófavédelem hatékonyan reagáljon az éghajlatváltozással összefüggő komplex veszélyhelyzetekre. A tanulmány arra keresi a választ, hogy miként bővíthetők és fejleszthetők a hazai katasztrófavédelmi műszaki képességek úgy, hogy azok a 21. század éghajlati kihívásaihoz hatékonyan alkalmazkodjanak.

Kulcsszavak: katasztrófavédelem, műszaki képességek, műszaki innovációk, éghajlatváltozás

A hazai éghajlati sérülékenység és az éghajlatváltozás hatása a katasztrófavédelmi feladatokra

Az éghajlatváltozás hatásainak értékelése hazánkban – az európai uniós kollektív követelményeknek való megfelelés érdekében – a *nemzeti katasztrófakockázat-értékelés*, valamint a kockázatbecslési eljárások és a kockázatazonosítási folyamatok prioritást élvező szempontjává vált az elmúlt évtizedben. A különböző katasztrófák kockázatának azonosítása a katasztrófavédelmi szervezetrendszer legalapvetőbb

feladata annak érdekében, hogy a valós kockázatokra és veszélyeztető tényezőkre történhessen meg a személyi állomány és a technikai eszközök felkészítése.

Magyarország az éghajlatváltozás hatásaival kapcsolatban az egyik leginkább sérülékeny európai országnak számít. A hőmérséklet emelkedése, a csapadék szélsőséges eloszlása és az extrém események gyakoriságának növekedése miatt a katasztrófavédelmi rendszer intenzívebb terhelésnek néz elébe. Ez érvényes a rendszer minden elemére, a civil-katonai együttműködésben érintett állami és magánszervezetekre, valamint a polgárookra egyaránt (FARKAS et al. 2017).

Az éghajlatváltozás napjaink egyik legösszetettebb és legsokrétűbb kihívása (KIROVNÉ RÁCZ 2019), amely nem csupán környezeti, hanem társadalmi, gazdasági és biztonsági vonatkozásaiban is alapjaiban változtatja meg a modern államok működését. Az éghajlati rendszerben tapasztalható gyors ütemű változások – így a hőhullámok, a szélsőséges időjárási események, a hirtelen lezúduló csapadék, valamint az aszályos időszakok meghosszabbodása – közvetlenül hatnak a természeti katasztrófák gyakoriságára és intenzitására (European Academies' Science Advisory Council 2014).¹ Ennek következtében a katasztrófavédelem szervezeti és technológiai rendszereit új kihívásokkal szembesítik, amelyek kezelése már nem pusztán operatív feladat, hanem stratégiai jelentőségű közfeladat is.

A katasztrófavédelem műszaki képességeit hagyományosan úgy alakították ki, hogy a múltbeli kockázati mintázatokra és a már ismert veszélyforrásokra tudjanak hatékonyan reagálni. Az éghajlatváltozás miatt fellépő új típusú és intenzitású természeti veszélyek – úgymint a települési elöntések, a villámárvizek, a hosszan elhúzódó hőségriadók, az erdőtüzek, a jégverések – már olyan dinamikus alkalmazkodást és technológiai újratervezést igényelnek, amely túlmutat a hagyományos műszaki infrastruktúrán (FARKASINSZKI 2020). A beavatkozások gyakoriságának növekedése, az eszközök fokozott terhelése, valamint az alkalmazási környezet komplexitása komoly követelményeket támaszt a beavatkozó egységek felszereltségével, energiafüggetlenségével, mobilitásával és digitalizáltságával szemben.

Az éghajlatváltozás légköri és hidrológiai hatásai Magyarországon

Az éghajlatváltozás következtében a globális klímaviszonyok gyors ütemben változnak, ami különböző extrém légköri és hidrológiai jelenségeket okoz.

¹ EASAC – Európai Akadémiák Tudományos Tanácsadó Testülete.

Magyarország mint közép-európai ország különösen érzékeny ezekre a változásokra, hiszen az éghajlati viszonyok alapvetően meghatározzák a társadalmi és gazdasági struktúrákat, a vízgazdálkodást, a mezőgazdaságot és a katasztrófavédelmi rendszerekkel szemben támasztott követelményeket.

A klimatológiai modellek előrejelzései szerint Magyarországon az éghajlat átlaghőmérséklete az elkövetkező évtizedekben jelentősen emelkedhet, és a hőhullámok gyakorisága is növekedhet. Az elmúlt évtizedekben a hőmérsékleti rekordok folyamatosan megdőlték, és az ország területén a nyári hónapok hőmérsékletei évről évre emelkednek (*Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia* 2018). Az ilyen típusú szélsőséges hőmérsékleti jellemzők egyre inkább kihívást jelentenek a katasztrófavédelem számára, különösen a lakosság biztonságának, az energiaszolgáltatás fenntartásának és az egészségügyi ellátás működtetésének szempontjából.

A hőhullámok és a megnövekedett nappali hőmérsékletek hatással vannak az energiagazdálkodásra is: az elektromos hálózatok túlterhelődhetnek, különösen, amikor a légkondicionálás igénye is jelentősen megnövekszik. Emiatt a katasztrófavédelemnek fel kell készülnie a hőhullámok kezelésére, például a kritikus infrastruktúrák védelme érdekében.

Ezen túlmenően a szélsőséges időjárási jelenségek között növekvő számban figyelhetők meg az intenzív zivatarok, amelyek extrém mennyiségű, hirtelen lezúduló csapadékkal járnak. Ezek a jelenségek különösen veszélyeztetik a mezőgazdaságot, az épített környezetet, és növelhetik a katasztrófavédelmi beavatkozások gyakoriságát és komplexitását.

Vízhiány és víztöbblet: aszály és intenzív csapadékhullás

A hidrológiai szempontból leginkább aggasztó következmény az éghajlatváltozás miatt megváltozó csapadékeloszlás és az aszályos időszakok meghosszabbodása. Az utóbbi évtizedekben a csapadék összegének éves eloszlása egyre inkább szélsőségesé vált. A csapadék mennyisége ugyan nem csökkent számottevően, azonban a csapadékos időszakok egyre rövidebbek és intenzívebbek, míg a száraz időszakok hosszabbak lettek, ami a vízgyűjtők vízkészleteinek csökkenéséhez vezet.

A leginkább érintett terület Magyarországon az Alföld, ahol az aszályos időszakok hossza növekvő tendenciát mutat (*Az aszály kezelésének hosszú távú koncepciójáról* [é. n.]). Az aszályok nemcsak a mezőgazdaságot, hanem a vízgazdálkodást és az ivóvízellátást is súlyosan veszélyeztetik, különösen a csökkent

vízhozamú folyókon és tavakon, valamint a vízbázisok szűkülésével. Ez a helyzet már évtizedekkel ezelőtt is nagy biztonsági kihívást jelentett, amely több területen is jelentős fejlesztéseket generált (KÁLLAI et al. 2005a; 2005b).

A másik végletet a hirtelen lezúduló, intenzív csapadék jelenti, amely villám-árvizeket, települési elöntéseket okozhat, különösen az urbanizált területeken. Az elmúlt évek tapasztalatai azt mutatják, hogy az ilyen jelenségek kezelésére nem megfelelően felkészültek a városok, így a többletvizek gyors elvezetése és a vízelvezető rendszerek felkészítése, bővítése különösen fontos szemponttá vált. Az éghajlatváltozás hatására tehát az extrém csapadékhullás nemcsak gyakoribbá vált, hanem a mértéke is növekedett, aminek következtében a településeknek egyre korszerűbb vízelvezető rendszerek és eszközök bevezetésére kell törekedniük.

A katasztrófavédelem alkalmazkodási feladatai

A magyarországi katasztrófavédelem számára különösen fontos, hogy felismerje azokat a területeket, amelyek az éghajlatváltozás következtében fokozott kockázatnak vannak kitéve. A leginkább veszélyeztetett régiók közé tartoznak az alacsonyan fekvő folyóvölgyek, az Alföld és a főváros környéke, ahol a csapadékintenzitás növekedésével a települési elöntéses helyzetek egyre gyakoribbá válhatnak. Ezenkívül az erdős területek, különösen a tűzveszélyes erdőterületek – például a Dél-Dunántúlon – is fokozott kockázatot jelentenek, mivel a hosszú, száraz nyári hónapok a tűzveszélyt is növelhetik [4/2008. (VIII. 1.) ÖM rendelet].

A katasztrófavédelemnek tehát nem csupán reagálnia kell a fenti jelenségekre, hanem előre kell jeleznie és meg kell előznie azokat. A jövőben kiemelt szerepet kapnak a digitalizált rendszerek, az intelligens eszközök és a prediktív modellek, amelyek képesek lesznek valós időben előrejelezni a viharokat, árvizeket, villámárvizeket, aszályokat és egyéb szélsőséges időjárási eseményeket, lehetővé téve ezzel a hatékonyabb beavatkozást.

A katasztrófavédelem műszaki képességei Magyarországon

Magyarország katasztrófavédelmi rendszere az éghajlatváltozás okozta új kihívások hatására folyamatos fejlesztést és adaptációt igényel. A katasztrófavédelem

egyik legfontosabb célja, hogy hatékonyan reagáljon a különböző természeti és civilizációs katasztrófákra. A műszaki képességek fejlesztése kulcsfontosságú ahhoz, hogy a különböző veszélyhelyzetekre gyorsan és szakszerűen lehessen reagálni.

A Magyarországon működő katasztrófavédelem alapvető technikai és szervezeti rendszerei között szerepelnek a tűzoltó- és mentőgépjárművek, a vízi mentési és vízkárelhárítási eszközök és berendezések, a különböző monitoring-rendszerek, a lakosság tájékoztatásával, a kommunikációval és az információ-áramlással, adatcserével – például hazai és nemzetközi adatszolgáltatási rendszerek – összefüggő rendszerek, valamint a logisztikai háttérrel biztosító infrastruktúrák. Ezen túlmenően a légi katasztrófavédelmi eszközök is, mint például a helikopterek és a drónok, egyre inkább hozzájárulnak a katasztrófavédelmi műszaki eszköztárhoz.

A vízügyi védekezés és a vízmentési munkálatok szempontjából a folyók és patakok mentén elhelyezett vízvezető rendszerek, a szivattyúállomások, valamint az áramfejlesztő és vízszivattyúzó eszközök kulcsfontosságúak a vízkárok kezelésében.

A katasztrófavédelem számára elengedhetetlen a zökkenőmentes kommunikáció – szélsőséges időjárási helyzetben az áramszolgáltatás kiesése esetén is –, amelyet elsősorban a modern kommunikációs rendszerek biztosítanak. A rádiós és digitális kommunikációs platformok lehetővé teszik az információ gyors áramlását a beavatkozó erők között, amivel támogatják a valós idejű döntéshozatalt és a védekezés irányítását.

Ezenkívül egyre nagyobb szerepet kapnak a mobilizálható, önálló energiaforrással rendelkező eszközök, mint a napelemes generátorok és akkumulátorok, amelyek a katasztrófák elleni védekezés során segítik a kommunikációt, az eszközök működtetését, és biztosítják az energiaellátást. Az ilyen típusú eszközök különösen fontosak a hosszú távú beavatkozások során, amikor az elektromos hálózatok megszakadhatnak, és a hagyományos energiatermelési rendszerek nem állnak rendelkezésre.

*A védekezésben részt vevők
műszaki képzése és felkészültsége*

A műszaki rendszerek és eszközök mellett kiemelten fontos a személyi tényező, azaz a katasztrófavédelemben részt vevők felkészültsége a műszaki rendszerek

működtetésére. A gyakorlati képzés, a szimulációs gyakorlatok, valamint a szakmai továbbképzések lehetővé teszik, hogy a beavatkozók folyamatosan alkalmazkodjanak az új típusú kihívásokhoz. A katasztrófavédelmi szervezetek számára fontos az interdiszciplináris együttműködés erősítése is, amely az egyes szakterületek, társszervek közötti hatékony információáramlást és erőforrás-elosztást segíti elő.

A gépjárműpark fejlesztése

A tűzoltó gépjárműpark – beleértve a műszaki mentő gépjárműveket is – folyamatos modernizálása és az új technológiai igényeknek való megfeleltetése elengedhetetlen. Az éghajlatváltozás hatásai miatt a gépjárműveknek működőképesnek és hatékonyaknak kell lenniük forróság, aszály, hirtelen lezúduló esőzés és áradás során is. A járműveknek fokozottan alkalmazkodniuk kell a szélsőséges időjárási körülményekhez, így például nagyobb vízszállító kapacitással és a járművek gyorsabb, szélsőséges időjárási körülmények között is megbízható mozgásának lehetőségével kell rendelkezniük.

Az elektromos és hibrid meghajtású járművek alkalmazása a jövőben növelheti az energiahatékonyságot, csökkentheti az üzemeltetési költségeket, valamint hozzájárulhat a fenntartható működéshez. A járműpark fenntartásának és korszerűsítésének támogatása érdekében az állami és uniós finanszírozási források is fontos szerepet játszanak.

Speciális technológiák és eszközök alkalmazása

A katasztrófavédelem számára különösen fontos, hogy alkalmazzon olyan speciális technológiai eszközöket, amelyek növelik a beavatkozások hatékonyságát. Például a drónok, amelyek légi felvételek készítésére, katasztrófa helyszínek felmérésére és gyors helyzetfelmérésre alkalmazhatók, hatékonyan kiegészíthetik a hagyományos beavatkozásokat. Ezen túlmenően az automatizált vízelvezető rendszerek és az intelligens technológiák, mint a vízminőség-monitorozó szenzorok, egyre fontosabb szerepet kaphatnak az ár- és belvízi védekezés során.

Az intelligens technológiai megoldások, mint például a mesterséges intelligenciát alkalmazó előre jelző rendszerek, a géptanulás-alapú modellek és a

prediktív algoritmusok, lehetővé teszik a katasztrófák pontosabb előrejelzését és a gyorsabb beavatkozást. A mesterségesintelligencia-alapú rendszerek alkalmazása a jövőben segítheti a katasztrófavédelem gyors reagálását, és előre jelezheti a katasztrófa várható következményeit, így a katasztrófákra történő felkészülés hatékonyabb lehet.

Fenntarthatóság és energiahatékonyság a katasztrófavédelemben

Az éghajlatváltozás hatásai, mint a hőhullámok, a szárazságok és a hirtelen esőzések, nemcsak a katasztrófavédelmi beavatkozásokat nehezítik meg, hanem az eszközök és az infrastruktúrák fenntarthatóságát is folyamatosan tesztelik. Ezért a jövőben fontos szerepet kapnak az energiahatékony megoldások.

A katasztrófavédelem számára elengedhetetlen a környezeti szempontok figyelembevételével történő fejlesztés, ideértve a fenntartható üzemeltetést, az alternatív energiaforrások – például napenergia és szélenergia – alkalmazását a működtetésben és az energiafelhasználás csökkentését. Az önálló energiaellátással rendelkező mobil eszközök, mint például a napelemes töltőállomások és az akkumulátoros rendszerek, előremutatók lehetnek a jövőben a katasztrófavédelem működtetésében, különösen olyan helyzetekben, amikor az elektromos hálózatok nem állnak rendelkezésre.

A fenntarthatóság biztosításához az eszközpark és az infrastruktúra mellett a katasztrófavédelemben részt vevők képzésének és tudatos felkészítésének is szerepe van. A fenntarthatóságra és az energiahatékonyságra vonatkozó ismeretek integrálása az oktatásba és a gyakorlatba hozzájárulhat a jövőbeli katasztrófák hatékony kezeléséhez.

Innovatív technológiai megoldások: drónok, IoT és mesterséges intelligencia

A katasztrófavédelem jövőbeli fejlesztési irányjai között kiemelkedő szerepet kapnak a legújabb technológiai vívmányok, mint például a drónok, az *Internet of Things* (IoT) és a mesterséges intelligencia (MI). A drónok képesek valós időben monitorozni a katasztrófa károsító hatása által érintett, például árvizek, erdőtüzek vagy aszály által sújtott területeket. Az általuk készített légi felvételek

gyors adatgyűjtést és helyzetfelmérést biztosítanak, ami segíti a döntéshozatalt és a beavatkozás pontos irányítását.

Az IoT-alapú rendszerek az eszközök, szenzorok és egyéb digitális eszközök hálózatba kapcsolásával lehetővé teszik a katasztrófák és veszélyhelyzetek dinamikus monitorozását. Az IoT-eszközök segíthetnek például a vízszint mérésében, a szélsébség követésében vagy az erdőtüzek korai jeleinek észlelésében. A gyűjtött adatok valós időben hozzáférhetőek lesznek, így a katasztrófavédelem gyorsabban reagálhat a kritikus helyzetekre.

A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás alkalmazása is hozzájárulhat a pontosabb előrejelzésekhez, segítve a katasztrófavédelmet a megfelelő időpontban és helyen történő beavatkozásban. A mesterséges intelligencia által vezetett elemzési rendszerek képesek előre jelezni a viharokat, extrém esőzéseket vagy egyéb szélsőséges időjárási eseményeket, így megelőzve azok káros hatásait és csökkentve a károkat.

Nemzetközi együttműködés és jó gyakorlatok

Az Európai Unió polgári védelmi mechanizmusa lehetőséget biztosít arra, hogy a tagállamok közös erővel reagáljanak a határokon átnyúló katasztrófavédelethez. A mechanizmus keretében a tagállamok eszközeit és erőforrásait megosztják, és közösen koordinálják a beavatkozásokat, valamint az erőforrásokat. Ezek a nemzetközi együttműködések különösen fontosak lehetnek a jövőben, amikor az éghajlatváltozás hatására egyre gyakoribbá válhatnak az olyan katasztrófák, amelyek több országot is érintenek – például az árvizek (PADÁNYI 2001).

A NATO keretében is zajlanak közös katasztrófavédelmi gyakorlatok, amelyek az interdiszciplináris együttműködést és a gyors reagálást hivatottak erősíteni. Az Észak-atlanti Szerződés Szervezetén belül a legnagyobb nem katonai program a *Polgári Veszélyhelyzeti Tervezés*. A tapasztalatok és az esettanulmányok megosztása nemcsak a műszaki fejlesztésben segít, hanem a szakmai felkészültség és a reagálási idő csökkentése terén is hasznos, és segíti a nemzetközi reagálást abban az esetben, ha az érintett nemzet nem képes megbirkózni a bekövetkezett katasztrófával. Az Egyesült Királyság éghajlatváltozási programjának alapelvei között szintén szerepel a technológiai újítások ösztönzése (KIROVNE RÁ CZ 2008).

A nemzetközi együttműködések a tudásmegosztás és a különböző szakértők bevonásával hozzájárulnak a katasztrófavédelem folyamatos fejlődéséhez. Emellett lehetőség van a legújabb technológiák és kutatási eredmények integrálására

is, amelyeket más országok már sikeresen alkalmaznak saját katasztrófavédelmi feladataik során.

A nemzetközi példák és a közös fejlesztések segítségével Magyarország katasztrófavédelmi rendszere nemcsak a helyi igényekhez igazodhat, hanem a globális éghajlati trendekkel szemben is erősebb és rugalmasabb válaszokat tud adni.

Technikai és operatív megoldási javaslatok a katasztrófavédelem fejlesztésére az éghajlatváltozás tükrében

Az éghajlatváltozás hatásainak kezelésében a katasztrófavédelem számára a technikai és operatív megoldások alapvető szerepet játszanak. A gyorsan változó környezethez való alkalmazkodás, az extrém időjárási események megelőzése és a gyors reakálás érdekében innovatív technológiákra és jól koordinált operatív intézkedésekre van szükség.

Intelligens szenzorhálózatok és IoT-rendszerek

A szenzorok és az IoT-alapú rendszerek alkalmazása forradalmasíthatja a katasztrófavédelem operatív működését. Az IoT-technológia lehetővé teszi, hogy valós időben monitorozzuk a különböző környezeti paramétereket, például a vízállásokat, a hőmérsékletet, a levegő minőségét vagy a talajnedvességet. Ezen adatok folyamatos monitorozása lehetővé teszi a katasztrófavédelem számára a korai figyelmeztetőrendszerek működtetését, amelyek azonosítani tudják a veszélyes trendeket, például a fokozódó aszályt vagy a várható villámárvizeket. Az ilyen rendszerek lehetőséget adnak arra, hogy a lakosságvédelmi intézkedésekre és a lakosságtájékoztatásra időben sor kerüljön.

Mesterségesintelligencia-alapú előrejelzési rendszerek

Az MI-rendszerek képesek nagy mennyiségű adatot elemezni, és előre jelezni a katasztrófahelyzeteket, azokat az eseményeket, amelyek a legnagyobb kockázatot hordozzák, valamint az optimális reakálási időt. Az MI alkalmazása a következő területeken növelheti a hatékonyságot: a katasztrófahelyzetek előrejelzése során a mesterséges intelligencia képes hosszú távú éghajlati adatokat elemezni, és

előre jelezni a természeti katasztrófákat, például a meteorológiai vagy hidrológiai káreseményeket vagy az erdőtűzeket. Az optimalizált erőforrás-kiosztás terén a gépi tanulás segítségével optimalizálhatók a beavatkozásokhoz szükséges erőforrások, például a tűzoltójárművek és a mentőegységek területi elosztása során. Az adatvezérelt döntéshozatal javíthatja a katasztrófavédelmi intézkedések időbeli és térbeli hatékonyságát, minimalizálva a károkat és a veszteségeket.

Drón- és robotikai alkalmazások

Az automata drónok és robotok alkalmazása új dimenziókat nyithat a katasztrófavédelemben, különösen a nehezen elérhető területeken. A drónok a következő feladatokat végezhetik el hatékonyan:

- Helyszíni felmérés és elemzés során a drónok képesek gyorsan bejárni az érintett területeket, és valós idejű képeket vagy videókat készíteni a katasztrófhelyzetekről, például erdőtűzek vagy árvizek esetén.
- A kártérkép készítése során a drónok segítségével a katasztrófavédelem gyorsan felmérheti a katasztrófa károsító hatása által érintett területet, és prioritásokat állíthat fel a beavatkozásokhoz.
- Robotok és drónok használhatók a felderítés és a mentés során is, például olyan területeken, ahol a hagyományos emberi beavatkozás kockázatos vagy lehetetlen.

Ezek a technológiai eszközök különösen hasznosak lehetnek az olyan helyzetekben, ahol a mentésben részt vevő beavatkozók élete és biztonsága veszélyben van.

Integrált kommunikációs és irányítási rendszerek

A különböző katasztrófavédelmi rendszerek és eszközök közötti interoperabilitás biztosítása alapvető ahhoz, hogy a különböző mentési és segítségnyújtó egységek hatékonyan tudjanak együttműködni. Az integrált rendszerek lehetővé teszik, hogy az eszközparkok és az információs rendszerek zökkenőmentesen kommunikáljanak egymással, legyen szó a tűzoltóságról, a rendőrségről, a mentőszolgálatról vagy a katonai egységekről.

Az ilyen integrált rendszerek magukban foglalhatnak valós idejű kommunikációt, amelynek segítségével az összes érintett fél azonnali tájékoztatást kaphat a

katasztrófavédeletről és a szükséges beavatkozásokról. A központi irányítási rendszer keretében az operatív irányítást támogató központi adatbázisok és rendszerek lehetővé teszik, hogy a döntéshozók valós időben figyelhessék a katasztrófavédeletről alakulását, és hatékonyan irányíthassák az erőforrások felhasználását.

Digitális lakosságtájékoztatási rendszerek

A lakosság gyors tájékoztatása és a polgári védelem megerősítése kulcsfontosságú szerepet játszik a katasztrófavédelem sikerében. A digitális tájékoztatási rendszerek és a mobilalkalmazások segítségével a lakosság azonnali információkhoz juthat a veszélyhelyzetekről és a szükséges védekezési intézkedésekről (LAKATOS 2022: 114).

Az SMS-alapú riasztórendszerek azonnali figyelmeztetéseket küldhetnek a lakosság számára a várható veszélyekről, például árvíz, vihar vagy egyéb katasztrófa esetén. A mobilalkalmazások segítségével a lakosság folyamatos tájékoztatást kaphat a katasztrófavédelmi intézkedésekről, valamint a közvetlenül érintett területek helyzetéről.

Összefoglalás

A tanulmány elemezte az éghajlatváltozás hatásait a katasztrófavédelem műszaki és operatív képességeire vonatkozó követelményekre. A következtetések azt mutatják, hogy az új technológiai megoldások, például az IoT-rendszerek, a mesterséges intelligencia, a drónok és a robotikai eszközök alkalmazása alapvető fontosságú a jövőbeli katasztrófavédelmi stratégiákban. A valós idejű adatgyűjtés, az automatizált rendszerek és az integrált irányítási struktúrák fejlesztése jelentős mértékben javíthatja a reakcióidőt, a helyzetek pontos előrejelzését és a következmények felszámolásának folyamatait.

A javasolt megoldások nemcsak a katasztrófák megelőzésében és enyhítésében, hanem a lakosság tájékoztatásában is szerepet játszanak. Az SMS-alapú riasztórendszerek, a digitális tájékoztatás és a közvetlen információáramlás biztosítása elengedhetetlen a hatékony polgári védelemhez. A jövő katasztrófavédelmi rendszereinek egyik legfontosabb jellemzője az interoperabilitás és az integrált működés, ahol a különböző szintű és típusú védelmi rendszerek zökkenőmentesen együttműködnek.

A tanulmányban bemutatott operatív javaslatok és technikai megoldások nemcsak az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodást szolgálják, hanem az olyan hosszú távú, fenntartható védelmi infrastruktúra megteremtését is elősegítik, amely képes a jövőben még sikeresebben reagálni a változó környezeti és társadalmi kihívásokra. A további kutatásokat és fejlesztéseket ezen új technológiák, valamint azok integrálása és alkalmazása köré kell építeni. A katasztrófavédelem hatékonysága és a lakosság biztonsága szoros összefüggésben áll az alkalmazott innovatív megoldásokkal és a megfelelő, gyors reagálóképességgel.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE REQUIREMENTS
FOR DISASTER MANAGEMENT TECHNICAL CAPABILITIES,
WITH PARTICULAR REGARD TO TECHNICAL INNOVATIONS

Climate change is causing extreme weather events such as torrential rains, heat waves, droughts, storms, and floods to become more frequent and intense worldwide. These phenomena pose significant challenges for disaster management, not only during intervention phases but also during preparation, prevention, and consequence management periods. Effective defense and rapid response require appropriate technical capabilities, including the development of infrastructure, equipment systems, information technology, and technical knowledge of human resources. This study aims to demonstrate how climate change is transforming the system of disaster management technical capabilities and what technical and strategic developments are necessary to manage future risks. The integration of technical innovations – such as automated monitoring systems, drone-based data collection, modular equipment parks, and energy-independent mobile devices – is becoming an essential condition for disaster management to respond effectively to complex emergencies related to climate change. The study seeks to answer how domestic disaster management technical capabilities can be expanded and developed to effectively adapt to the climate challenges of the 21st century.

Keywords: disaster management, technical capabilities, technical innovations, climate change

Felhasznált irodalom

- 4/2008. (VIII. 1.) ÖM rendelet az erdők tűz elleni védelméről.
- Az aszály kezelésének hosszú távú koncepciójáról* [é. n.]. Online: <https://2010-2014.kormany.hu/download/7/0a/90000/Aszalystrategia.pdf>
- DIKMENER, Gokham et al. (2024): *Innovation in Disaster Management*. UNDP–OCHA. Online: <https://www.undp.org/policy-centre/istanbul/publications/innovation-disaster-management-leveraging-technology-save-more-lives>
- Európai Akadémiák Tudományos Tanácsadó Testülete (EASAC) (2014): *Szélsőséges időjárási jelenségek Európában és hatásuk a nemzeti, valamint az uniós alkalmazkodási stratégiákra*. EASAC 22. sz. szakpolitikai jelentés. Budapest: Magyar Tudományos Akadémia.
- FARKAS Ádám et al. (2017): A Magyar Honvédség feladatai, szerepének és helyzetének jogi aspektusai a tömeges migráció kapcsán. In TÁLAS Péter (szerk.): *Magyarország és a 2015-ös európai migrációs válság*. Budapest: Dialóg Campus, 159–177.
- FARKASINSZKI Lóránt (2020): A műszaki feltételrendszer kiemelt szerepe a katasztrófavédelmi feladatellátásban. *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, 5(3), 191–206.
- KÁLLAI Ernő et al. (2005a): A vízellátás új technikai berendezései. *Katonai Logisztika*, (2), 190–201.
- KÁLLAI Ernő et al. (2005b): Új víztisztító berendezés a Magyar Honvédségben. *Haditechnika*, 39(2), 65–66.
- KIROVNE RÁCZ Réka (2019): Az extrém csapadékhullás katasztrófavédelmi vonatkozásai. *Védelem Katasztrófavédelmi Szemle*, 26(5), 35–37.
- LAKATOS Bence Roland (2022): A katasztrófavédelmi hatósági feladatrendszer műszaki, technológiai hátterének az elemzése, a továbbfejlesztési lehetőségek vizsgálata. *Védelem Tudomány Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, 7(1), 101–121.
- Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (2018). Innovációs és Technológiai Minisztérium. Online: https://vizeink.hu/wp-content/uploads/2022/10/VGT3/hatteranyagok/1_6_hatteranyag_NES_Ogy_alta_elfogadott.pdf
- PADÁNYI József (2001): *Polgári-katonai együttműködés a békefenntartó műveletek során*. Kutatási jelentés, 1–76.
- RÁCZ Réka Magdolna (2008): Az Egyesült Királyság éghajlatváltozási programjáról. *Hadtudományi Szemle*, 1(1), 75–84.

A magyarországi katonai repülőterek elhelyezkedése a hagyományos erőművekhez képest¹

A tanulmány célja a magyarországi katonai repülőterek elhelyezkedésének vizsgálata a hazai hagyományos (azaz nem megújuló, például nukleáris, szén-, gáz- stb.) erőművektől való távolság szempontjából. A kutatás célja feltárni a katonai repülőterek és az erőművek közötti távolságok összefüggéseit, valamint az esetleges térbeli koncentrációkat. A vizsgálat során különféle térbeli adatokat és elhelyezkedési mintázatokat elemeznek a szerzők, figyelembe véve a stratégiai, védelmi és logisztikai tényezőket is. A katonai repülőterek és erőművek közötti kapcsolat megértése kulcsfontosságú a nemzetbiztonság szempontjából, mivel az erőművek stratégiai jelentősége és azok esetleges támadásoknak való kiszolgáltatottsága közvetlen hatással van a védelmi intézkedések tervezésére. A gráfelméleti módszerekkel végzett elemzés során három katonai repülőtér – Pápa, Kecskemét és Szolnok – energiaellátási interdependenciáit vizsgálták a szerzők, különös tekintettel a hálózati struktúra és a légvonalbeli távolságok összehasonlítására.

Kulcsszavak: katonai repülőtér; villamos energia, áram, erőmű, hálózat, legrövidebb út

Bevezetés

A modern katonai létesítmények működésének biztonsága és zavartalansága szorosan összefügg a polgári kritikus infrastruktúrák rendelkezésre állásával és megbízhatóságával. Az energiaellátás kiemelten érzékeny területként jelenik meg ebben a kontextusban, mivel a katonai objektumok, különösen a repülőterek működőképessége jelentős mértékben függ a folyamatos elektromosenergia-ellátottságtól. Ez különösen igaz olyan országokban, mint Magyarország, ahol a katonai infrastruktúra jelentős része közvetlenül a civil infrastruktúra-hálózatoktól kapja energiaellátását.

A globális biztonsági környezet változásai újra ráirányították a figyelmet az infrastruktúra ellátásbiztonságának stratégiai jelentőségére. Másrészt az

¹ A tanulmány a Kulturális és Innovációs Minisztérium DKÖP-NKE-24-01 kódszámú Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

interdependenciák vizsgálata hálózatkutató módszerekkel korábban kevésbé vagy egyáltalán nem volt jellemző a magyarországi katonai objektumok kontextusában (RINALDI–PEERENBOOM–KELLY 2001). Ezért indokolt a légibázisok – amelyek gyors reagálóképességük révén stratégiai fontosságúak – energia-biztonságának feltérképezése.

A kutatás eredményei lehetőséget adnak arra, hogy pontosabb képet kapjunk a vizsgált objektumok stratégiai sérülékenységről, valamint hozzájárulhatnak a katonai tervezés során alkalmazott kockázatsökkentési intézkedések kialakításához is. Az elemzés a továbbiakban alapját képezheti a hálózati centralitási és redundanciavizsgálatoknak, amelyek hosszabb távon is javíthatják az infrastruktúra ellenálló képességét.

Az elemzés során nyilvánosan elérhető adatokkal dolgoztak a szerzők, amelyek elsődleges forrása a Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. (MAVIR) és az Európai Villamosenergia Átviteli Hálózat (ENTSO-E) honlapján található energetikailétesítmény-lista és koordináták, valamint az érintett települések koordináta-adatbázisai (MAVIR [é. n.]; BUKTA et al. 2023; ENTSO-E [é. n.]). A kutatás során alkalmazott gráfelméleti és távolságszámítási módszereket Python programozási nyelvben, a *pandas*, a *geopy.distance* (*geodesic*) és a *networkx* csomag, valamint a Gephi hálózatelemző szoftver segítségével végezték el (*Gephi* [é. n.]).

Célkitűzés

A katonai repülőterek megbízható energiaellátása alapvető fontosságú a nemzeti és szövetségi védelmi képességek fenntartása szempontjából. Mivel ezen létesítmények túlnyomórészt a polgári villamosenergia-hálózatokra támaszkodnak, az infrastruktúra-függés mértékének és szerkezetének vizsgálata stratégiai jelentőségű. A repülőterek által igényelt villamos energia általában nagy távolságra fekvő, országosan elosztott erőművekből érkezik, gyakran több köztes csomóponton és átviteli útvonalon keresztül. E hálózati útvonalak fizikai és szerkezeti jellemzői hatással lehetnek az energiaellátás gyorsaságára, megbízhatóságára és sérülékenységre.

A 2025 áprilisában bekövetkezett, Ibériai-félszigetet érintő kiterjedt áramszünet és kockázatok valóságát szemlélteti (HARDIMAN 2025). Az átviteli hálózat feltelelezett meghibásodása miatt Portugália és Spanyolország több nagy forgalmú repülőterén fennakadások következtek be a légi forgalomban, egyes esetekben teljesen megbénítva az irányítást és a földi kiszolgálást. A zavar következtében

számos járatot töröltek vagy átirányítottak, ami jól mutatja, hogy az energiahálózati zavarok képesek megbénítani vagy jelentősen korlátozni a repülőterek működését, még viszonylag fejlett, magas rendelkezésre állású hálózati környezetben is. Ez az eset nemcsak egy technikai probléma következménye volt, hanem a rendszerszintű hálózati sérülékenység valószínű példája.

Jelen kutatás célja, hogy gráfelméleti módszerekkel vizsgálja meg, milyen mértékű és szerkezetű az energiaellátási interdependencia három magyarországi katonai repülőtér – Pápa, Kecskemét és Szolnok – és a polgári villamosenergia-termelő kapacitások között (NEWMAN 2010). A vizsgálat középpontjában az erőművektől a repülőterekig vezető legrövidebb hálózati utak hossza áll (BARABÁSI 2016). Az elemzés során a hálózati távolságokat összevetjük a légvonalban mért távolságokkal, feltárva a topológiai eltérésekből fakadó ellátásbiztonsági következményeket. Külön figyelmet fordítunk a paksi atomerőműhöz való kapcsolatok elemzésére, mivel ez az erőmű az ország villamosenergia-termelésének meghatározó szereplője. A hipotézis szerint a hálózati struktúra sajátosságai miatt bizonyos objektumok esetében a tényleges hálózati távolságok jelentősen meghaladhatják a légvonalban mért távolságokat, ezzel potenciálisan megnövelve a sebezhetőséget és csökkentve az ellátásbiztonságot.

A kutatás célkitűzése, hogy azonosítsa azokat az eseteket, amelyekben a hálózati távolság lényegesen meghaladja a földrajzi közelséget, és ezzel sebezhetővé teszi az ellátási láncot. Ezek az eredmények hozzájárulhatnak az ellátásbiztonsági kockázatok azonosításához, valamint megalapozhatják a későbbi, centralitás- és redundanciaalapú elemzéseket, amelyek hosszú távon támogatják a katonai infrastruktúra stratégiai védelmi tervezését és megerősítését.

A fenti tényezők mind megerősítik, hogy a témakör nemcsak elméleti szempontból releváns, hanem konkrét gyakorlati és biztonságpolitikai jelentőséggel is bír, különösen a jelenlegi nemzetközi biztonsági környezet és az európai villamosenergia-hálózat egyre növekvő komplexitása mellett.

Vizsgálati módszertan

Módszertani keretek

A kutatás módszertani kereteit a hálózat- és gráfelméleti megközelítés alkotja (BARABÁSI 2016; NEWMAN 2010). A választott megközelítés lehetővé teszi, hogy a repülőterek, az erőművek és az energetikai infrastruktúra átviteli elemei egyetlen

integrált hálózatként (gráfként) legyenek ábrázolva, amelynek csomópontjai a releváns létesítmények, élei pedig az azok között lévő közvetlen hálózati kapcsolatokat reprezentálják. A gráfelméleti elemzés fő célja, hogy meghatározza a legrövidebb hálózati utakat, valamint összevesse ezeket a légvonalban számított távolságokkal, feltárva ezzel a hálózati struktúrából fakadó stratégiai összefüggéseket.

Adatforrások

A kutatás során nyíltan elérhető online adatforrásokat használtunk fel. A MAVIR és az ENTSO-E weboldaláról származnak az erőművek, valamint az átviteli hálózat fontosabb elemeinek településszintű adatai (MAVIR [é. n.]; ENTSO-E [é. n.]). A települések földrajzi koordinátáinak meghatározásához településkoordináták nyilvános adatbázisait használtuk. A katonai repülőterek koordinátáit (Pápa, Kecskemét, Szolnok) a Google Térkép alapján pontosítottuk. Az adatokat egységes formában dolgoztuk fel, és a végleges elemzési adatbázis a pandas Python-csomag segítségével készült el.

A gráf kialakítása

Az infrastruktúra-rendszert gráfelméleti modellként ábrázoltuk, amelynek főbb elemei a következők. A csomópontok (*nodes*) körébe tartoznak a katonai repülőterek, az erőművek, valamint az energetikai infrastruktúra egyéb releváns csomópontjai. Az élek (*edges*) a csomópontok között közvetlen kapcsolatot reprezentáló vonalak, amelyek földrajzi koordináták alapján meghatározott légvonalbeli távolsággal (km-ben) súlyozottak.

A távolságok meghatározásának módszere

A légvonalbeli távolságok számítása

A repülőterek és az erőművek, valamint a hálózati elemek közötti légvonalbeli távolságok számításához a Python `geopy.distance` moduljának `geodesic` függvényét alkalmaztuk. A geodéziai távolságokat kilométerben adták meg az egyes koordinátapárok között. Az adatok ellenőrzésére és bizonyos esetekben a jobb

vizuális feldolgozás érdekében a *Distance Calculator* weboldalt használtuk (*Distance Calculator* [é. n.]).

A hálózati távolságok számítása gráfelméleti úton

A hálózati távolságokat – azaz a ténylegesen rendelkezésre álló fizikai összeköttetések szerinti legrövidebb útvonalakat – a Python networkx csomagjával számítottuk ki, alkalmazva a Dijkstra-algoritmust, amely alkalmas pozitív élsúlyok esetében a legrövidebb útvonalak meghatározására (BARABÁSI 2016).

Az elemzés végrehajtása

Az elkészült gráf elemzése során először meghatároztuk az egyes katonai repülőterektől a legközelebbi, második legközelebbi erőművekhez, valamint kiemelten a paksi atomerőműhöz vezető legrövidebb út hálózati távolságait. Másodszor azonosítottuk, hogy a légvonalbeli és a hálózati távolságok között mely repülőterek esetében jelentkeznek jelentős eltérések. Az eredményeket táblázatban összesítettük, amely tartalmazza a katonai repülőterek nevét, az adott erőművek nevét, a légvonalban számított távolságot kilométerben, a hálózati úton mért távolságot kilométerben és a két távolság közötti különbséget százalékos értékben.

Korlátozások

Jelen tanulmányban nem vettük figyelembe az átviteli hálózat kapacitását, üzembiztonságát vagy redundanciáját, ezek vizsgálata jövőbeli kutatási irányként kerülhet sorra. Jelen elemzéshez kizárólag földrajzi koordinátákon alapuló távolságokat és nyíltan elérhető hálózati információkat használtunk.

Az eredmények bemutatása

Az elemzés során vizsgáltuk a pápai, a kecskeméti és a szolnoki katonai repülőtér távolságát az egyes erőművektől, különös figyelemmel a hálózati úton számított

8.1. táblázat. *A repülőterek és az erőművek hálózati és légvonalbeli távolsága*

Repülőtér	Erőmű	Hálózati távolság	Légvonalbeli távolság	Különbség
Pápa	Lítér	48 km	48 km	0%
	Ajka	82 km	26 km	215%
	Paks	133 km	132 km	1%
Kecskemét	Máttra	118 km	102 km	16%
	Kispest	174 km	73 km	138%
	Paks	236 km	71 km	232%
Szolnok	Máttra	69 km	69 km	0%
	Kispest	125 km	85 km	47%
	Paks	187 km	119 km	57%

Forrás: a szerzők szerkesztése

legrövidebb távolságokra, illetve ezek összevetésére a légvonalban mért távolságokkal. A 8.1. táblázat mutatja az eredményeket.

A vizsgálat során három katonai repülőtér (Pápa, Kecskemét és Szolnok) energiaellátását elemeztük a hálózati és légvonalbeli távolságok összevetésével. A részletes eredmények a következőképpen alakulnak.

A *pápai repülőtér* esetében a lítéri erőművel kapcsolatban a hálózati és a légvonalbeli távolság egyaránt 48 km, eltérés nincs, így ez ideális állapotnak tekinthető az ellátásbiztonság szempontjából. Az ajkai erőművel való kapcsolat esetében a hálózati távolság 82 km, míg légvonalban csupán 26 km, az eltérés jelentős, 215%. Ez jelentős kockázatokat hordozhat magában. A paksi atomerőművel való kapcsolat vonatkozásában a hálózati távolság 133 km, légvonalban pedig 132 km. Ez minimális, 0,76%-os eltérést jelent, ami gyakorlatilag ideális ellátási viszonyt tükröz.

A *kecskeméti repülőtér* tekintetében a Mátrai Erőművel való kapcsolat esetében a hálózati távolság 118 km, légvonalban 102 km, az eltérés mérsékelt (15,7%), még elfogadható tartományban van. A Kispesti Erőműnél a hálózati távolság 174 km, légvonalban 73 km. Ez a jelentős, 138%-os eltérés magas stratégiai kockázatot jelenthet. A paksi atomerőművel kapcsolatban a hálózati távolság 236 km, légvonalban 71 km. A 232%-os eltérés kiemelten magas, jelentős stratégiai és ellátásbiztonsági kockázatot hordoz magában.

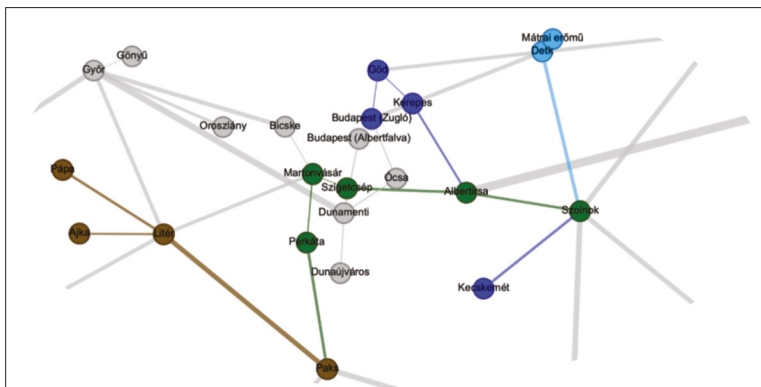
A *szolnoki repülőtér* vonatkozásában a Mátrai Erőművel való kapcsolat esetében a hálózati és légvonalbeli távolság egyaránt 69 km, optimális helyzetet jelezve az energiaellátás tekintetében. A Kispesti Erőműnél a hálózati távolság 125 km, légvonalban

85 km, ami 47%-os eltérést jelent, közepes kockázati kategóriába sorolható. A paksi atomerőművel kapcsolatban a hálózati távolság 187 km, légvonalban 119 km. Ez 57%-os eltérést jelent, ami mérsékelt stratégiai kockázatokat hordozhat magában.

Gráfábrázolás és vizuális szemléltetés

A gráfok ábrázolása során alapvető fontosságú, hogy a kapott eredményeket vizuálisan is szemléletes módon mutassák be. A 8.1. ábrán a Gephi szoftver Geo layout pluginja segítségével jelenítettük meg a magyarországi katonai repülőterek és villamosenergia-termelő erőművek közötti legrövidebb utak gráfját. Ez a kiegészítő lehetővé teszi, hogy a csúcsokat a gráfban szereplő objektumok valódi földrajzi koordinátái alapján helyezzük el, így nem véletlenszerű, hanem földrajzilag is közel pontos ábrázolás jön létre. A csomópontok színezése továbbá egyértelműen elkülöníti az egyes repülőterekhez tartozó útvonalakat, megkönnyítve ezzel a vizsgált hálózat áttekintését.

A 8.2. ábra ezzel szemben térképi megközelítést alkalmazva szemlélteti Magyarország erőműveinek elhelyezkedését és az országos energiaátviteli hálózat szerkezetét egy hivatalos térképrészleten keresztül. Ez a vizuális megjelenítés jól kiegészíti a Gephiben létrehozott gráfábrázolást, mivel valós térbeli kontextusban mutatja be a hálózati elemeket.



8.1. ábra. *Legrövidebb utak a repülőterek és az erőművek között színekkel elkülönítve a Gephi szoftverben*

Forrás: a szerzők szerkesztése



8.2. ábra. Magyarország erőműveinek és energiaátviteli hálózatának térképrészleten történő megjelenítése

Forrás: ENTSOE_Grid_Map.pdf [é. n.]

Az eredmények értékelése és diszkusszió

Az elemzés során jelentős különbségeket tapasztaltunk a légvonalban mért és a hálózaton ténylegesen megtett távolságok között, amelyek súlyos stratégiai és ellátásbiztonsági következményekkel járhatnak. A hipotézist igazolták az eredmények.

Különösen kritikusnak tekinthető a kecskeméti repülőtér helyzete, amely a paksi atomerőműtől 236 km-es hálózati távolságban helyezkedik el, miközben légvonalban mindössze 71 km-re található. Ez az eltérés (232%) jelentős sebezhetőséget jelent, hiszen a hosszabb hálózati út több potenciálisan sérülékeny pontot tartalmaz, növelve a rendszer kiesésének kockázatát. A Kisésti Erőmű esetében tapasztalt magas eltérés (138%) tovább fokozza a stratégiai kockázatot Kecskemét számára, kiemelve az infrastruktúra fejlesztési igényét.

A pápai repülőtér esetén az ajkai erőművel való hálózati kapcsolat (215%-os eltérés) is jelentős kockázatokat rejt magában. Ugyanakkor a paksi atomerőművel való minimális eltérés pozitív stratégiai helyzetet teremt, potenciálisan stabil ellátási alternatívát jelezve.

A szolnoki repülőtérnél a Mátrai Erőmű esetében tapasztalt optimális távolsági helyzet (azonos hálózati és légvonalbeli távolság) stabil ellátási állapotot jelez.

Ennek ellenére a paksi atomerőművel és a Kiszepesi Erőművel fennálló mérsékelt különbségek szintén jelzik, hogy a hálózati infrastruktúra javítása további stabilitást és biztonságot eredményezhetne.

Az eredmények alapján stratégiai szempontból kulcsfontosságú lehet a kecskeméti repülőtér esetében az infrastruktúra jelentős fejlesztése, az alternatív energiaforrások kiépítése vagy további redundáns kapcsolatok létrehozása, különösen a paksi atomerőmű irányába. Pápánál és Szolnokon a meglévő hálózati viszonyok javítása és további redundanciák kiépítése, a kritikus pontok biztonságának fokozása lehet célszerű.

Összességében megállapítható, hogy a hálózati struktúra pontos ismerete, annak stratégiai elemzése és folyamatos fejlesztése alapvető fontosságú Magyarország katonai infrastruktúrájának biztonságos és zavartalan energiaellátásához. A bemutatott eredmények hatékony alapot adhatnak jövőbeni infrastrukturális döntésekhez, különösen a katonai stratégiai tervezés során.

A vizsgálati módszerek értékelése

A gráfelméleti elemzés hatékony eszköznek bizonyult a kritikus infrastruktúrák interdependenciájának feltárására. Az alkalmazott Python-alapú módszertan (geopy, pandas, networkx) pontos, reprodukálható és bővíthető megközelítést kínált. Ez lehetőséget teremt arra, hogy a későbbi kutatások során további tényezők (például redundancia, kapacitás) bevonásával még pontosabb képet kapjanak a kutatók a rendszer működéséről.

Az eredmények általánosíthatósága

Bár jelen kutatás három konkrét repülőtérre fókuszált, a módszertan általánosítható más katonai létesítményekre és más típusú infrastruktúrákra is. A tanulmány eredményei fontos támpontokat adhatnak a katonai tervezők számára, különösen a stratégiai infrastruktúrák biztonságának megerősítésében, a sebezhetőségi pontok azonosításában, valamint a kockázatsökkentési stratégiák kidolgozásában.

Következtetések, valamint kitekintés és jövőbeli kutatási irányok

Következtetések

Jelen kutatás célja az volt, hogy hálózatzelméleti módszerek segítségével feltárja három kiemelt magyarországi katonai repülőtér (Pápa, Kecskemét, Szolnok) energiaellátási interdependenciáit, különös tekintettel a hálózati struktúra és a légvonalbeli távolságok összehasonlítására. Az eredmények alapján az alábbi fő következtetések vonhatók le.

A hálózati struktúra jelentősége

A légvonalbeli és a hálózati távolságok közötti különbségek stratégiai kockázatok hordoznak, kiemelten Kecskemét esetében, amelynek energiaellátása jelentős hálózati távolságon keresztül biztosított a paksi atomerőműből.

Az ellátásbiztonság kockázatai

A hosszabb hálózati útvonalak magasabb sebezhetőséget jelentenek. Az ilyen hálózati felépítésű energetikai ellátás operatív sérülékenységet okozhat, ami a katonai objektumok működőképességét, ezáltal a nemzetbiztonságot is negatívan érintheti.

Módszertani hatékonyság

A gráfelméleti és Python-alapú megközelítés (geopy, pandas, networkx) alkalmas eszköznek bizonyult az interdependenciák hálózati feltárására, így ez a módszertan széles körben is alkalmazható további elemzések során.

Stratégiai ajánlások

Az eredmények alapján javasolt olyan infrastruktúra-fejlesztések végrehajtása, amelyek csökkentik a hálózati távolságokat, és javítják a redundanciát, ezáltal növelve a katonai objektumok energiaellátási biztonságát.

Összességében a kutatás eredményei hangsúlyozzák a kritikus infrastruktúrák hálózati struktúrájának stratégiai jelentőségét. További kutatási lehetőséget jelent a hálózati centralitási mutatók elemzése, az infrastruktúra redundancia- és kapacitásszemponturn vizsgálat, valamint a sérülékenység értékelése különféle fenyegetési forgatókönyvek alapján. Ezen elemzések segíthetnek még részletesebben meghatározni a kockázatok mértékét, és alapot adhatnak a magyar katonai infrastruktúra energiaellátási rendszerének hatékonyabb stratégiai tervezéséhez és működtetéséhez.

Kitekintés és jövőbeli kutatási irányok

Jelen kutatás számos további kutatási lehetőség előtt nyitja meg az utat, amelyek révén mélyebben megérthetők a kritikus infrastruktúrák és a katonai létesítmények közötti hálózati interdependenciák.

A részletes műszaki paraméterek vizsgálata

A további kutatások során fontos lehet a hálózat további jellemzőinek – például kapacitásának, redundanciájának és üzembiztonsági mutatóinak – vizsgálata. Ezek a tényezők lehetővé tennék az infrastruktúra működésének pontosabb modellezését, valamint az energiaellátás biztonságának részletesebb értékelését.

A centralitáselemzések alkalmazása

A hálózati centralitási mutatók (például fokszám-, közvetítési és közelségi centralitás) alkalmazása további fontos információkat adhat a hálózat szerkezeti jellemzőiről. Ezek az elemzések segítenének azonosítani azokat a kritikus csomópontokat, amelyek kiesése súlyos következményekkel járhat a katonai infrastruktúrák működésére nézve.

Sérülékenység- és szcenárióalapú elemzések

Az infrastruktúra sérülékenységének részletes vizsgálata különféle fenyegetési forgatókönyvek (például természeti katasztrófák, kibertámadások vagy szándékos

rongálás) alapján további hasznos eredményekhez vezethet. Ezek a vizsgálatok lehetővé tennék a potenciális kockázatok pontosabb feltérképezését és az előzetes kockázatsökkentési intézkedések kidolgozását.

Az alternatív energiaforrások és az önállósági lehetőségek vizsgálata

A jövőben kutatás irányulhatna arra, hogy a katonai repülőterek milyen módon tudnának önállóbbá válni energetikai szempontból. Az alternatív energiaforrások (például napenergia vagy decentralizált energiaellátó rendszerek) integrálása növelhetné az objektumok ellenálló képességét és csökkenthetné a civil infrastruktúrától való függőséget.

Hálózatfejlesztési stratégiák és javaslatok kidolgozása

A következő kutatási lépések során célszerű lenne kidolgozni konkrét fejlesztési javaslatokat az infrastruktúra hálózati kialakítására, amelyek hozzájárulhatnak a jelenlegi hálózati útvonalak optimalizálásához és a kritikus objektumok energiaellátási kockázatainak csökkentéséhez.

A fenti irányok követésével átfogóbb képet kaphatnak a kutatók a magyarországi katonai objektumok kritikus infrastruktúrával való kapcsolatáról, továbbá támogatni tudják a stratégiai tervezést, növelve a katonai létesítmények energiaellátásának biztonságát és ellenálló képességét.

THE LOCATION OF MILITARY AIRBASES IN HUNGARY RELATIVE TO POWER PLANTS

The aim of this study is to examine the geographical location of Hungarian military airbases in relation to domestic conventional (i.e. non-renewable, such as nuclear, coal, gas, etc.) power plants. The research explores spatial relationships and potential clustering between military airbases and power plants. Various spatial datasets and location patterns are analyzed, with consideration given to strategic, defense, and logistical factors. Understanding the connections between military airbases and power plants is of critical importance for national security, as the strategic value and potential vulnerability of power plants to attacks have a direct impact

on defense planning. Using graph theoretical methods, the authors examined the energy supply interdependencies of three military airbases – Pápa, Kecskemét, and Szolnok – with particular focus on comparing network structure and straight-line distances.

Keywords: military airbase, electric power, electricity, power plant, network, shortest path

Felhasznált irodalom

- BARABÁSI Albert-László (2016) *Network Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BUKTA Imre et al. szerk. (2023): *A magyar villamosenergia-rendszer 2022. évi adatai*. MEKH–MAVIR. Online: <https://www.mavir.hu/documents/10258/239341959/A+magyar+villamosenergia-+és+földgázrendszer+2022.+évi+adatait+bemutató+kiadvány.pdf>
- Distance Calculator* [é. n.]. Online: <https://www.distance.to>
- ENTSO-E* [é. n.]. Online: <https://www.entsoe.eu>
- ENTSOE_Grid_Map.pdf [é. n.]. *ENTSO-E*. Online: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/maps/2024/ENTSOE_Grid_Map.pdf
- Gephi* [é. n.]. Online: <https://gephi.org/>
- HARDIMAN, Jake (2025): Iberian Blackout Disrupts Flights in Spain & Portugal. *Simple Flying*, 2025. április 28. Online: <https://simpleflying.com/iberian-blackout-disrupts-flights-spain-portugal/>
- MAVIR – Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. [é. n.]. Online: <https://www.mavir.hu>
- NEWMAN, Mark E. J. (2010): *Networks: An Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- RINALDI, Steven M. – PEERENBOOM, James P. – KELLY, Terrence K. (2001): Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6), 11–25. Online: <https://doi.org/10.1109/37.969131>

A szimulációs rendszereken alapuló képzés, kiképzés lehetőségei, valamint hatékonyságának vizsgálata a Magyar Honvédség légierő haderőnem fegyvernemeinél és szakcsapatainál

Napjainkban egyre inkább teret nyernek a különböző digitális platformok bevonásai bizonyos kompetenciák fejlesztése és fenntartása céljából. A mai rohanó világban elengedhetetlen, hogy lépést tartsunk olyan korszerű technikákkal és kiképzési formákkal, amelyek segíthetik az adott fegyvernemet, hogy modernebb, költséghatékonyabb és biztonságosabb módon támogassák a képzést. A különböző szimulációs rendszereken alapuló technológiák a 21. században egyre inkább utat törnek maguknak, ami számos tudományterület ugrásszerű fejlődését tette lehetővé. Az ezen tudományterületekben rejlő potenciálok kiaknázása nélkül napjainkban már nem lehet lépést tartani a modern társadalommal és ezzel párhuzamosan a modern haderővel. Megvizsgálva a jelenlegi fejlődési ütemet mind hardveres, mind szoftveres viszonylatban azt találjuk, hogy alig 1-2 évente megkétszereződhet az aktuális fejlettségi szint, emiatt a téma folyamatos és alapos követése elengedhetetlen.

Kulcsszavak: 360°-os kamera, hatékonyság, AS-350B, helikopter, 3D modell

A tudományos probléma megfogalmazása

A repülési szegmens olyan, szoros biztonsági hálóban működő speciális terület, amelynek működését úgy a földön, mint a levegőben hatóságok felügyelik és irányítják. A hagyományos légi közlekedés rendszerének napjainkig ugyan voltak már bevált és jól működő szimulátoros rendszerei, de ezek gyors léptékű fejlődése, valamint e fejlődés nyomon követése újabb és újabb kihívás elé állíthatja az adott kiképző, üzemeltető szervezetet.

Elmondható, hogy a polgári légi közlekedés szakszemélyzetének képzésében a szimulátorhasználat már hosszú évek óta hatóság által akkreditált feltételrendszer mellett működik, ami a napi több millió utas biztonsága miatt elengedhetetlen. Az állami célú légi közlekedésben a szimulátorhasználat a tervezhető és garantált teljes kiképzettségi szint elérését teszi lehetővé, gyakran kevesebb repülési idő mellett.

Az állami és polgári repülésben egyaránt óriási problémát jelent a folyamatos pilótahiány. Az állami szférában az új típusok beszerzése és a hajózók előregedése miatt az elkövetkezendő években közel 200 pilótára lenne szükség, így a Magyar Honvédségben biztosnak kell lenni abban, hogy a teljes mértékben államilag finanszírozott képzési rendszerbe csakis olyan növendékek kerülnek be, akik minden szempontból alkalmasak, és képesek a teljes, akár négy fázisból álló többéves kiképzést elvégezni. A jelenlegi struktúra miatt gyorsan volna szükség nagy létszámú teljesen kiképzett hajózárra, azonban az elmúlt 50–60 évhez képest jelentősen kevesebb oktató és repülőeszköz áll rendelkezésre, így felértékelődnek az olyan alternatív rendszerek alkalmazásának lehetőségei, amelyek kompenzálni tudják ezen akadályokat.

Ilyen nehezítő körülmény lehet továbbá, hogy a jelenlegi fiatal nemzedék már nem tekinti élethivatásának a pilótapályát, így jelentősen megnőtt a fluktuáció. Ennek elkerülése érdekében pedagógiai értelemben véve is a rendelkezésre álló lehetőségek legszélesebb palettájából kell meríteni, így a szimulátorok fontossága is hatványozódik.

Számos kérdés merül fel e témakör körül, többek között a rendszerszintű kialakítás eljárásai és a hatékonysági fok mérése. Miként lehetne az újonnan beszerzett és már rendszerben lévő szimulátorokat a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen nemrégiben újraindult állami légijármű-vezetői szakos hallgatók számára a képzésben hasznosítani. Javítható-e a beiskolázott pilótajelöltek beválása és rendszerben tartása. Integrálásukkal elősegíthető-e a kiválasztás optimalizálása és a repülő-kiképzésben dolgozó oktatók munkaterhelésének ideális mértékre csökkentése, valamint milyen mértékben szolgálhatja a Magyar Honvédségben (MH) szolgáló légijármű-vezetők jártasságfenntartását a hajózó növendékek kiképzése mellett.

Kutatási célkitűzések

A különböző szimulátorok és alternatív valóságok alkalmazásának elképzelése a hajózók kiképzésében viszonylag újszerű gondolat, hazai gyakorlati megvalósításra jelenleg még nincs példa. Első lépcsőfokként azonban a cél a megfelelő szimulátorok és szimulációs módszerek felkutatása, integrálhatóságuk metodikájának kidolgozása, majd azok kiterjesztése, legvégül a javaslattétel a végrehajtásba történő áttételre. Emiatt az egyéb iparágakban összegyűjtött katonai és polgári tapasztalatok összegzése, az ott szerzett eredmények feldolgozása és elemzése, valamint ezek témába vágó áttételése szolgálhat a kutatómunka alapjául. Az alapozó időszak további tervei között szerepel az egységes szakterminológia kidolgozása is.

Kiemelt célkitűzés az olyan szimulációs technológiákon alapuló kiképzési tematika kidolgozása, amely optimalizálja a jelenlegi állami légijármű-vezetői szakképzés struktúráját, valamint ezzel egy időben csökkenti a repülésbiztonsági kockázatokat, az emberi tényező kitéttését a repülésben, illetve költség- és energiamegtakarítást tesz lehetővé. Kiemelt jelentőségű terület a katonai hajózók kiképzése, utánpótlása és jártasságfenntartása egymásra gyakorolt hatásainak vizsgálata, és olyan ajánlások megfogalmazása, amelyekkel a Magyar Honvédség szakmai, szakdiplomáciai törekvései támogathatók. Mindezekben túl fel kell tárnunk, ki kell mutatni azokat a területeket, amelyek nemzetközi és hazai szinten további, részletesebb kidolgozást igényelnek.

Kutatási eredmények

A Katonai Műszaki Doktori Iskolában eltöltött első két évben számos eredményt sikerült elérni. A kutatásban kiemelt szerep jut az időmenedzsmentnek, ugyanis a legtöbb kísérletet és megfigyelést több éven át kell végezni, újabb és újabb légijármű-vezető szakos hallgatói tancsoportok bevonásával. Az elvégzendő kísérletek végcéljaikban megegyeznek, de felépítésükben és részleteikben több ponton is eltérnek.

Kutatási hipotézisek

Ezen vizsgálatok célja igazolni a kutatás első szakaszára vonatkozó hipotéziseket, amelyek a következők:

A kutatás első szakaszára vonatkozó hipotézisek:

1. A szimulációs rendszereken alapuló technológiák integrálása optimalizálja a forgószárnyas kiképzést.
2. A Digital Combat Simulator (DCS), valamint a Microsoft Flight Simulator (MFS) mint szórakozást célzó szimulátor alkalmazható a légijármű-vezető kiképzésének kezdeti fázisában.
3. Az MI-17 FTD mint eltérő típusú akkreditált szimulátor is effektíven felhasználható a légijármű-vezetők kiképzésében AS-350B könnyű kiképző-helikopteren.
4. A virtuális tér használata nagyban segíti a kiképzendő légijármű-vezetők elméleti felkészítését.

A kutatás második szakaszára vonatkozó hipotézisek:

1. A gyakorlati repülőgépvezető-kiképzés egymásra épülő moduljainak időtartama szimulátorok alkalmazásával egységesíthető.
2. Definiálhatók és fejleszthetők azok az alapvető repülőgép-vezetéshez szükséges részképességek, amelyek civil felhasználású játékszoftverek segítségével önképzés keretein belül használhatók.
3. A virtuális valóság alkalmazásával elérhető élményszerű tanulási folyamat a kiképzés előrehaladásának hatékonyságát javítja.
4. Az alapvető repülési képességek megértéséhez és elsajátításához nem szükséges típusazonos szimulátort alkalmazni.

Szakirodalmi áttekintés és kutatási előzmények

Számos szakirodalmat feldolgozva elmondható, hogy több kutató foglalkozik ezzel a témával hazánkban is, de érdemi előrelépés eddig nem történt. Sokatmondó kutatási eredmények és publikációk születtek, amelyek irányt mutattak a jövőbeli optimalizált kiképzés elősegítéséhez, azonban valami mégis gátat szabott a kialakításának. A kutatások során törekedni kellett ezen akadályok felderítésére és leküzdésére. A problémakört alapvetően gondosan feltérképezték, és szakszerű kísérletekkel igazolták is a kutatók, ám sok esetben hiányzott a különböző tudományterületek összehangolása, így az összegzett kép felmutatása is. Megfigyelve az elmúlt két év saját kísérleteinek eltérő mivoltát azokat ugyanazon kísérleti csoportokon végezték el, ezáltal megfigyelve, hogy tényleg az összehangoltság hiánya okozhatta-e a problémát.

Elvégzett kísérletek

Az elvégzett kísérletek a következők voltak:

- A Nemzeti Közszerződési Egyetemen tanuló légijármű-vezető szakos hallgatók (azon belül is a helikopteres szakirány) otthoni felhasználás szimulátorokkal (Digital Combat Simulator és Microsoft Flight Simulator) történő felkészítése az akkreditált MI-17 FTD használata előtt.
- Gyakorlati kísérletek MI-17 FTD akkreditált szimulátorral az optimális szimulátorhasználati időtartam meghatározásához a földi felkészítés alatt.

- Insta360-kamerafelvételek készítése és a felvételek VR-szemüveggel való összehangolása az elméleti oktatás hatékonyságának növelése érdekében.
- 3D modell elkészítése az AS-350B könnyű kiképzőhelikopterről, amelyet a tanulási nehézségek megkönnyítése érdekében készítettek.

Az első részeredményeket egy korábbi publikációban már ismertettük, így azokra részletesebben most nem térünk ki, továbbá jelen írásban mindössze az első két vázlatpontot mutatjuk be. Azóta a kísérlet természetesen tovább folytatódott, és egyre inkább beigazolandni látszik, hogy azon diákok, akik saját szabadidejüket rááldozzák a szoftverek használatára (megfelelő licenzek hiányában csak az önképzés keretein belül történő felhasználás engedélyezett), jelentős készségbeli fejlődést mutattak nagyon rövid időn belül. A növendékek megszerezték azokat az alapvető izommemória-beidegződéseket, amelyek a helikopteres repülés alapjaihoz szükségesek. Ez jelentős gyakorlati eredménynek mondható, hiszen igazolható, hogy gamifikáció által lehetőség van nehezen megszerezhető kompetenciák (például a helikoptervezetés) elsajátítására.

A szimulátorhasználati időtartam optimalizálása

A második kísérletet már az elmúlt két évet megelőzően is elkezdtük vizsgálni, igaz, akkor még konkrét vizsgálati cél nem volt, de az ott szerzett tapasztalatok nagymértékben segítik a mostani kutatás eredményességét. A jelenlegi cél azon időintervallum meghatározása mint standard szimulátoridő, amely megmutatja, mennyi repült órára van szüksége egy hallgatónak a szimulátorban ahhoz, hogy a valós repülés megkezdésekor stabil alapokkal rendelkezzen, és képes legyen abszolválni a képzést. Ez a valóságban annyit jelent, hogy a növendék az első pillanattól kezdve otthonosan mozog a fülkében, mentálisan felkészült és nyugodt, ismeri a helikopteres repüléshez szükséges kormány szervkezelést, az előírt feladatokat sikeresen teljesíti, de legfőképpen nem kérdőjelezhető meg az alkalmassága mint gépparancsnok.

Természetesen a valós típuson történő repüléseket rengeteg olyan tényező befolyásolja, amely a szimulátorban nem hozható létre, ennek ellenére kijelenthető, hogy van összefüggés a szimulátorban eltöltött idő és a valós repülés eredményessége között. Az ehhez köthető időtartam meghatározása ezáltal a kutatás egyik célja. A folyamatosság elvét követve és felhasználva a kezdeti tapasztalatokat az alábbi eredmények születtek a cikk megírásának pillanatáig.

Az első tancsoport eredményei

Az első tancsoport vizsgált tagjai (akik korábban használtak otthoni szimulátort is) megközelítőleg 25–30 órát töltöttek a szimulátorban, amely során már nemcsak alapvető finommotorikus készségeket sajátítottak el, amelyek minimálisan szükségesek a biztonságos repüléshez, hanem előrehaladó és műrepülő elemeket is végre tudtak hajtani. Azon hallgatók ellenben, akik nem játszottak otthon, kevésbé voltak motiváltak az MI-17 FTD-ben, így kevesebb órát is (körülbelül 10–15 órát) töltöttek ott. Ez annak tudható be, hogy az akkreditált szimulátorban az ott töltött idejük nagy részét főleg az alapok elsajátítása tette ki, és ez – látva a velük egy időben már jóval előrébb járó társaikat – kihatással volt rájuk.

A valós repülés során a 25–30 órával rendelkező hallgatók az első órában biztonságosan és önállóan kezelték a kormánysszerveket, képesek voltak fel- és leszállni, illetve különböző függési gyakorlatokat végrehajtani, ami a megelőző évek tapasztalatai alapján csak 5–10 óra után volt elmondható. Összegezve ennél a tancsoportnál a 25–30 óra csak az önszorgalom miatt kiemelendő, azonban ekkora mennyiségű repült óra egyrészt nagy létszámú csoportnál rengeteg időt venne igénybe (ami reálisan nem kivitelezhető), másrészt a valós repülés megkezdésekor nem elvárható az előrehaladó feladatok és végképp a műrepülés végrehajtása.

A második tancsoport eredményei

A második tancsoport diákjai esetében szintén elkülönítve vizsgáltuk a hallgatókat aszerint, kik használtak, és kik nem otthoni szimulátort. A kísérletben csupán az tért el, hogy itt mindössze már csak 5 órát tudtak a szimulátorban tölteni (az egyre nagyobb szimulátorleterheltség miatt). Itt már szignifikánsan megmutatkozott, hogy az otthoni fejlesztés markáns segítség az egyén számára. A lecsökkentett óraszám miatt azok, akik kezdettől fogva otthonosan mozogtak a fülkében, sokkal gyorsabban felvették a fonalat, és 1-2 óra után már alapvető összetett feladatokat (iskolakör, légtérfeladatok) is el lehetett kezdeni velük. A fel- és leszállás stabil volt, valamint képesek voltak precíz függést végrehajtani. A csoport többi tagja az öt óra alatt a fel- és leszállás fázisáig jutott, illetve a függés feladatához köthető alapmozdulatok végrehajtására volt képes.

Összegezve itt elmondható, hogy az ötórás időtartam már a nagyobb létszámú (ebben az évben 9 fő) csoportok esetében, ha szűkösen is, de elegendő. Ehhez azonban számos olyan feltételnek kell teljesülnie, amely sok esetben nem áll

rendelkezésre (mint például megfelelő számú oktató vagy a szimulátor elérhetősége). Ezenfelül ez az időintervallum már realisabb számot takar, ugyanis a valós repülés megkezdésekor az első 1-2 órában már biztonságos végrehajtás volt tapasztalható, néhány apróbb bizonytalansággal azoknál a hallgatónál, akik rendelkeztek otthoni idővel. A többiek esetében elmondható volt, hogy 3–5 óra alatt jutottak el ezen szint közelébe, viszont a szimulátorozás előtti időkből tapasztaltakhoz képest ez is jelentős eltérés. Azonban a pontos cél meghatározása érdekében a következő tancsoportnál ennél is kisebb óraszám alkalmazása volt indokolt.

A harmadik tancsoport eredményei

A harmadik tancsoport esetében a kísérlet alapjai megegyeztek a korábbiakkal, azonban ahogy a kutatás haladt előre, néhány kísérőelemet is bevezettünk. Ez azt jelenti, hogy az otthon szimulátort használó hallgatók már oktatói iránymutatást kaptak, virtuális tanpályát hoztunk létre nekik a szoftverben, és célirányos feladatokat hajtottak végre. Ennek célja az volt, hogy megvizsgáljuk, miként csökkenthető tovább az FTD-szimulátoridő úgy, hogy az ne menjen az eredményesség rovására egyetlen hallgató esetében sem.

Az akkreditált szimulátorban mindössze három órát töltöttek, ám ez is elegendőnek bizonyult, hogy szembetűnő eredmények szülessenek. Azok a növendékek, akik végigcsinálták az otthoni modult, három óra alatt is produkálták az elvárható szintet az MI-17 FTD-ben. A többiek azonban nem voltak képesek ugyanezen szint megközelítésére sem. Bár robotpilóta segítségével többé-kevésbé tudták kezelni a szimulátort, annak kikapcsolására teljes káosz alakult ki. A valós AS-350B repülés során az otthoni modult is végrehajtók körében szintén megfigyelhető volt a stabilitás az első perctől kezdve, így esetükben a fentebb említett időintervallum elegendőnek mondható, ellenben a többi növendék csupán 4-5 óra után kezdett el felzárkózni. Elmondható, hogy a háromórás időtartam csakis olyanok esetében alkalmazható eredményesen, akik rendelkeznek előzetes ismeretekkel, ellenkező esetben minimum 5 óra szükséges a stabil alapok elsajátításához.

Konklúziók a kísérletek alapján

Konklúzió ennél a kísérletnél több részben is levonható. Egyrészt igazolást nyert, hogy az otthoni használatra készült játékszoftverek jelentősen befolyásolhatják

az egyén valós képességeit még az olyan komplikált közegekben is, mint a repülés. Ezen szimulátorok használata felgyorsíthatja a kiképzés menetét a repülésbiztonsági kockázatok növelése nélkül. Korábbi idők tapasztalataiból kiindulva már néhány óra szimulátorban töltött idő is jelentős előrelépés bizonyos képességek kialakulásának tekintetében, azonban a célirányosan felépített, modulokra épülő és virtuális rendszereken alapuló technológiákkal kiegészített kiképzés olyan optimalizált rendszert vetíthet előre, amely költség- és időhatékony, figyelembe veszi a humánerőforrás-menedzsment szempontjait, valamint előtérbe helyezi a repülésbiztonságot.

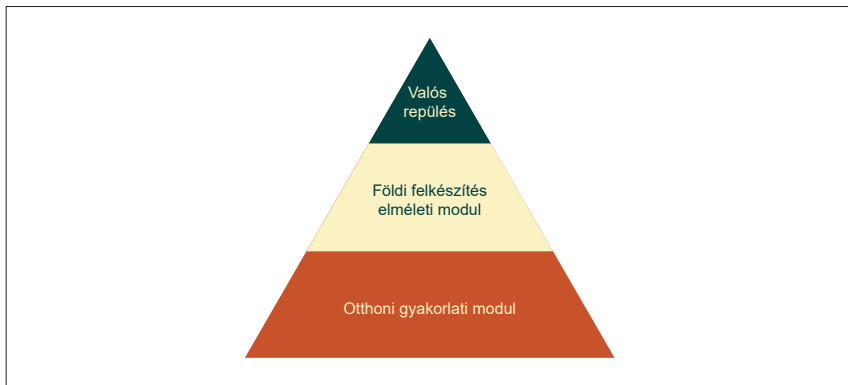
Bár a civil szférában a szimulátorok használata mindennapos, az ilyesfajta megközelítés még viszonylag új keletűnek mondható. Levonható következtetés továbbá, hogy bár az MI-17 FTD akkreditált szimulátor eltér a valós repült típustól, mégis magas hatásfokkal alkalmazható a kiképzés során. Ezáltal kijelenthető, hogy a típusazonosság nem feltétel egy hatékony kiképzés bevezetésénél és fenntartásánál, annak kezdeti fázisában. Végző soron eredményként felmutatható, hogy a 3–5 órás akkreditált szimulátoridő tekinthető annak az optimális tartománynak, amely alatt egy hallgató képes olyan szintre eljutni, hogy garantálható legyen a képzés sikeres elvégzése.

A moduláris kiképzési rendszer fejlesztése

Bár a kísérlet során meghatározó eredmények születtek, felettébb szükséges további vizsgálatok elvégzése is. Egy moduláris képzés kialakításához szükséges maguknak a moduloknak a meghatározása is, valamint azon elemek definiálása, amelyek felépítik azokat. A moduláris rendszer tervezett fázisait a 9.1. ábra szemlélteti.

Otthoni modul

A felvázolt piramis legalsó és legnagyobb részét tölti ki ez a modul, ugyanis rendkívül lényeges, hogy kedvet kapjon a növendék a forgószárnys repüléshez, ami után eltökéltséggel és motiváltan fog viszonyulni a további képzésekhez. Az otthoni modul megnevezés nem feltétlenül a saját lakóhelyre értendő, hanem bármely olyan helyre, ahol a hallgató megfelelő munkaállomást alakít ki magának. Fontos szempont, hogy nyugodt környezetben tudja használni a szoftvert, és



9.1. ábra. A forgószárnyas kiképzés
moduláris felépítésének tervezete
Forrás: a szerzők szerkesztése

lényeges, hogy ezt ne kötelező feladatként vagy elvárásként értelmezze, hanem öncélú szórakozásként. Ez a gamifikációs tanulási folyamat egyik lépcsőfoka és építőeleme. A növendék egyre nehezedő feladatokat teljesít, amelyek során sikerélményben van része (lásd 9.2. ábra).

Lehetőség van kooperatív módon összekötni a játékosokat, ezáltal közösség-építő jelleg is megfigyelhető, valamint a felhasználók közösen tudnak problémákat megoldani. Amikor a növendék nehézségbe ütközik, oktatói segítséget kap, de nem közvetlenül a megoldást, hanem az ahhoz vezető oktatóvideót vagy illusztrációt. Ennek célja, hogy ezáltal a hallgató önmaga próbáljon rátalálni a hiba forrására, így a problémamegoldó képességei is fejlődnek, a megszerzett tudás pedig jobban elmélyülhet. Ha teljesítik a megadott szinteket és feladatokat, azt képernyővideóval kell hogy igazolják az oktatók számára.

A szoftver rögzíti a szimulátorban eltöltött repülési időt és a repülési paramétereket. Elemezhető a repülési folyamat, az ott elkövetett hibák és pozitívumok egyaránt. Ennél a modulnál fontos, hogy első körben a pozitívumokra koncentráljanak a kiértékelés során, hogy ezzel is további motivációt szerezzen a hallgató. Az eddigi tapasztalatok alapján a játék hatására olyan mélyen ásták bele magukat a hallgatók a helikopteres repülés részleteibe (köszönhetően a helikopteres repülés nehézségeinek), hogy a földi felkészítés megkezdésekor már rendelkeztek aerodinamikai és repüléstechnikai alapokkal, ami jelentősen segítette és felgyorsította a földi felkészítést.



9.2. ábra. Leszállási feladat mozgó rombolóra

Forrás: Screenshots [é. n.]

Földi felkészítés – elméleti modul

A helikopteres alapkiképzés második állomása a földi felkészítés. Ebben a fázisban kezdődik meg a hallgatók típusspecifikus felkészítése a kiképzőhelikopterre és a valós repülésre. Az elméleti fázis tartalmazza azokat az ismereteket, amelyek nélkülözhetetlenek a biztonságos repülés megkezdéséhez (meteorológia, különleges esetek, rádiólevezetés stb.). Azonban csupán néhány éve (az MI-17 FTD beszerzése óta) tartalmaz ez a fázis szimulátorhasználatot is. Kiemelendő ellenben, hogy konkrét levezetési terv magára a szimulátorban eltöltött időre és feladatokra nem áll rendelkezésre. Ennek oka többértű:

- Viszonylag újnak mondható a szimulátor.
- Nem típusazonos a valós típussal, ezáltal kételyeket vetett fel a hasznossága az alapkiképzésben (árt vagy használ?).
- Az eddig hivatalosan elfogadott és aláírt levezetési terv nem tartalmazta.
- Oktatóhiány: humán szempontból amíg a hallgatók körülbelül 30 percenként váltják egymást, és pihennek, addig az oktatóknak több órát is bent kell tölteniük, ami egy idő után rosszullétet okozhat.
- Szimulátorleterheltség: egyre több külföldi hajózáscsoport továbbképzése zajlik a szimulátorban, illetve a hazai pilóták jártasságfenntartás céljából itt hosszabbítják meg lejáró feladataikat.

Az elmúlt három év kísérleteinek és tapasztalatainak hatására azonban sikerült elérni, hogy a hivatalos levezetési terv immár tartalmazza a szimulátorhasználatot, továbbá a valós repülés során kiderült, hogy szignifikánsan befolyásolja a hallgatók motorikus képességeit, így a típusazonosságból fakadó kételyek is eloszlanak látszanak. Ebben a modulban tehát az elméleti ismeretek elsajátítása és az otthoni modulban szerzett tapasztalatok szimulátorban történő továbbfejlesztése valósul meg.

Valós repülés

Utolsó lépcsőfokként azok a hajózójelöltek, akik eredményes elméleti vizsgát tesznek, megkezdhetik az AS-350B típuson történő gyakorlati repülésüket. Ez a típus világszinten elismert helikopter, amely felhasználóbarát, könnyen kezelhető és rendkívül strapabíró, ezáltal kiképzőhelikopternek elsőrangú. A kísérletek azt mutatták, hogy a tervezett moduláris felépítés egyirányú, mivel a valós repülés megkezdése után az akkreditált szimulátor használata inkább zavaró lehet, mintsem effektív. Ennek oka, hogy míg a szimulátoron elsajátított alapokat a valós típuson finomítják, addig ez visszafelé csak rontja a már megszerzett finommotorikus beidégződéseket. Ellenben új repült elemek begyakorlására, amelyeket a valóságban még nem próbált a növendék, továbbra is eredményes a szimulátor.

További javaslatok

A kutatások során számos elképzelés megvalósíthatóságának vizsgálatát végezték el, és fogják elvégezni a jövőben, hogy racionális és igazolható eredményeket mutathassanak fel. A megfogalmazott ajánlásokhoz köthető tervezetek a következők:

- A moduláris felépítés hatékonyságának bizonyítása.
- További részelemek integrálása a földi felkészítés fázisába, úgymint 3D oktatómodell használata és 360° felvételek VR-térben történő alkalmazása.
- Levezetési terv és értékelési szempontrendszer kidolgozása az MI-17 FTD szimulátorban eltöltött időtartamra.

Természetesen a tanulmány elején felsorolt hipotézisek alátámasztásához további vizsgálatok szükségesek, azonban részeredmények már sikerrel felmutathatók. A kutatást és a kapcsolódó vizsgálatok várható eredményeit tudományos értekezés,

konferencia-előadások és szakmai cikkek formájában publikáljuk a választott témakörben magyar, illetve angol nyelven.

A kutatás eredményeinek hasznosíthatósága

A kutatás eredményeként tett ajánlások és javaslatok eredményesen felhasználhatók lesznek a repülés világában – beleértve az állami és a polgári célú felhasználást egyaránt –, elősegítve és tovább fokozva a kiképzések hatékonyságát. A moduláris rendszer alkalmazása révén jelentős költségmegtakarítás érhető el, miközben a kiképzés minősége és biztonsága nem csökken, sőt bizonyos területeken javul.

A gamifikáció alkalmazása a kiképzésben új perspektívákat nyit meg, különösen a fiatalabb generáció motiválásában. Az otthoni szimulátorok integrálása a hivatalos képzési rendszerbe olyan hibrid modellt eredményez, amely ötvözi a hagyományos és a modern tanulási módszereket.

Összegzés

Összegezve elmondható, hogy a világ jelenleg rohamtempóban a digitalizáció és a virtuális tér irányába tolódik. Ennek részei vagyunk, ezáltal szükségességé válik a jelenlegi rendszer folyamatos monitoringja és szükség esetén felülvizsgálata. A kutatás célja az, hogy segítse a kiképzés fázisaiban részt vevő állomány mindennapjait, biztonságosabbá és hatékonyabbá tegye a helikopteres alapkiképzést azáltal, hogy megvizsgálja a modern technológiák adta lehetőségeket, kísérletek útján meghatározza a racionális részeket, majd ajánlásokat tesz egy saját tematikára.

A szimulációs technológiák fejlődése és alkalmazása a katonai légierő kiképzésében már nem opcionális lehetőség, hanem elengedhetetlen szükséglet. A kutatás eredményei azt mutatják, hogy a megfelelően strukturált és moduláris felépítésű szimulátoros képzés jelentősen javíthatja a kiképzés hatékonyságát, csökkentheti a költségeket és növelheti a repülésbiztonságot. A továbbiakban szükséges a kutatások folytatása és a rendszer további finomhangolása a gyakorlati tapasztalatok alapján.

EXAMINING THE POSSIBILITIES AND EFFECTIVENESS OF TRAINING BASED ON SIMULATION SYSTEMS FOR ARMS AND TROOPS OF THE HUNGARIAN AIR FORCE

Nowadays, the involvement of various digital platforms is increasingly gaining ground for the development and maintenance of certain competencies. In today's fast-paced world, it is essential to keep up with modern techniques and training forms that can help the given branch of the armed forces to support training in a more modern, cost-effective and safer way. Technologies based on various simulation systems are constantly making their way in the 21st century, which has enabled the rapid development of many scientific fields. Without exploiting the potential inherent in these scientific fields, it is no longer possible to keep up with a modern society and, in parallel, a modern military force. Examining the current pace of development in both hardware and software terms, we find that the current level of development can double in barely 1-2 years, which is why continuous and thorough monitoring of the topic is essential.

Keywords: 360° camera, efficiency, AS-350B, helicopter, 3D model

Felhasznált irodalom

- BALI Tamás (2016): *Helikoptervezetők kiválasztása és kiképzésének korszerűsítése*. PhD-értekezés. Szolnok: Nemzeti Közszerológáti Egyetem. Online: https://www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/bali_tamas_thu.pdf
- BALI Tamás (2011): Szimulátorok alkalmazása a légijármű-vezetők kiképzésének támogatásában. *Repüléstudományi Közlemények*, 23(3), 45–58.
- BALCERZAK, Tomasz – KOSTUR, Katarzyna (2018): Flight Simulation in Civil Aviation: Advantages and Disadvantages. *Revista europea de derecho de la navegación marítima y aeronáutica*, (35), 35–67.
- BOJOR, Lavinia (2024): Game-Based Learning in Modern Military Education: Digital Wargaming as a Tool for Tactical Training. *International Conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, 30(2), 107–113. Online: <https://doi.org/10.2478/kbo-2024-0060>
- DOMJÁN Károly (2017): A légierő számára kialakítható moduláris szimulációs környezet kialakításának lehetőségei, képességek megszerzéséhez, fenntartásához és eljárások tökéletesítéséhez. *Repüléstudományi Közlemények*, 29(2), 401–414.
- DOMJÁN Károly (2018): A virtuális valóság hardveres és szoftveres környezet kialakításának, fejlesztésének és alkalmazhatóságának lehetőségei repülőorvosi környezetben. *Repüléstudományi Közlemények*, 30(2), 163–176.
- MCCAULEY, Martin E. (2006): *Do Army Helicopter Training Simulators Need Motion Bases?* Technical Report 1176. United States Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA444549.pdf>

- MENDES, Joice B. – RAMOS, Alexandre C. B. – MORA-CAMINO, Felix (2014): Low Cost Helicopter Training Simulator: A Software Case Study from the Brazilian Police. *International Journal of Computer Science and Artificial Intelligence*, 4(2), 45–53. Online: <https://doi.org/10.5963/IJCSAI0402003>
- NÉGYESI Imre (2023): A virtuális valóság technológiai alkalmazásának lehetőségei a katonai képzésfejlesztésben. *Hadtudomány*, 33(2), 3–16. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2023.33.2.3>
- NÉMETH András – VIRÁGH Krisztián (2021): Virtuális valóság és haderő – fejlődéstörténet I. rész. *Haditechnika*, 55(2), 5–12. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.55.2.02>
- Screenshots [é. n.]. *Digital Combat Simulator*. Online: <https://www.digitalcombatsimulator.com/en/downloads/screenshots/>
- SZABÓ László (2001): *A virtuális valóság alkalmazásának didaktikai és szakmai kérdései, különös tekintettel a repülő szakemberek képzésére a MH-ban*. Online: <http://www.mmo.njszt.hu/Kiadvanyok/2001/CIKKEK/szabo.pdf>
- VIRÁGH Krisztián (2020): A virtuális valóság (VR) technológiáinak alkalmazási lehetőségei, különös tekintettel a katonai aspektusokra. In POHL Árpád (szerk.): *Biztonság és honvédelem. Fenntartható biztonság és társadalmi környezet tanulmányok II.* Budapest: Ludovika, 1011–1060.
- YAMAMOTO, Gonca Telli – ALTUN, Deniz (2021): Virtual Reality (VR) Technology in the Future of Military Training. *Çağ Üniversitesi Uluslararası Güvenlik ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1(1), 79–93.

A járműtüzek vizsgálatához alkalmazható számítógépes szimulációk áttekintése

A járműiparban ma már elengedhetetlen a számítógépes szimulációk használata a tervezés és a gyártás teljes folyamatában. A szimulációk alkalmazásával jelentősen csökkenthetők a költségek, azonban ehhez elengedhetetlenek a pontos adatok, a megelőző mérések, amelyek megbízható eredményeket hoznak. A jelenleg is átalakuló járműiparban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a biztonságra, amelynek egyik szegmense a járművekkel kapcsolatos tüzeseteké, amelyek nagy biztonsági kockázatot jelentenek. A járműtüzek vizsgálatában segítséget nyújthat a tüzek szimulációja. Az elmúlt években sajnos csak kevés kutatás foglalkozott a tüzesetek modellezésével, a tűz terjedésének numerikus vizsgálatával, valamint a különböző szimulációs módszerek alkalmazhatóságával. Jelen tanulmány célja a már korábban publikált járműtüzesetek tűzszimulációinak esettanulmány-elemzése. A vizsgálat során több nemzetközi forrásból származó szimulációs eredményt hasonlítottunk össze, értékeltük a felhasznált bemeneti paramétereket, valamint a szimulációk gyakorlati alkalmazhatóságát. Az elemzés célja a különböző modellezési megközelítések erősségeinek és korlátainak feltárása, amelyek hozzájárulhatnak a tűzoltási stratégiák fejlesztéséhez és a járművek tűzbiztonságának növeléséhez.

Kulcsszavak: tűzbiztonság, FDS, járműtűz, tűzszimuláció

Bevezetés

Már az 1960-as években alkalmaztak numerikus módszereket a járművek dinamikájának teszteléséhez, amelyhez tartozott többek között a felfüggesztés, a lengéscsillapítás vagy az úttartás vizsgálata. A 60-as évek végére elterjedt a CAD (*computer-aided design*) kifejezés, azaz a számítógépes tervezés, amelynek matematikai alapjait a francia Renault egyik mérnöke fektette le (Bézier Award [é. n.]). Az 1980-as években már elterjedtek az ipari számítógépek, amelyek segítségével 3D rajzokat készíthettek (GINDIS 2012). Hamar felismerték, hogy a szoftveres térben akár szimulációk is lefuthatnak, és ezzel kiválthatják a valós vizsgálatokat.

A valós vizsgálatok helyett készített szimulációk alkalmazásával jelentős költségmegtakarítással fejleszthettek, tesztelhettek és validálhattak a gyártók.

A számítógépes szimulációk olyan folyamatok vizsgálatát is lehetővé tették, amelyek valós körülmények között nehezen vagy egyáltalán nem figyelhetők meg. Ilyenek például a töréskeresztek, az áramlástan, hőtechnikai és akusztikus vizsgálatok, valamint az extrém események, mint például a járműtűzek modellezése is. Ezek egy része a komfortérzetet növeli, hozzáad a jármű esztétikájához, de fontos szerepet játszanak a járművek biztonságos közlekedésében is.

A biztonságra már a kezdetek óta nagy hangsúlyt fektetnek a gyártók. Az Egyesült Államokban már 1968-ban szabványban rögzítették, hogy milyen tűzbiztonsági paramétereknek kell megfelelnie az üzemanyagtanknak ütközés után (49 CFR § 571.301 *Standard No. 301; Fuel system integrity*). A beltérbe épített anyagok vízszintes tűzterjedésének vizsgálatát pedig 1971-ben vezették be, és ez a szabvány a mai napig érvényben van kisebb módosításokkal (49 CFR § 571.302 *Standard No. 302; Flammability of Interior Materials*).

A járműtűzek vizsgálatában a következő mérföldkő az alternatív hajtásláncok megjelenése volt, ugyanis ezek új veszélyeket hordoznak magukban. Az új típusú energiaforrások, mint a népszerű lítiumion-akkumulátorok, más veszélyt jelentenek tűzbiztonsági szempontból, mint a hagyományos belső égésű motorral szerelt járművek. Emellett fejlesztik az üzemanyagcellákat, és korábban már elterjedtek a cseppfolyós gázzal üzemelő járművek is. A felsoroltakból látható, hogy milyen sokszínűek lehetnek a járművek a hajtástechnológia és az üzemanyagtípusok tekintetében.

Ezen okok miatt szükséges a járműtűzek alapos elemzése, akár kategóriákra lebontva. A tűz kialakulásának, fejlődésének és terjedésének vizsgálata komplex folyamat, ezek modellezése csak megbízható bemeneti adatok és megfelelően kiválasztott numerikus módszerek segítségével lehetséges. Ebben játszhatnak kulcsszerepet a számítógépes tűzszimulációk. A szimulációk használatával lehetőség adódik a különböző kockázatok azonosítására, valamint a tűzoltási és mentési eljárások optimalizálására.

Jelen tanulmány célja, hogy áttekintést adjon a számítógépes szimulációk járműtűzekkel kapcsolatos alkalmazásairól, különös tekintettel a járműmodellekre, az alkalmazott szoftveres megoldásokra, valamint a szimulációs eredmények megbízhatóságának kérdésére. Továbbá kiemelt figyelmet fordítunk arra, hogy a szimulációk miként járulhatnak hozzá a járműbiztonság növeléséhez, illetve hogyan segíthetik a mérnökök munkáját a megelőzés és a kárenyhítés területén.

A járműtüzek áttekintése

A járműtüzekkel kapcsolatos kutatások időszerűek, ugyanis a járművek biztonsága kiemelt figyelmet kapott az elmúlt évtizedekben. Már korábban is különböző meghajtású járművek közlekedtek a forgalomban, azonban a modern elektromos meghajtások megjelenésével még nagyobb kihívást jelentenek a járműtüzek. A járműveket érintő tüzek vizsgálatakor fontos meghatározni azok keletkezési okát, ugyanis a szimulációban is meg kell határozni a tűz forrását.

Meg kell különböztetni a szándékos és a nem szándékos eredetűt, ugyanis az utóbbi jóval gyakoribb. Az Egyesült Államokban a közúti járműtüzek mindössze 5%-a köthető gyújtogatáshoz (Highway Vehicle Fires [2014–2016] 2018), míg Magyarországon ez a szám még ennél is alacsonyabb (PAPP–KERSÁK 2023). A tűz keletkezési helyének és okának megállapítása a gyakorlatban sokszor kihívást jelent vagy egyáltalán nem lehetséges, mivel a tűz gyorsan terjed, így annak nyomai, bizonyítékai hamar megsemmisülhetnek. Gyakran előfordul, hogy a keletkezési ok ismeretlen marad. A tűz keletkezési helye azonban utalhat adott alkatrész vagy rendszer meghibásodására (KANYÓ 2018).

A leggyakoribb okok közé tartozik a hibás elektromos hajtásrendszer, az üzemanyag-ellátó rendszer, valamint a forró felületekkel érintkező gyúlékony anyagok. A benzin magas párolgási hajlama miatt különösen tűzveszélyes, míg a gázolaj kevésbé az. A benzin- és a gázolajüzemű járműveknél is jellemző probléma az üzemanyag-befecskendező rendszer meghibásodása.

A modern járművek alternatív hajtásláncai, mint az elektromos és hibrid rendszerek, újabb veszélyforrásokat jelentenek. Az átlagosnál (12–48 V) jóval magasabb feszültséggel (480–1200 V) működő rendszerek és lítiumion-akkumulátorok meghibásodása számos tüzesetet okozott már. Az elektromos járművek esetében a töltés közbeni kigyulladás gyakoribb, míg a hibrideknél a menet közbeni tüzek dominálnak.

Az akkumulátorral kapcsolatos tüzek kialakulhatnak túlmelegedés, rövidzárlat, fizikai sérülés vagy az akkumulátorfigyelő rendszer, azaz a BMS zavarai miatt. A kisebb részegységek, mint például az akkumulátor-előmelegítő meghibásodása, a sérült kábelrendszerekből származó szikrakisülések is okoztak már tüzeseteket.

A hagyományos hajtású járművek esetében a baleset következtében kifolyó üzemanyag vagy kenőanyag meggyulladhat, különösen ha forró felülettel vagy elektromos szikrával érintkezik. A segédanyag-tartályok gyakran a motortérben, az ütközési zónákhoz közel helyezkednek el, így könnyen sérülhetnek. Az autóbusz- és tehergépjármű-tüzek fő okai között az elektromos meghibásodások, a fékrendszer

túlmelegedése és a motortéri alkatrészek hibái szerepelnek. A futómű környezetében keletkező tüzek gyakran a szoruló fékek hőhatására vezethetők vissza. Ez jellemző személygépjárműveknél is, mind a hagyományos, mind az elektromos meghajtásoknál (KUTI 2019; SZABÓ–MOLNÁR–NAGY 2018; TÓTH 1984).

Módszerek

A kutatás módszertana kvalitatív esettanulmány-elemzésre épül. A vizsgálat során korábban már publikált járműtűzesetek számítógépes szimulációit elemeztük és hasonlítottuk össze. Az elemzés alapját több, nemzetközi szakirodalomból származó szimulációs tanulmány képezte, amelyek különböző modellezési megközelítéseket alkalmaztak. A módszertani lépések a következők voltak. Kiválasztottuk a forrásokat: releváns, lektorált beszámolókat kerestünk az elmúlt évekből, amelyek járműtüzek tűzterjedésének számítógépes modellezését mutatják be. Ezt követően az adatgyűjtés, a tanulmányokban közölt bemeneti paraméterek (anyagjellemzők, környezeti feltételek, tűzkeletkezési módok, geometriák) rendszerezése következett. Összehasonlító elemzést végeztünk a modellezési módszerek, a szimulációk lefutásának ideje, valamint az alkalmazott anyagbeállítások tekintetében. Nem hagytuk ki az alkalmazhatósági vizsgálatot sem, mivel az általunk vizsgált szimulációk gyakorlati hasznosíthatóságát értékeltük a hasonló területen szerzett tapasztalataink alapján. A fent leírt módszertani megközelítés lehetővé tette a különböző eseményekhez kapcsolódó szimulációs módszerek erősségeinek és korlátainak azonosítását, valamint a jövőbeni kutatások pontosítását.

A szimulációs szoftverek bemutatása

A tűzvizsgálathoz felhasználható szoftverek bemutatásához szükséges áttekinteni a szimulációs szoftverek működését. Az előzőkben már említettük, hogy a szimulációkat régóta alkalmazzák a hő- és áramlástani vizsgálatokhoz. A szimuláció úgynevezett az CFD (*computational fluid dynamics*), azaz számításon alapuló áramlástani modellező szoftverek segítségével történik.

Az ezeknek a háttérében álló fizikai folyamatokat numerikus módszerekkel írják le úgy, hogy a teret apró cellákra, úgynevezett rácshálókra osztják, és ezekben végzik el a különböző fizikai jellemzők számítását az idő előrehaladtával. Ez a számítási folyamat alkalmas a tüzek szimulációjára is, bemutatható általa a tűz

kialakulása, terjedése, az égési folyamat, a hőátadás, a füstterjedés, valamint a levegő és a hő áramlása zárt vagy nyitott térben.

Az elérhető irodalomban legtöbbször az FDS (*Fire Dynamics Simulator*) program szerepel, amely tudományos alapokon validált modelljeivel alkalmas kutatási és mérnöki célokra is. Ezenkívül létezik még egyéb CFD-alapú modellező szoftver is, de az összehasonlíthatóság érdekében a továbbiakban az FDS programot mutatjuk be részletesen.

Az FDS programot az Amerikai Egyesült Államokban fejlesztették ki, nyílt forráskódú és ingyenesen letölthető. Belső és külső terekben lejátszódó tüzek numerikus szimulációjára alkalmas. A fő alkalmazási területek a következők: az épülettüzek, az alagutak és a zárt terek, a füst- és hőterhelés vizsgálata, valamint a tűzoltási rendszerek hatékonyságának vizsgálata és a járműtüzek. Az FDS a Navier–Stokes-egyenletek egyszerűsített alakját alkalmazza a számításokhoz, amelyet alacsony sebességű ($Ma < 0,3$),¹ termikusan vezérelt áramlásra, különös tekintettel a tűzből származó füst- és hőtranszportra alkalmaznak. A nyomás felírásakor megkülönböztetik a hidrosztatikus alapkompontent (p_0) és a kisebb mértékű, áramlási hatásokból eredő perturbációt (p'), ezáltal az akusztikus hullámok számítását mellőzik, a sebességmező divergenciáját pedig a közelítéshez illeszkedő feltétellel biztosítják. A sűrűségváltozás nem a nyomásból, hanem főként a hőmérséklet-változásból és az égés során keletkező gázok, azaz az égéstermékek és a még nem elégett éghető anyagok helyi koncentrációváltozásából adódik. Ez lehetővé teszi az akusztikus hullámok figyelmen kívül hagyását és a numerikus stabilitás növelését, miközben a modell a hő- és égéstermék-transzport pontos szimulációját biztosítja.

Az impulzus- és tömegmegmaradás alapegyenletei (1) és (2) összenyomhatatlan, homogén folyadék esetén:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \times \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + F \quad (1)$$

$$\nabla \times u = 0 \quad (2)$$

ahol ρ a sűrűség (kg/m^3), ν a kinematikai viszkozitás (m^2/s), F pedig a térfogategységre ható külső erők (például gravitáció). Az első egyenlet az impulzusmegmaradást, a második a kontinuitást (összenyomhatatlansági feltétel) fejezi ki.

¹ Mach-szám: dimenziómentes mennyiség, egy objektum haladási sebességének (vagy az áramló közeg áramlási sebességének) és az áramló közeg (folyadék vagy gáz) helyi hangsebességének hányadosa. Bármely áramlás összenyomhatatlannak tekinthető, ha a Mach-száma kisebb, mint 0,3.

A modelltér térfogatelemekre van bontva, és az egyes cellákban számítja ki a fizikai jellemzőket.

A kimeneti adatokat tekintve a következőket jeleníti meg a program: hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), füstkoncentráció, CO/CO_2 szintek, nyomásviszonyok, a láng magassága, hőáram, hőfelszabadulási ráta (*heat release rate*, HRRP) és fajlagos hőfelszabadulási ráta felületre vetítve (*heat release rate per unit area*, HRRPUA). Továbbá az anyagok hőterhelése és gyulladási hőmérséklete is monitorozható. A fajlagos hőfelszabadulási ráta felületre vetítve (HRRPUA) az adott égő felület egységére eső hőenergia leadási sebességét jelenti, és a (3) egyenlet szerint számítható:

$$\text{HRRPUA} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3)$$

ahol $\dot{Q}$ a teljes hőfelszabadulási ráta (W), A pedig az égő felület nagysága (m^2).

A szoftverhez tartozik grafikus segédprogram is, az úgynevezett Smokeview és PyroSim is, amely az FDS kimeneteit vizualizálja a könnyebb megértés érdekében. Megjeleníthetők füstterjedés- és lángterjedés-animációk, hőmérsékleti mezők és nyomáseloszlások is (Fire Dynamics Simulator [FDS] and Smokeview [SMV] [é. n.]).

Járművekkel kapcsolatos tűzszimulációk

A legfrissebb, elérhető szakirodalmak többsége a járműtüzekkel kapcsolatos szimulációkkal úgy foglalkozik, hogy a zárt terekben, általában parkolóokban keletkező, terjedő tüzet szimulálják. Ebben a fejezetben az elmúlt évek releváns írásai közül azokat tekintjük át, amelyekben a jármű modellje kulcsfontosságú volt a szimuláció lefuttatásához.

Teljesítményalapú tűzbiztonsági elemzés elektromos járművek esetében

Brzezińska és Bryant tanulmányában bemutatja az elektromos járművek okozta tűzkockázat fő szempontjait, megosztja a valós tűzkísérletek tapasztalatait és a teljesítményen alapuló (*performance-based*) módszereket a parkolóokban történő tűzbiztonsági elemzésekhez (BRZEZINSKA–BRYANT 2022). Az írás elején említést tesznek a hibrid és elektromos meghajtású járművek okozta kockázatokról.

Az elektromos és hibrid járművekben leggyakrabban lítiumion-akkumulátorok szolgáltatják az energiát, amelyek a szerzők szerint főként a termikus megfutás miatt jelentenek tűzbiztonsági kockázatot. Ez különösen gyakori baleset bekövetkeztekor vagy az akkumulátor meghibásodása esetén. Az akkumulátorok nemcsak a tűz kiindulási pontjai, hanem fő üzemanyagként is szolgálnak az égéshez. Ez alapján megállapítható, hogy minél nagyobb az akkumulátor kapacitása, annál nagyobb a kockázat (MIECHÓWKA–WĘGRZYŃSKI 2025).

A föld alatti mélygarázsokban az alacsony belmagasság és az elektromos töltőállomások növelik a tűz terjedésének veszélyét, ezért teljesítményalapú tűzbiztonsági elemzésekre és megfelelő tervezésre van szükség a veszélyek csökkentésére. A teljesítményalapú tűzbiztonsági tervezés olyan mérnöki megközelítés, amelyben meghatározzák az elérni kívánt tűzbiztonsági célokat, az előforduló tűzscenáriókat, majd elemzik azokat, felvetik a tervezési alternatívákat adott helyre vonatkozóan, és így azok kvantitív módon értékelhetővé válnak (BADONSKKI–BÉRCZI 2023).

Ezt az 1970-es években vezették be, majd a 2001-ben elkészült brit BS 7974 (BS 7974:2019. *Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings* 2019) szabvány adott részletes keretet a tervezőknek, hogy egységesen, összehasonlítható módon alakítsák ki a tűzbiztonsági rendszereket. A szabványhoz készültek kiegészítésként azok az irányelvek, amelyek a következőket fedik le: a tűz fejlődésének leírása, a füst és a toxikus gázok határértékei, tűzérzékelés, beavatkozás, evakuáció, kockázatértékelés és vagyonvédelem.

Ennek természetesen magyar vonatkozása is van, az OTSZ (Országos Tűzvédelmi Szabályzat) és az MSZ EN 1991-1-2 (Magyar Szabványügyi Testület) tartalmazza az építmények tűzvédelmi követelményeit és foglalkozik a tűzterheléssel, a hőhatásokkal és a szerkezet ezekkel szembeni viselkedésének modellezésével, amely a teljesítményalapú tervezés egyik pillére.

A Brzezińska-féle publikációban egy parkoló tűzbiztonsági értékeléséhez készítettek CFD-alapú szimulációt az általunk előzőleg bemutatott FDS nevű programban. A szimuláció elkészítéséhez szükséges a bemeneti, kezdeti feltételeket meghatározni. A szerzők megadták a levegő paramétereit: a hőmérsékletet és a nyomást. Az épületszerkezet anyaga beton, így az ehhez tartozó főbb fizikai-kémiai tulajdonságokat is betáplálhatták a programba. Éghető anyagként még megemlíti a polisztirol és a fa keverékét mint gyakori beltérben alkalmazott éghető anyagokét. A számításokhoz 0,3 m felbontású rácshálót alkalmaznak mindhárom térbeli irányban. A tűz terjedését szabványos számítással adják meg.

Az általuk elkészített szimuláció egy elektromos járműben bekövetkezett tűz esetét mutatja be egy mélygarázsban. A tűz az elektromos autók számára kijelölt

helyen, a garázs középső részén keletkezett, a friss levegő beáramlását a főkapu biztosította. A garázsban volt füstelszívó rendszer, ez a mennyezet alá szerelt csatornákból állt. A hőmérséklet-eloszlást és a látótávolságot a padlótól számított 1,8 m magasságig modellezték az FDS szoftverrel.

A korábban bemutatott BS 7974 számú szabvány szerint a meneküléshez megengedett legnagyobb hőmérséklet 52 °C lehet, a látótávolság pedig 10 m sötét helyeken és 30 m megvilágított vészkijáratoknál. A szimuláció alapján a tűz keletkezésétől számított 80 másodpercen belül megtörténik a riasztás, a füst átmérője ebben a pillanatban már meghaladja a 20 m-t, ezért legalább két füst-érzékelő működésbe lép.

A 300. másodpercig megtörténhet a kimenekülés, de ezután a látótávolság 1,8 m magasságban 10 m alá csökken, ami nem felel meg az evakuáláshoz szükséges feltételeknek. A 480. másodpercre a tűzoltók megérkeznek, de ekkor még a hőmérséklet nem haladja meg az 52 °C -os határértéket. További fontos érték az úgynevezett hőfelszabadulási ráta, amelyet 1:1 arányú tűzkísérletből származó adatok hiányában 7,0 MW-ra becsültek. A jármű teljes kiegészéhez 16–18 perc kellett (BRZEZINSKA–BRYANT 2022).

Összegezve a szimuláció azt mutatja, hogy az elektromos autótűz nem jelent közvetlen veszélyt a bent tartózkodókra a kimenekítés ideje alatt, és a tűzoltás is időben elkezdhető. A tanulmány jól szemlélteti, hogyan romlanak a menekülési feltételek a hőmérséklet emelkedésével és a látótávolság csökkenésével, lehetővé teszi az evakuáció és a tűzoltás körülményeinek előzetes felmérését.

Bár a teljesítményalapú módszereket régóta alkalmazzák, még mindig előfordulhatnak hiányzó értékek és ellentmondásos eredmények. Az egyik legvitatottabb kérdés az elektromos járműtüzek hőfelszabadulási rátája (HRR) és annak növekedése, amelyet ebben a tanulmányban is csak becsléssel tudtak megadni. Véleményünk szerint a 7,0 MW érték elég magasnak számít, a valós 1:1 arányú tűzkísérleteket bemutató irodalmak a jármű égésekor felszabaduló hő értékét 3–5 MW közé teszik (TERZIEV 2019; JIANG et al. 2018).

Ennek az értéknek a pontos meghatározása csak a tűzkísérletekre támaszkodva, pontos anyagmeghatározások után lehetséges. Sajnos a valós tűzkísérletek rendkívül költségesek, és megbízható következtetéseket sorozatmérésből lehet levonni, így jelenleg akkumulátorteszteken és számításokon alapuló feltételezésekből indulhatunk ki a teljesítményalapú elemzések során.

A Tesla Model S elektromos autó tűzesetének szimulációja

Gavryliuk és szerzőtársai az FDS segítségével modellezték egy Tesla Model S elektromos autó tűzesetét egy parkolóépületben, hogy meghatározhassák a biztonságos védőtávolságot az autó és az épületszerkezet között (GAVRYLIUK et al. 2023). Ebben a kutatásban is az épületbiztonságot tartják szem előtt, ám már sokkal nagyobb szerepet kap a jármű modellje a szimuláció során.

A tanulmány célja, hogy a szimulációval meghatározzák azokat a főbb hődinamikai jellemzőket, mint például a hőáram, a hőmérséklet-eloszlás és a tűzterjedés, amelyek EV-tűz esetén jelentkeznek. Az elért eredmények azért fontosak, mert segítséget nyújtanak a töltőállomások és a parkolók kialakításának és tűzvédelmi rendszerének fejlesztéséhez.

Itt is ki kell emelnünk, hogy sok kutatás foglalkozik a lítiumion-akkumulátorokkal kapcsolatos tüzekkel, azonban a legtöbb az akkumulátorokat csak különálló elemként vizsgálja. Ezek a kutatások kulcsfontosságúak a bemeneti adatok szempontjából, azonban nélkülözik a rendszerszintű vizsgálat pontosságát.

A szerzők részletesen összefoglalják a témában eddig elért eredményeket. Az elektromos járműtüzek jellemzői jelentősen eltérnek a belső égésű motorral szerelt járművekétől, a legfőbb éghető anyag az akkumulátor. A lítiumion-akkumulátorok fajlagos égéshője rendkívül magas, amelyet a nagy energiasűrűség és a termikus megfutás veszélye tovább fokoz. Az EV-tüzekkel kapcsolatos kutatások sajnos még mindig nem olyan mélységűek, mint az egyedi akkumulátorokkal kapcsolatos tüzek vizsgálata – tehát további rendszerszintű kutatások szükségesek.

A szerzők szabadon fejlődő égést feltételeznek, így a szimulációt 720 másodpercig futtatják. Ez az időhossz a beavatkozó egységek helyszínre érkezési idejéből (600 s) és a feltételezett beavatkozás-előkészítési időből (120 s) tevődik össze. A járműmodell alapját a Tesla Model S elektromos járműve szolgáltatja, amely a jelenleg elérhető legnagyobb kapacitású (104 kWh) személygépkocsiba szerelt hajtóakkumulátorral rendelkezik. A valós jármű méreteit ($4976 \times 1963 \times 1435$ mm) és tömegét (2100 kg) használják.

Az akkumulátor tekintetében az égési folyamatok paraméterezése az akkumulátoranyagok reakcióhője alapján kellően pontos eredményeket szolgáltat, különösen a hőmérséklet modellezéséhez. Megállapították a szakirodalom áttekintése után, hogy a lítiumion-akkumulátorokkal végzett kísérletek eredményei szerint az égés során a hőmérséklet $850\text{--}1020$ °C között mozog, és a teljes leégéshez legalább 70 perc szükséges. A legmagasabb hőfelszabadulási ráta a

10–22 perc közötti időszakban figyelhető meg, ezt célszerű figyelembe venni a modell paraméterezése során.

Továbbá meghatározták a járműben található éghető anyagokat és az azokhoz tartozó éghőértékeket is. Az alábbiakat sorakoztatták fel tömeggel együtt: gumi: 118,4 kg; kenőanyagok: 8,4 kg; polimerek: 49,7 kg; poliuretán hab: 32,6 kg; cellulóztermékek: 6,1 kg; valamint műbőr: 14,2 kg.

Mint már azt említettük, a járművet egy parkolóépületben helyezték el, így a modellezett tér fizikai határolóelemeként egy téglafalat adtak meg, amelynek tulajdonságai a következők: sűrűség: 1950 kg/m^3 ; fajhő: $1,04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; sugárzási tényező: 0,9; elnyelési együttható: 0,65 1/m.

Ebben a kutatásban a fájlagos hőfelszabadulási teljesítmény maximális értékét 5200 kW/m^2 -ben állapították meg, míg a lángterjedés vonalmenti sebessége $0,21 \text{ m/s}$ lett. Összehasonlításként megemlítjük, hogy a hagyományos fenyőből készült fa hőleadása körülbelül $250\text{--}400 \text{ kW/m}^2$ – tehát a megállapított érték beláthatóan magas.

Ebben a szimulációban az égés zavartalanul, külső beavatkozás nélkül fejlődik a szimuláció teljes időtartama alatt (720 s). A járműszerkezetet alkotó anyagok közül a legkisebb öngyulladási hőmérséklettel rendelkező anyagot vették figyelembe kritikus gyulladási hőmérsékletként, amely jelen esetben $160 \text{ }^\circ\text{C}$ a szintetikus szövetek esetén.

A környezeti paraméterek beállításakor és a kezdeti peremfeltételek megadásakor a láng hőmérsékletét homogénnek tekintették az égő felület teljes területén. A szomszédos objektumoknak $20 \text{ }^\circ\text{C}$ kezdeti hőmérsékletet adtak meg. A szimulációban a hőhatás kizárólag sugárzással történik, a konvektív hőátadás elhanyagolható.

A tűz keletkezési pontjának meghatározásához és a fejlődés lehetséges becsléséhez a szerzők figyelembe vették, hogy az elektromos járművekben bekövetkező tüzek leggyakoribb oka a rövidzárlat, amely a kábelek gyulladásához vezet. Az akkumulátor termikus megfutása miatt az önkioltás jelensége nem figyelhető meg (PAPP 2024). Ezért fontos kiemelni, hogy a szimulációban a tűz az égő járműből indul ki – az égés feltételezett okát előzetesen meghatározták, de ezt részletesen nem modellezik. A szimuláció célja az volt, hogy onnantól vizsgálja a tűz viselkedését, hogy az már kialakult. A szél hatásait sem tartalmazza a modell, mivel az csökkentené a hőáram egyenletességét, valamint a lángmagasságot is mérsékli.

Ebben a cikkben az előzőhöz képest sokkal alacsonyabb volt a hőfelszabadulási ráta, ez körülbelül 3 MW volt. Az első írásban is megemlítik, hogy más forrásokban a hagyományos, belső égésű motorral meghajtott jármű tüzesetekor ez az érték $4\text{--}5 \text{ MW}$ között volt (BRZEZINSKA–BRYANT 2022). Az aktuális cikk

ezt az értéket 3–5 MW-ban állapította meg, tehát a forráselemzés mindkét cikk tekintetében azonos eredményeket hozott.

Összevetve az eddigiekben tárgyalt két cikket, megállapítottuk, hogy a hőfelszabadulási ráta értékei kis különbséget mutatnak. Elmondható, hogy a második kutatásban az anyagmeghatározások pontosan szerepelnek, ezzel segítve más kutatók munkáját a reprodukálhatóság és az összehasonlíthatóság érdekében.

Egyszerűsített járműmodell tűzszimulációja

A továbbiakban szlovák kutatók munkáját foglaljuk össze. Halada és szerzőtársai 2011-ben végzett kutatása azért jelentős, mert egyszerűsített járműmodell tűzszimulációját készítették el. Az elvégzett munka értékét tovább fokozza, hogy azóta is csak kevés olyan írás érhető el, amelyben a teljes jármű viselkedését figyelik meg a szimuláció során.

Ennek feltehetőleg az az oka, hogy az autótűz viselkedésének követéséhez szükséges paraméterek megadása valós tűzkísérletből származó adatokat igényelne, továbbá a bonyolult járműmodell elkészítése, szimulációs szoftverbe ültetése még manapság is óriási számítási kapacitást igényel. A különböző értékek követése, megjelenítése jelenleg is szuperszámítógépek bevonásával lehetséges, azok használata pedig sajnos költséges.

Mint azt korábban is említettük, az épülettervezés egyik fontos szegmense a tűzbiztonság, így általában a járművek a szimulációban csak kiindulópontként kapnak szerepet, és az épület szerkezetében történő változásokat, a keletkező károkat figyelik meg. Ez lényegesen egyszerűbb, mint a nem leegyszerűsített járműmodell és az épület modelljének együttes nyomon követése a tűz során.

Ezt a kutatást 2011-ben végezték, de már akkor az FDS szimulációs programot használták. A cikk tartalmazza egy belső égésű motorral szerelt Audi 80 motortérből kiinduló tüzesetének FDS-szimulációját. A motortéri tűz szimulációja rendkívül összetett feladat, mivel bonyolult geometriákat tartalmaz, és ott több, különféle égési tulajdonsággal rendelkező beépített anyag található (például műanyag, gumi, papír, fém).

Ebben a kutatásban a bemeneti geometriát 3D szkenneléssel és közvetlen mérésekkel állították össze, a gumicsöveket például vékony vonalakkal modellezték a felület/térfogat arány megtartásával. Tehát a lehető legtöbb egyszerűsítést alkalmazták, hogy a szimuláció ne lépje túl az elérhető számítási kapacitást, mégis maradjanak részletezett elemek.

A tűz kezdetét egy 4×4 cm-es már égő felület jelképezte, amelynek hőleadása 2,1 kW volt és 60 másodpercig tartott. Tehát ebben a munkában már volt úgynevezett gyújtóforrás, míg a többiben már az eleve égő járművet figyelték.

A szimulációs tartomány két részre oszlott, 1 cm-es és 2 cm-es rácsfelbontással készült hálóra, 720 másodpercig tartó (12 perc) tűz modellezéséhez. A rácsáló finomsága alapvetően meghatározza a szimuláció pontosságát, erőforrásigényt és megbízhatóságát. Az első kutatásban 0,3 méteres durva hálót használtak. Az 1–2 cm-es rácsfelbontás sokkal finomabb geometriák, vékony elemek, például kábelek, burkolatok modellezését teszi lehetővé.

A teljes jármű vagy nagyobb tér modellezése ilyen rácsmérettel gyakorlatilag kivitelezhetetlen lehet idő vagy erőforrásszűkében, és a numerikus instabilitás esélye is nőhet, ha a rácsáló túl finom. Mindezt figyelembe véve a durvább (0,3 m) hálóméret alkalmas nagy léptékű, általános hőterjedési vizsgálatokhoz, például az említett parkolóban, de sajnos nem kellően pontos.

Az akkori számítástechnikai fejlettséget tekintve a rácsfelbontás miatt a szimulációt a kutatók nem tudták külső források bevonása nélkül elvégezni. Az anyagtulajdonságokat részben mérésekből, részben becslésekből határozták meg, és a szimulációt valós kísérlettel is összevetették.

Megjegyeznénk, hogy a valós kísérletet és a szimulációval való összehasonlítást nem mutatják be az írásban, csupán a hőmérsékleti diagramok kerültek be. A diagramok tanulmányozása után leolvasható, hogy a szimuláció során a motortérben mért legmagasabb hőmérséklet körülbelül $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül alakul, a motorháztetőn mért érték körülbelül $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg a valóságban ez az érték körülbelül $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. A motor hőmérséklete azonos, és nagyjából a valóságban és a szimulációban is a 400. másodpercre éri ezt el. Ez megegyezik az elérhető irodalmakban szereplő értékekkel.

A szerzők három különböző tüzesetet modelleztek az FDS segítségével: az első esetben a tűz áterjed egy égő autóról egy 60 cm-re parkoló másik autóra, a második esetben a jármű belterében keletkezik tűz (utas- vagy csomagtér), a harmadik esetben alagútban bekövetkező járműtűz modelljét láthatjuk. Az első esetben két azonos típusú autó szerepelt, a szimuláció bemeneti paramétereiről sajnos csekély adatot közölnek. Az alagútmodellről tudható, hogy $10 \times 180 \times 7$ m volt a mérete, ahol egy $2 \times 3 \times 0,1$ m éghető blokkot gyújtottak meg, maximum 1000 kW hőleadással, míg a beépített ventilátorok sebessége fokozatosan nőtt 5-ről 20 m/s-ra. A szimulációban hat hőmérséklet-érzékelőt alkalmaztak különböző pontokon, hogy vizsgálják az áramlás és a hőterjedés alakulását.

Sajnálatos módon a cikkben nem részletezik az eredményeket, számszerűen nincsenek a szövegben megemlítve, csupán a füst mozgását mutatják be képi

formában a 80. másodpercben az alagútban. A bemutatott szimulációk bemeneti paramétereinek hiányában és a részletes eredmények közlése nélkül a kutatás nehezen hasonlítható össze más szerzők munkáival, továbbá kérdéses, hogy az eredmények a valóságban lejátszódó folyamatokhoz hogyan viszonyulnak (HALADA et al. 2011).

Elektromos jármű tüzesete ingázó kompon

Végezetül Pitana és szerzőtársai tanulmányát elemezzük, amely egy ingázó kompon bekövetkező tüzeset szimulációját tartalmazza, a tűz pedig egy elektromos járműből ered (PITANA et al. 2025). A cikk által bemutatni kívánt tudományos probléma, hogy a kompok tűzoltó rendszere jelenleg nincs tesztelés alatt lítiumion-akkumulátorral kapcsolatos tűz esetén.

Mivel világ szinten megnövekedett az elektromos járművek száma, és ezzel együtt a bekövetkezett elektromos járműtüzek is, releváns ennek a témának a vizsgálata. Azért választottuk ezt a munkát elemzésre, mert bár itt sem a jármű tűzbéli viselkedése kapta a kulcsszerepet a szimulációban, mégis részletes bemeneti paramétereket adtak meg, és a modell is jól kidolgozott, egyszerűsítve, de nem más tételelemmel helyettesítve illesztették be az FDS-programba.

A kutatók a hajó fedélzetének csak azt a részét vizsgálták, ahová az elektromos meghajtású személygépjárművekkel parkolhatnak az utasok. A szimuláció alapjául egy 170 méter hosszú, 11 931 tonnás Ro-Ro (*roll on – roll off*) komp szolgál, amely több száz utas és jármű szállítására alkalmas. A modell az egész hajót lefedi, de korlátozott anyagkészlettel dolgozik, és 1,5 méteres rácshálóval futtatták a szimulációt. Ez a hálóméret az eddig bemutatott méreteknél jelentősen nagyobb, a komp méreteit tekintve a sűrűbb hálóméret számítási problémákat okozna, de pontosabb eredményeket adna. Mivel az elektromos járművek kompon történő elhelyezésére nincs külön szabály, azok pontos helyét a kompon meghatározni nem lehet. A szerzők így két külön forgatókönyv szerint futtattak szimulációt, az oltásra vízköddel és CO₂-vel működő oltórendszert integráltak. A szimuláció célja, hogy meghatározható legyen, elegendő-e a meglévő tűzoltó rendszer az akkumulátortüzek eloltására.

A szimuláció során figyelembe veszik a *sprinkler* rendszer aktiválódásának időpontját, az oltás időtartamát, valamint a füst terjedését és a szellőztetőrendszer hatékonyságát. Az elektromos járművek anyagösszetételét is számításba veszik, tömegarányokat definiálnak. Lítium, acél, alumínium, műanyag, üveg

és gumi került a bemeneti paraméterek közé, amelyeket rendre 0,64, 57,9, 14, 8, 5, és 2%-ban adtak meg a jármű tömegéhez képest. A modellezett jármű tömege azonban nem szerepel pontosan a tanulmányban, csak a befoglaló mérete, amely $5 \times 2 \times 2$ m. Ez egy átlagos személyautó méretének felel meg, így a tömeget körülbelül 1500 kg-ra becsüljük.

Az előbb említett két szimulációs forgatókönyvből az elsőben az autót egy egyszerű térelem, téglatest helyettesítette a szimulációban, a másodikban pedig már részletesebb modellt használtak, egyszerűsítve mutatja be az autó formáját, de már pontosabban tükrözi a valós hőfelszabadulási értékeket. Megállapítható, hogy a túlzott egyszerűsítések a szimulációs értékeket nagyban befolyásolják. A szimulációs paraméterek alapjául Kang és szerzőtársai kísérleti eredményei szolgáltak, akik megállapították, hogy az elektromos járművek tüzeinél a hőfelszabadulás legnagyobb részét a jármű karosszériájának hagyományos anyagai okozzák, és a hőfelszabadulás 7,81 MW. A szimuláció időtartama jóval hosszabb, mint az előzőkben, 1500 másodperc (KANG et al. 2023).

Az első szimuláció lefutasakor a tűz 200 másodpercnél kezdett gyors növekedésbe. A hőfelszabadulási ráta rendkívül magas, 10 MW, ezt követően pedig 6000–9500 kW között ingadozott a szimuláció végéig. Ez az érték meghaladja a tanulmányban hivatkozott cikkek (KANG et al. 2023; HYNINEN et al. 2023) által bemutatott értékeket és az általunk feldolgozott irodalmak eredményeit is. Az oltórendszer hatékonyságát tekintve az eredmények alapján elmondható, hogy a hőmérséklet nem csökkent számottevően 9 *sprinkler* működésbe lépésével sem. A levegő maximális hőmérséklete elérte a 148 °C-ot 200 másodpercnél, majd 80–140 °C között mozgott. A jármű alatt elhelyezett szenzor ennél sokkal magasabb, 800 °C-os értéket mért, ez a korábbi kutatások által bemutatott értékkel nagyjából megegyezik a jármű közelében. A füst gyorsan terjedt, már az első perc végére betöltötte a teljes vizsgált fedélzetet, és átterjedt a szomszédosra is. Ez a gyors terjedés jelentős kockázatot jelent más járművek és a fedélzet tekintetében.

A második forgatókönyvben a szimuláció csak 576 másodpercig tartott, a hálóméret 1,5 méter volt. A járművet zárt térben helyezték el a fedélzeten. A hőfelszabadulási ráta 2500 kW csúcserőértéket vett fel 380 másodpercnél, majd lecsökkent 250 kW-ra, később pedig újra visszaemelkedett 2000 kW-ra. Ez a csökkenés a *sprinkler* rendszer működésének tudható be (8 aktiválódott). A tüzet nem sikerült teljesen eloltani, ennek ellenére nem terjedt tovább más járművekre. Véleményünk szerint ennek az oka, hogy a járművet zárt térbe helyezték a szimulációs programban. A jármű tetején elhelyezett szenzor 280 °C-ot mért 550 másodpercnél, 400 másodpercnél pedig rövid időre 70 °C-ra csökkent a hőmérséklet.

A jármű alján mért hőmérséklet 130 °C körül alakult az 500–576. másodperc között, amely lényegesen alacsonyabb, mint az 1. forgatókönyvben. A zárt tér miatt a füst nem tudott terjedni.

A két forgatókönyv közötti különbségek rávilágítanak arra, hogy a jelenlegi vízalapú *sprinkler* rendszerek önmagukban nem elegendők az elektromos járművek tűzének hatékony eloltásához. A zárt terek kialakítása jó tűzvédelmi megoldást jelenthet a közlekedő kompok tervezésekor, mivel jelentősen javíthatják az oltás hatékonyságát és a füst visszaszorítását.

Ha a kompok szerkezetét megvizsgáljuk, láthatjuk, hogy javarészt acélból készülnek. Ennek olvadáspontja 1425–1540 °C körül alakul, így a szimulációkban tapasztalt legmagasabb, 800 °C-os hőmérséklet alapján a hajószerkezet nem károsodik jelentős mértékben (PITANA et al. 2025). Azonban a tartósan magas hőmérséklet az anyagban gyengülést, deformációt okozhat, illetve az esetleges műanyag vagy faburkolatok az égést táplálják. Továbbá számolni kell azzal is, hogy a különböző beépített anyagok és felületbevonatok égése során egészség- és környezetkárosító anyagok kerülnek a levegőbe, ezzel rontva a menekülési esélyeket. A tűzbiztonsági kérdések mellett foglalkozni kell az emberi szervezetre és a természeti környezetre gyakorolt káros hatásokkal is, ugyanis bizonyos esetekben ezeknek súlyosabb hatásai lehetnek, mint magának a tűznek (BEREK–FÖLDI–PADÁNYI 2020).

A bemutatott szimulációk rávilágítanak arra, hogy a teljesítményalapú tűzbiztonsági tervezés egyre fontosabb szerepet tölt be, főleg az elektromos járművek megjelenése óta. A bemutatott tanulmányok azt igazolják, hogy érdemes a jármű modelljét részleteibe menően kidolgozni a szimuláció elkészítése során, mert sokkal pontosabb és reális eredmények érhetők el, akár az épülettervezés, a kimenekíthetőség szempontjából.

Ugyanakkor az is jól látható, hogy a valós kísérleti adatok hiánya továbbra is bizonytalanságot jelent a modellek paraméterezésében. A következő évek kutatásaiban érdemes a valós kísérletek eredményeinek felhasználásával pontosítani a szimulációkat.

Saját tapasztalatok

A jármű tűzszimulációjának elkészítéséhez jól felépített modellre és pontos bemeneti adatokra van szükség. A bemeneti adatok nagy része a járműbe épített anyagok éghetőségi tulajdonságaiból tevődik össze. Ezek meghatározása rendkívül

nehéz feladat, ugyanis a gyártók legtöbbször nem közlik a különböző felhasznált anyagokra vonatkozó összetételi információkat, azok égési tulajdonságait.

A szimuláció pontosságának egyik kulcsa a járművet felépítő és annak belterében használt anyagok tulajdonságainak számításba vétele. Az adatok meghatározása általában becslésen alapszik, ugyanis a jármű tömegéhez viszonyítva százalékos lebontásban kerülnek a programba. Azt is fontosnak tartjuk kihangsúlyozni, hogy nem elegendő kategorikusan besorolni a különböző égési tulajdonságokkal bíró anyagokat, például az autóiparban számos műanyagot használnak fel. A szimuláció pontosságát növeli, ha nem átlagot vonunk a műanyagokra vonatkozó értékekből, hanem részletesen adjuk meg, hogy a jármű hány százalékban tartalmaz az autóiparban gyakran használt polipropilén (PP), akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), polikarbonát (PC), poliamid (PA) vagy poliuretán (PUR) -fajtákat (ABEDSOLTAN 2024). Továbbá a szimulációba az autóról készült modell is egyszerűsítve kerül, a bonyolult geometriák nagyon hosszú számítási időt vagy numerikus hibát okoznának. Az eredmények így belátható módon a valóságtól, ha csak kis mértékben is, de el fognak térni.

Korábbi kutatásunkban megvizsgáltuk, miként viselkednek az egyszerűsített és összetett geometriák az FDS-programban. Az egyszerűsítés alatt azt értjük, hogy a vizsgált geometria a szimulációban beállított hálóméretnek megfelelően kis kockákból tevődik össze, míg az összetett követi a geometria bonyolult alakját. Megállapítottuk, hogy az egyszerűsített geometria nem okoz durva eltérést a szimulációs eredményeket tekintve. A lefutás és a számítási idő gyorsabb, a hőmérsékleti görbék megegyeznek a valósággal. A nagy sűrűségű háló beállításával az egyszerűsített modell közel olyan pontos lehet, mint egy összetett modell.

Az általunk bemutatott publikációkban vagy helyettesítéssel, vagy durvább egyszerűsítéssel oldották meg a járművek modellezését. A kismértékű egyszerűsítés tapasztalataink szerint nem okoz jelentős eltérést az eredményeknél, azonban a más geometriával való helyettesítés már nem hozza a kívánt szintű eredményeket (HAJDU–PAPP–KUTI 2025).

Összegezve megállapítható, hogy a szimulációk pontosságának kulcsát a valós bemeneti adatok és a megfelelő részletességgel felépített, de számítási szempontból optimalizált geometriai modell jelenti. A jövőbeni fejlesztések célja olyan adatbázisok létrehozása lehet, amelyek pontos égési tulajdonságokat tartalmaznak az autóiparban használt anyagokra vonatkozóan. Emellett törekedni kell a szimulációs modellek további finomítására, hogy azok még megbízhatóbban tükrözzék a valóságos tűz lefolyását.

Összegzés

A járműtüzek szimulációval történő vizsgálata a modern közlekedésbiztonság és a tűzbiztonság területén egyre nagyobb jelentőséggel bír. A gépjárművek hajtásláncra és üzemanyaga az elmúlt évek során óriási változásokon esett át, és az ilyen irányban végzett fejlesztések további változásokat hoznak. Ezek mellett a járművek szerkezeti elemei, a beépített anyagok egyre különbözőbb anyagszerkezettel rendelkeznek, amely számos különféle éghető és nem éghető anyagot foglal magában, így a tűz kialakulásának és terjedésének modellezése nagyon összetett, de nélkülözhetetlen feladat.

A járműtüzek jelentős kockázatot hordoznak magukban mind az emberi életre, mind az anyagi javakra nézve, továbbá súlyos környezeti károkat is okozhatnak. A tűzvédelem és a tűz megelőzés hatékonyságának növelése érdekében elengedhetetlen a járműtüzek során kialakult folyamatok részletes és megbízható szimulációja. A szimulációk alapját a valós, pontos és részletes bemeneti adatok adják, amelyek legfőbb része a járművekben használt anyagok égési tulajdonságaiból származik. A gyakorlatban azonban nagy nehézséget jelent a kutatóknak, hogy a gyártók ritkán szolgáltatnak részletes adatokat a felhasznált anyagok összetételéről és égési viselkedéséről. Ez a hiányosság a bemeneti paraméterek becslésen alapuló megközelítést követeli meg, ezzel korlátozva a szimulációk pontosságát és megbízhatóságát.

A modell elkészítésekor azt az optimális megoldást kell választani, ahol az eredmény kellően pontos, és a számítási erőforrások is rendelkezésre állnak. A jövőben szeretnénk a feltárt hiányosságoknak eleget tevő kutatást lefolytatni, valós tűzkísérletet végezni egy személygépjárművön, és az adatokat felhasználni elkészíteni a jármű tűzszimulációját minél kevesebb egyszerűsítést alkalmazva. A szimulációs modellek továbbfejlesztése és az anyagokra vonatkozó adatok bővítése hozzájárulhat a tűzzel kapcsolatos folyamatok valósághű bemutatásához, amely támogatja a tervezőket, a mérnököket és a beavatkozó személyek munkáját.

REVIEW OF COMPUTER SIMULATIONS APPLICABLE TO VEHICLE FIRE INVESTIGATION

In the automotive industry, the use of computer simulations is inevitable throughout the entire design and manufacturing process. With the help of simulations, costs can be significantly reduced; however, this requires accurate data and measurements in advance to ensure reliable

results. In the currently evolving automotive sector, safety is being focused on severely, within safety one important aspect is vehicle-related fire incidents that pose serious safety risks. Fire simulations can provide valuable support in the investigation of such events. Unfortunately, in recent years, relatively few studies dealt with the modeling of vehicle fires, the numerical analysis of fire spread, or the applicability of various simulation methods. The aim of this study is to conduct a case study analysis of previously published vehicle fire simulations. During the study, we compared simulation results from several international sources, evaluated the input parameters used, and the practical applicability of the simulations. The aim of the analysis is to explore the strengths and limitations of different modeling approaches, which can contribute to the development of firefighting strategies and the improvement of vehicle fire safety.

Keywords: fire safety, FDS, vehicle fire, fire simulation

Felhasznált irodalom

49 CFR § 571.301 Standard No. 301; Fuel system integrity.

49 CFR § 571.302 Standard No. 302; Flammability of Interior Materials.

ABEDSOLTAN, Hossein (2024): Applications of Plastics in the Automotive Industry: Current Trends and Future Perspectives. *Polymer Engineering & Science*, 64(3), 929–950. Online: <https://doi.org/10.1002/pen.26604>

BADONSZKI Csaba – BÉRCZI László (2021): A tűzvédelmi tervezés fő tartópillérei a tűzvédelmi műszaki irányelvek. *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, 6(2), 66–96. Online: <https://doi.org/10.61790/vt.2021.6.2.66>

BEREK Tamás – FÖLDI László – PADÁNYI József (2020): The Structure and Main Elements of Disaster Management System of the Hungarian Defence Forces, with Special Regard to the Development of International Cooperation. *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 19(1), 17–26. Online: <https://doi.org/10.32565/aarms.2020.1.2>

Bézier Award [é. n.]. *Solid Modeling Association*. Online: <http://solidmodeling.org/awards/bezier-award/>
BS 7974:2019. *Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings* (2019). London: BSI Group.

BRZEZINSKA, Dorota – BRYANT, Paul (2022): Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. *Energies*, 15(2), 649. Online: <https://doi.org/10.3390/en15020649>

Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV) [é. n.]. *National Institute of Standards and Technology*. Online: <https://pages.nist.gov/fds-smv/>

GAVRYLIUK, Andrii et al. (2023): Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 11(3), 421–434. Online: <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>

- GINDIS, Elliot (2012): *Up and Running with AutoCAD 2012. 2D and 3D Drawing and Modeling*. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Academic Press.
- HAJDU Flóra – PAPP Csenge – KUTI Rajmund (2025): Fire Simulation of Different Complex Geometry Tree Objects Using FDS. *Pollack Periodica*, 20(2), 67–72. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2024.01225>
- HALADA, Ladislav et al. (2011): Computer Simulation of Automobile Fires. *Communications: Scientific Letters of the University of Žilina*, 13(2), 69–73. Online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2011.2.69-73>
- Highway Vehicle Fires (2014–2016) (2018). *Topical Fire Report Series*, 19(2). Online: www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/statistics/v19i2.pdf
- HYNYNEN, Jonna et al. (2023): Analysis of Combustion Gases from Large-Scale Electric Vehicle Fire Tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829. Online: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103829>
- JIANG, Xiao-hui et al. (2018): Full-Scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars. *Procedia Engineering*, 211, 297–305. Online: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.016>
- KANG, Sungwook et al. (2023): Full-Scale Fire Testing of Battery Electric Vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497. Online: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120497>
- KANYÓ Ferenc (2018): Elektromos gépjárművek tűzoltásának nemzetközi és hazai tapasztalatai. *Védelem Online*, 2, 19–20.
- KUTI Rajmund (2019): *Alkalmazott műszaki mentések és technikák*. Győr: Palatia.
- MSZ EN 1991-1-2:2005. *Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1.2. rész: Általános hatások. A tűznek kitett szerkezeteket érő hatások* (2005). Budapest: Magyar Szabványügyi Testület.
- MIECHÓWKA, Bartosz – WĘGRZYŃSKI, Wojciech (2025): Systematic Literature Review on Passenger Car Fire Experiments for Car Park Safety Design. *Fire Technology*, 61, 2651–2688. Online: <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01701-5>
- PAPP Csanád (2024): Elektromos járművek okozta kihívások tűzoltás és műszaki mentés során. *Védelem Tudomány*, 9(4), 12–41. Online: <https://doi.org/10.61790/vt.2024.17933>
- PAPP Csenge – KERSÁK József (2023): Közúti járművekben keletkezett tüzek okai. *Hadmérnök*, 18(2), 109–121. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2023.2.7>
- PITANA, Trika et al. (2025): Simulation of an Electric Vehicle Fire on a Ro-Ro Ferry. *Journal of Applied Engineering Science*, 23(1), 45–55. Online: <https://doi.org/10.5937/jaes0-51952>
- SZABÓ Viktória – MOLNÁR Kristóf – NAGY Rudolf (2018): Elektromos járművek tűzbiztonságának vizsgálata. *Védelem Tudomány*, 3(2), 77–118.
- TERZIEV, Angel (2019): Study of the Fire Dynamics in a Burning Car and Analysis of the Possibilities for Transfer of Fire to a Nearby Vehicle. *E3S Web of Conferences*, 112, 01015. Online: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911201015>
- TÓTH Zoltán (1984): A közúti járművek tűzvédelme. In HUSZÁR Imre (szerk.): *Közlekedési eszközök és létesítmények tűzvédelme*. Budapest: Belügyminisztérium, 288–308.

A kritikus szervezetekkel kapcsolatos kockázat- és következményelemző módszerek kutatása

Együttműködési platform alkalmazása

A kritikus (létfenntartású) szervezetek és infrastruktúrák védelme kiemelt jelentőségű a modern társadalmakban, ahol a globális összekapcsoltság és a technológiai fejlődés új típusú kihívásokkal jár. Jelen tanulmány biztonságos együttműködési platformot javasol a kritikus szervezetek vezetői és a hatóságok részére, amely információt biztosít a kritikus szervezeteket fenyegető kockázatokról, és erősíti az ágazatközi koordinációt Magyarországon. A 2025-ös szabályozási környezethez igazodva a platform valós idejű adatfeldolgozást és prediktív modellezést integrál. Célja a szervezetek és a hatóságok közötti kommunikáció javítása, valamint hozzájárul a kritikus szervezetek kockázatelemzésének felülvizsgálatához és azzal kapcsolatos folyamatok gyorsításához.

Kulcsszavak: kritikus entitások, együttműködés, kockázatelemzés

Bevezetés

A kritikus szervezetek infrastruktúrái Magyarország társadalmi és gazdasági stabilitásának alapvető pillérei. Az e szektorok működését fenyegető kockázatok, különösen az éghajlatváltozásból eredő környezeti hatások, mint például az árvizek és az aszályok, valamint az infrastrukturális elavulás, egyre összetettebb kihívásokat jelentenek. A kritikus szervezetek ellenálló képességéről szóló 2024. évi LXXXIV. törvény és az Európai Parlament és Tanács (EU) 2022/2557 Irányelve a kritikus szervezetek rezilienciájáról (CER irányelv) szigorú követelményeket támaszt a kockázatelemzés és az ellenálló képesség biztosítása terén, előírva a dokumentáció szabványosítását és a szektorközi együttműködést [Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2022/2557 irányelv (2022. december 14.) a kritikus szervezetek rezilienciájáról és a 2008/114/EK tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről].

E dinamikus kockázati környezetben a hagyományos kockázatelemzési keretrendszerek, mint az ISO 31000, nem minden esetben alkalmasak a magyar kritikus entitások specifikus igényeire, különösen a szektorok közötti függőségek és a környezeti kockázatok kezelése terén (ISO 31000:2018 Risk

Management – Guidelines). E kihívások kezelésére jelen kutatás felhőalapú együttműködési platformot javasol, amely integrálja a dokumentummegosztást, a kommunikációt, a kérelemkezelést és az adatvizualizációt, hogy támogassa a hibrid fenyegetések kockázatelemzésének elkészítését és felülvizsgálatát. Jelen kutatás célja a platform kockázatelemzési képességeinek vizsgálata, különös tekintettel a hibrid fenyegetések kezelésére (PÖRTNER et al. 2022).

A kutatási kérdés a következő: hogyan támogatható a hibrid fenyegetések kockázatelemzése műszakilag robusztus együttműködési platformon keresztül, figyelembe véve a magyar kritikus entitások ágazatspecifikus és ágazatközi igényeit? A kutatás esettanulmányokon keresztül vizsgálja a platform gyakorlati alkalmazhatóságát.

A kritikus szervezetek platformjának felépítése

A kritikus szervezetek platformja közös felületet biztosít, amely hozzájárul a magyar kritikus szervezetek, úgymint az energia-, közlekedési, honvédelmi, víz- és pénzügyi ágazat szereplői, azaz az ellenálló képességért felelős vezetők és a hatóságok közötti kapcsolattartásra és információcserére. Ez komplex feladat, amely egyszerre igényel technológiai, szabályozási és szervezeti megfontolásokat. Az alábbiakban részletesen bemutatunk egy általunk kidolgozott ajánlást a platform kialakítására, figyelembe véve a magyar kontextust, a hatályos szabályozási környezetet, valamint a környezeti és infrastrukturális kockázatokra fókuszáló megközelítést. A javaslatok kialakítása során szem előtt tartottuk a gyakorlati megvalósíthatóságot és a magyar kritikus entitások igényeit.

A biztonságos, felhőalapú együttműködési platform integrálja a dokumentummegosztást, a kommunikációt, a kérések benyújtását és a hatósági interakciót. A platformot úgy szükséges kialakítani, hogy támogassa a kritikus entitások és a hatóságok közötti hatékony együttműködést.

Főbb funkciók

A platform működésének alapját képező főbb funkciók között szerepel a *dokumentummegosztás és -kezelés*, amely biztonságos feltöltési és tárolási lehetőségeket kínál kockázatelemzési dokumentumok, ellenálló képességi tervek, hatósági jelentések és egyéb releváns anyagok számára. A rendszer verziókezelési

és hozzáférési jogosultságokkal rendelkezik, ami biztosítja, hogy csak az adott szektor vagy hatóság férjen hozzá bizonyos dokumentumokhoz, valamint kereshető adatbázist nyújt a dokumentumok gyors visszakereséséhez.

A *kommunikációs csatornák* között található a kérdés-válasz fórum, ahol a kritikus szervezetek vezetői közvetlenül tehetnek fel kérdéseket szabályozási megfelelésről, árvíz-kockázatról, akár egymásnak, akár a hatóságok képviselőinek. A rendszer valós idejű csevegő- vagy üzenetküldő funkcióval rendelkezik a gyors interakcióhoz, valamint lehetővé teszi webináriumok és képzések szervezését a kockázatkezelési legjobb gyakorlatok megosztása céljából.

Az *igények és segítségkérések benyújtása* űrlapalapú rendszeren keresztül működik a hatósági kérelmek, például az engedélyezési vagy támogatási igények benyújtásakor, sürgősségi segítségkérési csatornát biztosít olyan vészhelyzetek esetére, mint az árvíz vagy az infrastrukturális meghibásodás, valamint státusz-követési lehetőséget biztosít a benyújtott kérelmek állapotának nyomon követésére.

Adatvizualizáció és technológiai megoldások

Az adatvizualizáció területén interaktív elemek jelenítik meg a kockázati adatokat, mint az infrastrukturális állapot és a megváltozott kockázati tényezők, térképek vagy grafikonok formájában. A szabályozási megfelelés támogatása érdekében beépített sablonok állnak rendelkezésre az ellenálló képességi tervekhez és a kockázatelemzési dokumentumokhoz, valamint auditnaplózás támogatja a hatósági ellenőrzéseket.

A platform technológiai alapjául biztonságos, skálázható felhőszolgáltatás javasolt, például Microsoft Azure Government (2030 *Smart Communities: Envisioning New Possibilities for State and Local Governments* 2019) vagy Amazon Web Services GovCloud [How Government Technology Leaders Can Increase Efficiency with AWS GovCloud (US) 2025], amelyek megfelelnek az Európai Unió adatvédelmi előírásainak és a magyar szabályozási követelményeknek.

Szervezeti és szabályozási megfontolások

A hatósági integráció keretében a platformot a magyar hatóságokkal együttműködve szükséges kialakítani, hogy biztosítsa a hatályos szabályozás és a CER irányelv szerinti megfelelést. Az ágazatspecifikus testreszabás során a platform különböző

modulokat kínál az egyes ágazatok egyedi kockázataihoz, például a vízágazat számára árvíz- és aszálykockázati sablonokat. A képzés és a támogatás területén a platform bevezetését képzésekkel szükséges támogatni a kritikus szervezetek vezetői és a hatósági képviselők számára, hogy biztosítsák a hatékony használatot (STAMP et al. 2003).

A platformmal kapcsolatos esettanulmányok

A platform használatának szemléltetése érdekében két esettanulmányt mutatok be. Az egyik egy fiktív vízmű, a Partvíz Zrt. kritikus szervezet vezetője által használható funkciókat mutatja be, a másik esettanulmány pedig a Magyar Védelmi Infrastruktúra Zrt. katonai létesítmények fenntartásáért és védelméért felelős cég példáját vizsgálja.

A Partvíz Zrt. esettanulmánya

A Partvíz Zrt. egy fiktív magyar vízmű, amely egy közép-magyarországi régió vízellátását és szennyvízkezelését biztosítja, kiszolgálva körülbelül 200 000 lakost és számos ipari létesítményt. A vízmű kritikus szervezetként került nyilvánításba, mivel a vízellátás kiesése súlyos társadalmi és gazdasági hatásokkal járna (ROSATO et al. 2023).

A kockázatelemzés célja a Partvíz Zrt. működését fenyegető környezeti és infrastrukturális kockázatok azonosítása, értékelése és kezelése az adaptált ISO 31000 keretrendszer alkalmazásával, figyelembe véve a hatályos magyar szabályozási környezetet. Az ISO 31000 kockázatkezelési keretrendszer adaptálása kiegészül szektorspecifikus elemekkel, például forgatókönyv-analízissel a környezeti kockázatok kezelésére.

A fiktív Partvíz Zrt. vízmű esettanulmányához igazítva a platformon elsősorban a dokumentummegosztást használná a vezető, ahol a Partvíz Zrt. feltölti árvíz-kockázati elemzését és ellenálló képességi tervét, amelyhez a hatóságok hozzáférnek, és visszajelzést tudnak adni. Emellett a vízmű vezetője kérdést tesz fel a fórumon az aszálykezelési legjobb gyakorlatokról, amelyre a hatóság válaszol. A Partvíz Zrt. európai uniós pályázati támogatást kér a csőhálózat felújítására egy űrlapon keresztül, és nyomon követi a kérelem státuszát. A platform térképen jeleníti meg a dunai árvíz-kockázati zónákat, segítve a Partvíz Zrt.-t a védművek tervezésében.

A platform használata közben kihívásként jelentkezhetnek a különböző ágazatok és hatóságok eltérő hozzáférési szintjei miatti jogosultságkezelési problémák. Ennek kiküszöbölése érdekében szigorú szerepköralapú hozzáférés (RBAC) és auditnaplózás szükséges. A platformnak integrálódnia kell a meglévő hatósági jelentéstételi rendszerekkel, így ajánlott alkalmazásprogramozási felületek (API-k) használata az adatcserehez. A platform bevezetése költséges lehet kisebb vízművek számára, így központi finanszírozás, például európai uniós vagy állami támogatás javasolt a platform fenntartására. Emellett a kritikus szervezetek vezetői nem feltétlenül jártasak a digitális platformok használatában, így felhasználóbarát felület kialakítása és célzott képzések lebonyolítása szükséges.

A Magyar Védelmi Infrastruktúra Zrt. esettanulmánya

A Magyar Védelmi Infrastruktúra Zrt. (MVI Zrt.) olyan fiktív magyar szervezet, amely a honvédelmi szektor kritikus infrastruktúráinak (mint például katonai bázisok, logisztikai raktárak és kommunikációs rendszerek) fenntartásáért és védelméért felel. A szervezet kritikus szervezetként került nyilvántartásba, mivel működése kulcsfontosságú a nemzetbiztonság szempontjából. A platform használatának célja biztosítani a hatékony információcserét, dokumentummegosztást és kérelemkezelést az MVI Zrt., a honvédelmi ágazat más szervezetei, az ellenálló képességért felelős vezetők és a hatóságok, például a Honvédelmi Minisztérium között, különös tekintettel a 2025-ös környezeti, infrastrukturális és szabályozási kihívásokra.

Az MVI Zrt. infrastruktúrái közé tartoznak a katonai bázisok, mint a laktanyák és a légibázisok, a logisztikai raktárak fegyverek, üzemanyag és élelmiszer tárolására, valamint a kommunikációs rendszerek. Országos hatáskörrel rendelkezik, kiemelt fontosságú létesítményekkel Budapest, Székesfehérvár és Debrecen környékén. Működési környezetében megtalálhatók a környezeti kockázatok, például az árvizek és a viharok, az elavult infrastruktúra, mint a 30–40 éves épületek és rendszerek, valamint a szigorú szabályozási követelmények.

A platform funkciói a honvédelmi ágazat és az MVI Zrt. igényeihez igazítva a következő módon működnek:

- Az MVI Zrt. feltölti a laktanyák árvíz-kockázati elemzését és infrastrukturális felújítási tervét a platformra.
- A Honvédelmi Minisztérium ellenőrzi a dokumentumokat, és visszajelzést ad a CER irányelv szerinti megfelelésről.

- A zárt fórumon a vezető kérdéseket tesz fel a katonai létesítmények környezeti kockázatairól vagy szabályozási követelményekről.
- A valós idejű csevegő révén vészhelyzeti helyzetekben, például viharkárok esetén gyors kommunikáció biztosított a vezetők és a hatóságok között. Az MVI Zrt. vezetője kérdést tesz fel a platform fórumán a katonai bázisok árvízvédelmének finanszírozási lehetőségeiről, amelyre az SZTFH szakértője válaszol.
- Webináriumokat és képzéseket szerveznek az ellenálló képességi legjobb gyakorlatokról, például a logisztikai raktárak védelméről.
- A platformon keresztül az MVI Zrt. kérelmet nyújt be európai uniós finanszírozásra egy elavult katonai raktár felújításához, és a platformon keresztül nyomon követi a kérelem elbírálását.
- Árvízi vészhelyzetben az MVI Zrt. sürgősségi segítséget kér a Belügyminisztériumtól vagy a Honvédelmi Minisztériumtól a platformon keresztül.
- Státuszkövetés a benyújtott kérelmek állapotának nyomon követésére.
- Interaktív műszerfalak a kockázati adatok megjelenítésére, például térképek a katonai létesítmények árvíz-kockázati zónáiról vagy grafikonok az infrastrukturális állapotokról. A platform térképen mutatja a dunai árvíz-kockázati zónákat, segítve az MVI Zrt.-t a védelmi intézkedések tervezésében.
- Automatizált jelentéskészítés a szabályozási megfeleléshez. Az MVI Zrt. automatikusan kockázatelemzési jelentést generál a platformon, amelyet benyújt a Honvédelmi Minisztériumnak.
- A beépített sablonok az ellenálló képességi tervekhez és a kockázatelemzési dokumentumokhoz segítik a gördülékeny munkamenetet. Az MVI Zrt. a platform sablonjait használja egy katonai bázis ellenálló képességi tervének kidolgozásához, amely megfelel a CER irányelvnek.
- Az auditnaplózás a hatósági ellenőrzéseket támogatja, például a dokumentumok hozzáférési előzményeinek nyomon követését. A platform naplózza, hogy a Honvédelmi Minisztérium mikor és hogyan fér hozzá az MVI Zrt. dokumentumaihoz, biztosítva az auditálhatóságot.

Kockázatelemzési integráció a platformon

Az ISO 31000 keretrendszert alkalmazva a platform támogatja a honvédelmi szektor kockázatelemzését. A kockázati kontextus magában foglalja a környezeti kockázatokat, mint az árvizek és a viharok hatása a katonai létesítményekre,

az infrastrukturális kockázatokat, mint az elavult épületek és rendszerek meghibásodása, valamint a szabályozási kockázatokat, mint a hatályos jogszabályok előírásainak nem teljesítése.

A kockázatok azonosítása során az árvíz valószínűsége 3/5, hatása 4/5, ami magas kockázati szintet jelent. Az infrastrukturális meghibásodás valószínűsége 4/5, hatása 3/5, ami közepes-magas kockázati szintet jelent. A szabályozási megfelelési hiány valószínűsége 2/5, hatása 4/5, ami közepes kockázati szintet jelent.

11.1. táblázat. *Kockázati mátrix az MVI Zrt. esetében*

A kockázat típusa	Valószínűség	Hatás	Kockázati szint
Árvíz	3/5	4/5	Magas
Infrastrukturális meghibásodás	4/5	3/5	Közepes-magas
Szabályozási megfelelési hiány	2/5	4/5	Közepes

Forrás: a szerző szerkesztése

A kockázatok kezelése során az árvíz esetében védművek építése és vészhelyzeti evakuálási tervek kidolgozása szükséges. Az infrastrukturális elavulás esetében a felújítási projektek prioritizálása és az európai uniós finanszírozás igénylése a platformon keresztül javasolt. A szabályozási megfelelés területén a platform sablonjainak használata ajánlott a kockázatelemzési dokumentációhoz.

Gyakorlati kihívások és megoldások

A biztonság és a hozzáférés a legfőbb szempont, mivel a honvédelmi ágazat bizalmas adatokat kezel, így a platformnak szigorú hozzáférési kontrollokat kell biztosítania. Ennek érdekében szerepköralapú hozzáférés, titkosítás és auditnaplózás szükséges (ALCARAZ–ZEADALLY 2015).

A másik gyakori kihívás az interdependencia, mivel a honvédelmi ágazat függ az energia- és a közlekedési ágazattól, például az áramellátás és a logisztikai útvonalak terén. Ennek kiküszöbölése érdekében a platform támogatja az ágazatok közötti adatcserét, például az MVI Zrt. és egy energiaszolgáltató közötti koordinációt. A platformot felhasználóbarát felületként szükséges kialakítani és célzott képzettséget szükséges tartani a Honvédelmi Minisztériummal együttműködve.

Előnyök és hozzáadott érték

A platform bevezetése és használata a következő előnyökkel járna a kritikus entitások vezetői és a hatóságok számára: a centralizált platform csökkenti a kommunikációs és adminisztratív terheket; a hatóságok és a kritikus entitások valós idejű hozzáférést kapnak a releváns információkhoz; a platform támogatja a gyors döntéshozatalt és a kockázatok proaktív kezelését, például árvízi vészhelyzetekben; a platform segít a kapcsolódó jogszabályok és a CER irányelv előírásainak teljesítésében.

Ajánlás a megvalósításra

Próbaprojekt keretében egy kiválasztott hatóság bevonása megfelelő kiindulópont. Egy releváns hatóság és ágazat kiválasztása javasolt a platform funkcióinak tesztelésére. A platform kialakítását megelőzően a technológiai megvalósításhoz szükséges együttműködni magyar informatikai cégekkel. A platform fejlesztésének és fenntartásának finanszírozása végett javasolt felmérni az európai uniós forrásokat és a hazai pályázatokat. A fejlesztés során kiemelten szükséges figyelmet fordítani az adatvédelemre (GDPR) és a kiberbiztonságra. A próbaprojekt végét követően összegezni szükséges a tapasztalatokat, majd ezt követően más ágazatokra kiterjeszthető a használat. Emellett a kritikus szervezetek szereplőinek bevonása növelheti a platform elfogadottságát.

A platform használatával járó előnyök és gyengeségek

A platform használatának előnyei

A hatékony információcsere terén a platform centralizált felületet biztosít a dokumentummegosztáshoz, a kérdések feltevéséhez és a kérelmek benyújtásához, csökkentve a kommunikációs időt és az adminisztratív terheket. Például az MVI Zrt. gyorsan megoszthatja árvíz-kockázati elemzéseit a Honvédelmi Minisztériummal, míg a Partvíz Zrt. aszálykockázati jelentéseket tölthet fel a hatóság számára.

A valós idejű kockázati monitorozás területén az interaktív műszerfalak, mint a kockázati mátrix és az árvíz-kockázati térkép, lehetővé teszik a környezeti és infrastrukturális kockázatok valós idejű nyomon követését. Például a platform

figyelmeztethet a Duna mentén várható árvizekről, segítve a gyors döntéshozatalt a honvédelmi vagy a vízágazatban.

A szektorközi együttműködés terén a platform támogatja az ágazatok közötti függőségek kezelését, például az energiaellátás és a honvédelem vagy a vízszektor és a közlekedés közötti koordinációt. Ez növeli az ellenálló képességet, például árvízi vészhelyzetben, ahol a Partvíz Zrt. és az MVI Zrt. együtt dolgozhat az erőforrások megosztásán.

A felhasználóbarát hozzáférés területén az egyszerű navigáció, például a gyorselérési gombok, lehetővé teszi, hogy a digitálisan kevésbé jártas felhasználók is hatékonyan használják a platformot. Képzési modulok bevezetése javasolt, amelyek tovább növelik a használhatóságot.

A platform használatának akadályai

A magas kezdeti költségek területén a platform fejlesztése és fenntartása jelentős beruházást igényel, különösen a biztonságos felhő-infrastruktúra esetében. A felhasználói elfogadás és képzési igény terén az új felület bevezetése hibás használatot okozhat, mivel a felhasználók kezdetben nehézkesen tudják használni a rendszert.

Az adatbiztonsági és hozzáférési kockázatok területén, bár a kiberbiztonság minimális hangsúlyt kapott, a honvédelmi ágazat bizalmas adatainak kezelése szigorú hozzáférési kontrollokat igényel. Bármilyen hozzáférési hiba vagy jogosulatlan hozzáférés súlyos következményekkel járhat, például nemzetbiztonsági adatok kiszivárgása.

Az ágazatspecifikus testreszabás komplexitása miatt a különböző ágazatok, például a honvédelem és a vízszektor eltérő kockázati profiljai és szabályozási követelményei miatt a platform testreszabása bonyolult lehet. Például a honvédelmi ágazat szigorúbb biztonsági előírásokat igényel, mint a vízágazat, ami növeli a fejlesztési és karbantartási költségeket.

A platform és a kockázatelemzés összefüggései

A magyar kritikus szervezetek, mint a honvédelmi, a víz-, az energia-, a közlekedési és a pénzügyi ágazat működését fenyegető környezeti és infrastrukturális kockázatok kezelése strukturált kockázatelemzési folyamatokat igényel, amelyeket a jogszabályok szigorúan szabályoznak [Az Európai Parlament és a Tanács (EU)

2022/2557 irányelv (2022. december 14.) a kritikus szervezetek rezilienciájáról és a 2008/114/EK tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről].

A javasolt felhőalapú együttműködési platform, amely integrálja a dokumentummegosztást, a kommunikációt, a kérelemkezelést és az adatvizualizációt, hatékony eszközt nyújt a kockázatelemzés elkészítéséhez és rendszeres felülvizsgálatához, jelentősen növelve a kritikus szervezetek és infrastruktúrák ellenálló képességét (ISO 31000:2018 Risk Management – Guidelines).

A kockázatelemzés elkészítésének támogatása

A platform a kockázatelemzés elkészítését több dimenzióban támogatja. Először, a centralizált dokumentummegosztó funkció lehetővé teszi a kockázati adatok, például az árvíz kockázati elemzések és az infrastrukturális állapotfelmérések strukturált tárolását és hozzáférését, biztosítva a szektorspecifikus sablonok használatát. Például a Partvíz Zrt. a platformon keresztül feltöltheti aszálykockázati jelentéseit, amelyeket a hatóság valós időben ellenőrizhet, csökkentve az adminisztratív terheket. Másodszor, a valós idejű adatvizualizációs eszközök, mint a kockázati mátrixok és az árvíz kockázati térképek, lehetővé teszik a kockázatok kvalitatív és térbeli elemzését, támogatva a döntéshozatalt (PÖRTNER et al. 2022). Az MVI Zrt. például a platform térképein azonosíthatja a dunai árvíz kockázati zónákat, elősegítve a védművek tervezését. Harmadszor, a fórum és a tudástár modul elősegíti az ágazatközi tudásmegosztást, például az árvízkezelési legjobb gyakorlatok cseréjét, ami növeli az elemzések minőségét (KOVÁCS 2007).

A kockázatelemzés felülvizsgálatának támogatása

A kockázatelemzés felülvizsgálatát a platform dinamikus és együttműködést támogató funkciói biztosítják. A kommunikációs csatornák, például a fórum és a valós idejű csevegő, lehetővé teszik a hatóságok (mint a Honvédelmi Minisztérium) (KOVÁCS et al. 2024) és a kritikus szervezetek közötti gyors visszajelzést, például a kockázati jelentések megfelelőségéről.

Az auditnaplózási funkció nyomon követi a dokumentumok módosításait és hozzáféréseit, biztosítva a jogszabályok szerinti átláthatóságot. Továbbá, a kérelemkezelési modul lehetővé teszi a kockázati intézkedések, például az infrastrukturális felújítások finanszírozási igényeinek benyújtását és nyomon követését,

amely a felülvizsgálati folyamat szerves része. Például az MVI Zrt. a platformon keresztül kérelmezhet támogatást egy elavult katonai raktár felújítására, és a kérelem státuszát valós időben ellenőrizheti.

Összességében a platform integrált megközelítése jelentősen növeli a kockázatelemzés hatékonyságát és pontosságát, miközben támogatja a szabályozási megfelelést és a szektorközi együttműködést. A platform alkalmazása különösen releváns a magyar kritikus entitások számára, amelyek az éghajlatváltozás (PADÁNYI 2021) és az infrastrukturális elavulás okozta kihívásokkal szembesülnek, így hozzájárul a nemzetbiztonsági és társadalmi stabilitás fenntartásához (HADJI-JANEV 2016).

Gyakorlati alkalmazás a hibrid fenyegetések kezelésében

A platform integrált eszközei, úgymint a dokumentummegosztás, a kommunikáció, a kérelemkezelés és az adatvizualizáció, nemcsak a szabályozási megfelelést támogatják, hanem a hibrid fenyegetések komplexitásának kezelésére is megoldást nyújtanak, elősegítve a gyors és adatvezérelt döntéshozatalt.

A platform gyakorlati alkalmazása a hibrid fenyegetések kockázatelemzésének elkészítésében különösen az ágazatspecifikus és ágazatközi igények kielégítésében mutatkozik meg. A dokumentummegosztó modul lehetővé teszi, hogy a kritikus szervezetek, mint az MVI Zrt., strukturált formában gyűjtsék és osszák meg a hibrid fenyegetésekre vonatkozó adatokat, például az árvíz-kockázatok és az elavult katonai infrastruktúra együttes hatásait. A platform sablonjai biztosítják, hogy az elemzések egységesek és auditálhatók legyenek, így a hatóságok számára azonnal ellenőrizhetők. Az adatvizualizációs eszközök, például a kockázati mátrixok és az árvíz-kockázati térképek, valós idejű betekintést nyújtanak a hibrid fenyegetések térbeli és súlyossági dimenzióiba. Például a Partvíz Zrt. a platform térképein keresztül azonosíthatja azokat a csőhálózati szakaszokat, amelyek egyszerre vannak kitéve aszálynak és infrastrukturális elavulásnak, lehetővé téve a célzott intézkedések tervezését. A fórum támogatja az ágazatközi kommunikációt, például a honvédelmi ágazat árvízvédelmi tapasztalatai adaptálhatók a vízgazdálkodásra, növelve az elemzések gyakorlati relevanciáját (*EU-NATO Task Force on the Resilience of Critical Infrastructure. Final Assessment Report* 2023).

A kockázatelemzés felülvizsgálatában a platform gyakorlati előnyei a dinamikus visszacsatolási mechanizmusokban és az intézkedések nyomon követésében rejlenek. A kommunikációs csatornák, mint a fórum és a valós idejű csevegő, lehetővé teszik a hatóságok és a szervezetek közötti közvetlen interakciót, például az MVI

Zrt. hibrid fenyegetésekre vonatkozó jelentéseinek validálását. Az auditnaplózási funkció részletesen dokumentálja a kockázati jelentések módosításait, biztosítva a szabályozási átláthatóságot és a hibrid fenyegetések folyamatos monitorozását (VASS 2015). A kérelemkezelési modul kulcsfontosságú a felülvizsgálati folyamatban, mivel lehetővé teszi a hibrid fenyegetések kezelésére irányuló intézkedések, például az árvízvédművek vagy az infrastrukturális felújítások finanszírozási igényeinek benyújtását és státuszuk nyomon követését. Például a Partvíz Zrt. a platformon keresztül kérelmezhet támogatást az aszály és az elavult csőhálózat együttes kockázatainak csökkentésére, és a kérelem előrehaladását valós időben ellenőrizheti, ami közvetlenül kapcsolódik a kockázati intézkedések hatékonyságának felülvizsgálatához (FÖLDI–PADÁNYI 2022).

A platform gyakorlati alkalmazásai a hibrid fenyegetések kockázatelemzésében a szektorközi koordináció, az adatvezérelt döntéshozatal és a szabályozási megfelelés szinergiáján alapulnak. A magyar kritikus szervezetek számára, amelyek a klímaváltozás és az infrastrukturális elavulás összetett fenyegetéseivel szembesülnek, a platform nélkülözhetetlen eszköz a kockázatelemzés hatékonyságának növelésére és a nemzetbiztonsági infrastruktúra védelmére (EU-NATO Task Force on the Resilience of Critical Infrastructure. Final Assessment Report 2023).

Külföldi tapasztalatok

A hibrid fenyegetések, amelyek környezeti és infrastrukturális kockázatok kombinációjából erednek, globális szinten kihívást jelentenek a kritikus szervezetek védelmében. Az ágazatközi együttműködést és adatvezérelt kockázatelemzést támogató felhőalapú együttműködési platformok kulcsfontosságúak a fenyegetések kezelésében. Az általam javasolt platform nemzetközi példákra alapul. Az alábbiakban három releváns külföldi platformot mutatok be: az Egyesült Államok, Németország és Kanada rendszerét, amelyek műszaki és kockázatelemzési szempontból adaptálhatók a magyar kontextusra, például az ágazatok igényeire.

Egyesült Államok: CISA Critical Infrastructure Threat Information Sharing Framework

Az Egyesült Államokban a Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA) által üzemeltetett *Critical Infrastructure Threat Information Sharing*

Framework platform a kritikus ágazatok (például víz, energia és közlekedés), valamint a hatóságok közötti együttműködést támogatja (*Critical Infrastructure Threat Information Sharing Framework: A Reference Guide for the Critical Infrastructure Community* 2016). A platform funkciói közé tartozik a dokumentum-megosztás: például kockázati jelentések, valós idejű fenyegetési értesítések és adatvizualizációs eszközök, például kockázati mátrixok és GIS-alapú térképek, amelyek a hibrid fenyegetések, mint az árvizek és az infrastrukturális kiesések elemzését segítik (CARPIGNANO et al. 2021).

Például a vízágazat árvíz-kockázati adatait a platform integrálja a szövetségi és állami hatóságokkal, lehetővé téve a gyors döntéshozatalt, hasonlóan a magyar platform javasolt térkép-funkciójához. Műszakilag a platform Amazon Web Services (AWS) felhő-infrastruktúrán fut, REST-fül API-kat használ az adatcseréhez és szerepkör-alapú hozzáférés-ellenőrzést (RBAC) alkalmaz az érzékeny adatok védelmére, például a vízszektor infrastrukturális állapotjelzéseinek kezelésére. A platform skálázhatóságát Kubernetes-alapú konténerkezelés biztosítja, amely nagy adatmennyiségek, például valós idejű árvízszint-adatok feldolgozására alkalmas (*EU-NATO Task Force on the Resilience of Critical Infrastructure. Final Assessment Report* 2023). A CISA-platform auditnaplózási rendszere nyomon követi a kockázati jelentések módosításait, biztosítva a szabályozási megfelelést.

Németország: Allianz für Cybersicherheit és KRITIS platform

Németországban a Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) által koordinált Allianz für Cybersicherheit és a kapcsolódó KRITIS (Kritische Infrastrukturen) platform a kritikus infrastruktúrák védelmét támogatja, beleértve a környezeti és infrastrukturális kockázatok elemzését (ROSATO et al. 2023). Bár a platform eredetileg a kiberbiztonságra fókuszált, az ágazatközi függőségek miatt kiterjed a hibrid fenyegetésekre, például az árvizek és az elavult vízellátási rendszerek kombinációjára.

A platform fórumokat, tudástárat és adatvizualizációs eszközöket kínál, például GIS-alapú térképeket a Rajna menti árvíz-kockázatok elemzésére, amelyek a magyar platform tudástárához és térkép-funkciójához hasonlóak. A platform Microsoft Azure környezetben működik, és Open Geospatial Consortium (OGC) szabványokat használ a térbeli adatok kezelésére, biztosítva a vízszektor és a tartományi hatóságok közötti interoperabilitást. A műszaki architektúra REST API-kat és adatbázisokat, például PostgreSQL alkalmaz, amelyek lehetővé teszik

a kockázati jelentések, mint az infrastrukturális állapotfelmérések valós idejű megosztását (SKOPIK–SETTANNI–FIEDLER 2016). A platform auditnaplózási és titkosítási protokolljai, például AES-256 és TLS 1.3, védik az érzékeny adatokat, például a vízszektor csőhálózati kockázatait.

*Kanada: Canada–United States
Action Plan for Critical Infrastructure (CUSCI)*

Kanadában a Canada–United States Action Plan for Critical Infrastructure (CUSCI) keretében működő platform az Egyesült Államokkal közös kockázatelemzést és adatmegosztást támogat a kritikus szektorok, például a víz- és az energiaszektor védelmére (HADJI-JANEV 2016). A platform valós idejű adatmegosztást, kommunikációs csatornákat, például fórumokat és kérelemkezelést kínál, például infrastrukturális felújítási kérelmek kezelésére árvíz-kockázatok esetén. Például a kanadai vízszektor Nagy-tavak menti árvíz-kockázati adatai a platformon keresztül érhetők el, hasonlóan a magyar platform kérelemkezelő és tudástár funkciójához (DE LAAT 2012).

Műszakilag a platform Google Cloud Platform (GCP) környezetben fut és GIS-alapú vizualizációkat (például Leaflet.js) használ a kockázatok térbeli elemzéséhez, például az árvíz-kockázati zónák kijelölésére. A platform API-kon keresztül integrálódik a kanadai és amerikai hatóságokkal, JSON-adatcsere-protokollokat alkalmazva. A skálázhatóságot GCP autoscaling funkciói biztosítják, amelyek nagy adatmennyiségek, például valós idejű árvízszint-érzékelők kezelésére alkalmasak (DA SILVA et al. 2025). A platform adatbiztonsági protokolljai, például az OAuth 2.0 és az auditnaplózás, megfelelnek a kanadai szabályozási követelményeknek, amelyek az Európai Unió CER irányelvéhez hasonlóak. A CUSCI platform adaptálása a magyar kontextusra, például a Partvíz Zrt. aszály- és árvíz-kockázati elemzéseéhez, lokalizált adatforrásokat és a Microsoft partnerségét igényelheti.

*Magyar kontextus
és adaptálási lehetőségek*

A bemutatott platformok, úgymint a CISA, az Allianz für Cybersicherheit/KRITIS és a CUSCI funkciói (például dokumentummegosztás, adatvizualizáció és kommunikáció), valamint műszaki alapjai (például felhő-infrastruktúra, API-k és

GIS) párhuzamba állíthatók a magyar platform javasolt képességeivel, például a kockázati mátrixszal és térképpel. Azonban a magyar kontextusban a helyi szabályozási követelmények és ágazatspecifikus igények, például a Duna menti árvíz-kockázatok testreszabást igényelnek.

A platform leírása

A platform szemléltetése érdekében javasolt látványtervet készítettünk. A kezdő-oldal az alábbi elemeket tartalmazza.

A navigációs sávon található a bejelentkezés, az ágazat kiválasztása és a gyors-linkek a fő funkciókhoz, úgymint dokumentumok, fórum és kérelmek. A kezdő-oldalon található meg az üdvözlőszekció, majd a kiemelt hírek és a figyelmeztetések. Ezek valós idejű értesítések, például árvíz-kockázati figyelmeztetések vagy szabályozási frissítések. Ez alatt található az interaktív műszerfal egyszerű kockázati mátrixszal és térképpel, amely a felhasználót a részletes elemzésekhez irányítja.

A bejelentkezési oldalon az ellenálló képességért felelős vezető vagy a kritikus szervezet vezetője bejelentkezhet saját oldalára. A dokumentumok oldalon új dokumentumokat tölthet fel a vezető, vagy megtekintheti a korábban feltöltötteket, amelyeket az általa kiválasztott hatóság számára tud beküldeni. A kérelmek oldalon új kérelmet tud benyújtani a vezető, amely lehet kérvény finanszírozásra, segítségkérés információról vagy tájékoztatás infrastrukturális felújításról.

A következő oldalon, a fórumon a vezetők kérdéseket tehetnek fel az aktuális változásokkal kapcsolatban, úgymint kockázatkezeléssel kapcsolatos kérdések vagy jogszabályi változások. A platform utolsó oldalán található a tudástár, ahol számos információ között lehet keresni, az aktuális jogszabályok és a fontosabb minták a tervezéshez mind megtalálhatók itt.

Összegzett következtetések és javaslatok

Következtetések

A platform bevezetése a hibrid fenyegetések kockázatelemzésének fejlesztésében jelentős előnyökkel járna a magyar kritikus szervezetek és hatóságok számára. Az alábbiakban a platform három kulcsfontosságú előnyét és azzal kapcsolatos javaslataimat fejtem ki.

A centralizált platform csökkenti a kommunikációs és adminisztratív terheket. A platform egyetlen hozzáférési pontot biztosít a kockázati adatok, a jelentések és a kommunikációs csatornák számára, megszüntetve a szétagolt rendszerekből eredő redundanciákat. Ez lehetővé teszi az ágazatközi koordináció hatékonyabbá tételét.

A hatóságok és a kritikus entitások valós idejű hozzáférést kapnak a releváns információkhoz. A platform valós idejű adatfeldolgozást és vizualizációt biztosít, lehetővé téve az árvíz-kockázati adatok vagy az infrastrukturális állapotjelentések azonnali elérését. Ez a funkcionalitás kritikus a hibrid fenyegetések dinamikus kezeléséhez.

A platform támogatja a gyors döntéshozatalt és a kockázatok proaktív kezelését, például árvízi vészhelyzetekben. A platform prediktív modellekkel és kockázati mátrixokkal támogatja a döntéshozatalt, például az árvízvédművek prioritásának meghatározásakor. Az automatizált értesítések lehetővé teszik a proaktív intézkedéseket. Ez csökkenti a reakcióidőt és növeli a kritikus infrastruktúrák ellenálló képességét.

Javaslatok

A platform kialakításával összefüggésben az alábbi javaslatokat fogalmaztam meg:

- *Pilotprojekt indítása:* pilotprojekt kezdeményezése a víz- vagy közlekedési ágazatban és az érintett hatósággal a platform funkcionalitásának, például a kockázati mátrixnak és a térképeknek a tesztelésére, három fázisban: elkészítés, implementáció és értékelés.
- *Partnerségek kialakítása:* együttműködés magyar informatikai cégekkel és szükség esetén nemzetközi platformszolgáltatókkal az értesítési rendszerek fejlesztésére.
- *Finanszírozási források bevonása:* európai uniós források felhasználása a platform fejlesztésére és fenntartására, költségvetési tervvel és költség-haszon elemzéssel.
- *Kockázatelemzési keretrendszer kidolgozása:* az ISO 31000 szabvány alapján olyan kockázati mátrix és metodológia fejlesztése, amely kvantitatív modellekkel elemzi a hibrid fenyegetéseket.
- *A képzés és a tudatosság növelése:* a felhasználók képzése workshopokkal és kézikönyvekkel a platform és a kockázatelemzés hatékony használatára.

Összegzés

A kritikus szervezetek működését fenyegető környezeti és infrastrukturális kockázatok kezelése szükségessé teszi a centralizált, felhőalapú együttműködési platform bevezetését. A platform, amely dokumentummegosztást, kommunikációt, kérelemkezelést és adatvizualizációt (például kockázati mátrix és árvíz-kockázati térkép) integrál, hatékony megoldást kínál a jogszabályok által meghatározott szigorú követelményeknek való megfelelésre.

A platform elősegíti a valós idejű információcserét, például az árvíz-kockázati figyelmeztetések megosztását, ami növeli a kritikus szervezetek ellenálló képességét. Továbbá a szektorközi függőségek kezelésére szolgáló funkciók, például az energia- és a honvédelmi ágazat közötti koordináció, csökkentik a rendszerszintű kockázatokat. A platform automatizált jelentéskészítési és sablonalapú dokumentációs eszközei biztosítják a szabályozási megfelelést, minimalizálva a bírságok és a reputációs veszteségek kockázatát.

A felhasználóbarát felület és képzési modulok támogatják a platform elfogadását még a kevésbé digitálisan jártas felhasználók körében is, így elősegítve a hatékony kockázatkezelést és a nemzetbiztonsági infrastruktúra védelmét. A nemzetközi tapasztalatok, mint az amerikai CISA, a német KRITIS és a kanadai CUSCI platform, alátámasztják a javasolt megoldás megvalósíthatóságát és hatékonyságát a magyar kontextusban.

RESEARCH ON RISK AND CONSEQUENCE ANALYSIS METHODS RELATED TO CRITICAL ORGANIZATIONS: APPLICATION OF A COLLABORATION PLATFORM

The protection of critical organizations and infrastructures is of paramount importance in modern societies, where global interconnectedness and technological advancement create new types of challenges. This study proposes a secure collaboration platform for the leaders of critical organizations and authorities, providing information on risks threatening critical entities and strengthening cross-sectoral coordination in Hungary. Aligned with the 2025 regulatory environment, the platform integrates real-time data processing and predictive modeling. Its goal is to improve communication between organizations and authorities, as well as to support the review of risk assessments and accelerate related processes within critical organizations.

Keywords: critical entities, collaboration, risk analysis

Felhasznált irodalom

- 2030 Smart Communities: Envisioning New Possibilities for State and Local Governments (2019). Microsoft Corporation. Online: <https://info.microsoft.com/rs/157-GQE-382/images/2030SmartCommunities-e-book.pdf>
- ALCARAZ, Cristina – ZEADALLY, Sherali (2015): Critical Infrastructure Protection: Requirements and Challenges for the 21st Century. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 8, 53–66. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2014.12.002>
- Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2022/2557 irányelv (2022. december 14.) a kritikus szervezetek rezilienciájáról és a 2008/114/EK tanácsi irányelv hatályon kívül helyezéséről. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX:32022L2557>
- CARPIGNANO, Andrea et al. (2021): Resilience of Critical Infrastructures: A Risk Assessment Methodology for Energy Corridors. In ROSATO, Vittorio – DI PIETRO, Antonio (szerk.): *Issues on Risk Analysis for Critical Infrastructure Protection*. [H. n.]: IntechOpen. Online: <https://doi.org/10.5772/intechopen.94755>
- Critical Infrastructure Threat Information Sharing Framework: A Reference Guide for the Critical Infrastructure Community* (2016). Homeland Security. Online: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/ci-threat-information-sharing-framework-508.pdf>
- DA SILVA, Edvan Gomes et al. (2025): International Perspectives on Critical Infrastructure. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 49, 100761. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100761>
- DE LAAT, William (2012): The Beyond the Border Action Plan: A Tool for Enhanced Canada–U.S. Cooperation on Critical Infrastructure and Cyber Security - or More Window Dressing? *Canada–United States Law Journal*, 37(2), 451–468. Online: <https://scholarlycommons.law.case.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1073&context=cuslj>
- EU-NATO Task Force on the Resilience of Critical Infrastructure. *Final Assessment Report* (2023). Online: https://commission.europa.eu/system/files/2023-06/EU-NATO_Final%20Assessment%20Report%20Digital.pdf
- FÖLDI László – PADÁNYI József (2022): Climate Change as a Challenge to the Armed Forces. *Sodobni Vojaški Izzivi / Contemporary Military Challenges*, 24(4), 37–50. Online: <https://doi.org/10.33179/BSV.99.SVI.11.CMC.24.4.2>
- HADJI-JANEV, Metodi (2016): NATO's Role in Critical Infrastructure Protection and Cyber Security. In CAŞIN, Mesut Hakkı – GLUSCHKE, Guido (szerk.): *Critical Energy Infrastructure Protection and Cyber Security Policies*. Istanbul: Hazar İletişim, Tanıtım ve Yayıncılık A.Ş., 207–225.
- How Government Technology Leaders Can Increase Efficiency with AWS GovCloud (US)* (2025). Amazon Web Services. Online: <https://d1.awsstatic.com/GovCloud-Efficiency-Whitepaper-AWS-041825.pdf>
- ISO 31000:2018 Risk Management – Guidelines. Online: <https://www.iso.org/standard/65694.html>
- KOVÁCS László (2007): Kritikus információs infrastruktúrák Magyarországon. *Hadmérnök*, 2(Különszám). Online: http://www.hadmernok.hu/kulonszamok/robothadviseles7/kovacs_rw7.html
- KOVÁCS Tünde Anna et al. szerk. (2024): *Critical Infrastructure Protection in the Light of the Armed Conflicts*. Cham: Springer. Online: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47990-8>

- PADÁNYI József (2021): Az éghajlatváltozás hatásai, mint a katonai erő előtt álló biztonsági kihívások. *Hadtudomány*, 31(1), 31–43. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2021.31.1.31>
- PÖRTNER, Hans-Otto et al. szerk. (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge – New York: Cambridge University Press.
- ROSATO, Vittorio et al. (2024): Decision Support System for the Monitoring and Risk Analysis of National Critical Entities. In PICKL, Stefan et al. (szerk.): *Critical Information Infrastructures Security: CRITIS 2023*. Cham: Springer, 174–185. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-031-62139-0_10
- SKOPIK, Florian – SETTANNI, Giuseppe – FIEDLER, Roman (2016): A Problem Shared Is a Problem Halved: A Survey on the Dimensions of Collective Cyber Defense Through Security Information Sharing. *Computers & Security*, 60, 154–176. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2016.04.003>
- STAMP, Jason Edwin et al. (2003): *Common Vulnerabilities in Critical Infrastructure Control Systems*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- VASS Gyula (2015): *Veszélyes üzemekkel kapcsolatos veszélyeztetettség elemzési eljárás- és eszközrendszer fejlesztése Magyarországon*. PhD-disszertáció. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem.

Szakályné Gyürü Karina

Fenntartható műszaki fejlesztések a polgári védelemben

Az energiatakarékos és környezetbarát technológiák szerepe

A polgári védelmi szervezetek működésében kiemelt jelentőségű a fenntartható és energia-takarékos műszaki fejlesztések alkalmazása. A klímaváltozás és a természeti katasztrófák növekvő gyakorisága miatt elengedhetetlen a környezetbarát technológiák integrálása a katasztrófavédelem eszközparkjába. A megújuló energiával működő rendszerek, például a napelemes áramellátó egységek és az energiatakarékos felderítőeszközök jelentősen növelik az autonóm műveletek hatékonyságát. Emellett az alternatív hajtásláncú járművek, az intelligens érzékelőhálózatok és az újrahasznosított anyagok alkalmazása csökkenti a környezeti terhelést. A kutatás célja, hogy feltárja a polgári védelemben alkalmazható fenntartható technológiák jelenlegi és jövőbeli lehetőségeit, valamint meghatározza a környezetbarát innovációk katonai és polgári védelmi műveletekbe történő integrációjának lehetőségeit. Az eredmények hozzájárulhatnak a hatékonyabb, fenntarthatóbb és energiatudatosabb katasztrófavédelmi rendszer kialakításához.

Kulcsszavak: energiatakarékosság, fenntarthatóság, katasztrófavédelem, környezetbarát technológiák, polgári védelem

Bevezetés

A 21. század globális kihívásai, köztük a klímaváltozás, a környezeti károk fokozódása, valamint a természeti és ipari eredetű katasztrófák gyakoribbá válása új szemléletmódot követel meg a katasztrófavédelem területén is. A fenntarthatóság mint átfogó stratégiai elv egyre hangsúlyosabb szerepet kap nemcsak a környezetvédelmi és a gazdasági szférában, hanem a védelmi és a biztonsági szektorban, így a polgári védelemben is [Global Assessment Report (GAR) 2025. Resilience Pays: Financing and Investing for Our Future 2025].

A fenntartható fejlődés célja, hogy hosszú távon biztosítsa a társadalom és a gazdaság működését úgy, hogy közben ne lépjük túl a környezet teherbíró képességét. Ez azt jelenti, hogy olyan fejlődési pályát kell követnünk, amely nem

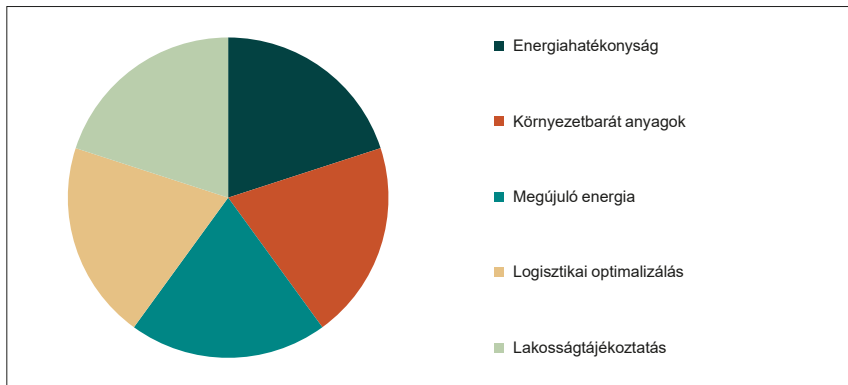
veszélyezteteti a természeti erőforrásokat és az ökológiai egyensúlyt. Valójában világméretű stratégiai irányvonalról van szó, amelyhez világosan meghatározott célok kijelölése és azok következetes megvalósítása szükséges. A *Nemzeti Fenntartható Fejlődési Keretstratégia* is hangsúlyozza, hogy bár a fenntarthatóság kapcsán elsősorban technológiai megoldásokat, például a megújuló energiaforrások használatát vagy az újrahasznosítást emelik ki, a valóban fenntartható társadalom megteremtése ennél mélyebb, főként kulturális kérdésként jelenik meg (SIBALIN – KÁTAI – URBÁN – CIMER 2023).

A polgári védelmi szervezetek hagyományos feladatkörei – életmentés, kár-elhárítás, lakosságvédelem – mellett ma már megkerülhetetlenné vált működésük környezeti fenntarthatóságának biztosítása is. A katasztrófavédelmi műveletek során alkalmazott technológiák jelentős energiaigénnyel járnak, és a beavatkozások gyakran hagynak jelentős ökológiai lábnyomot. Mindeközben a műszaki fejlesztések terén rendelkezésre állnak olyan környezetbarát megoldások, például megújuló energiát hasznosító rendszerek, alacsony kibocsátású járművek vagy intelligens szenzor-technológiák, amelyek alkalmazása hozzájárulhat a katasztrófavédelmi rendszerek energiahatékonyságához és környezetkímélő működéséhez (TEKNŐS 2021).

A fenntarthatóság beemelése a polgári védelem rendszerébe nemcsak környezetvédelmi, hanem stratégiai és gazdasági érdek is. Az autonóm energiagazdálkodású mobil egységek, az újrahasznosított vagy környezetbarát anyagokból épült mobil infrastruktúrák és a digitális adatkezelő rendszerek alkalmazása lehetővé teszi a gyorsabb és hatékonyabb reagálást, ugyanakkor csökkenti az erőforrás-felhasználás mértékét.

A környezetbarát technológiák alkalmazása nem csupán eszközhasználati szintű kérdés, hanem szemléleti változást is igényel a védelmi tervezésben. A fenntarthatóság elveinek integrálása a kockázatértékelésbe, a védelmi tervezésbe és a helyreállítási műveletekbe hosszú távon növeli a rendszerek rugalmasságát és alkalmazkodóképességét a megváltozott környezeti kihívásokhoz (MUHORAY 2016).

Jelen tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon a fenntarthatóság és az energia-takarékosság szerepéről a polgári védelmi műszaki fejlesztésekben. A cikk bemutatja a fenntartható technológiai megoldások elméleti alapjait és gyakorlati alkalmazási lehetőségeit, elemzi a hazai és nemzetközi példák tanulságait, valamint értékeli a fejlesztés előtt álló kihívásokat és lehetőségeket. A vizsgálat különös figyelmet fordít a megújuló energiával működő eszközökre, az alternatív hajtású járművekre, az intelligens felderítési rendszerekre, valamint az újrahasznosított anyagokból épült infrastruktúrákra. Az elemzés célja, hogy hozzájáruljon a fenntarthatóbb, energiahatékonyabb és technológiailag modern polgári védelmi rendszer kialakításához Magyarországon és nemzetközi szinten egyaránt (TEKNŐS 2023).



12.1. ábra. A polgári védelem fenntarthatósági pillérei

Forrás: a szerző szerkesztése

A fenntarthatóság elvei a polgári védelemben

Az energiatakarékos működés szükségessége

A fenntarthatóság a 21. század egyik legfontosabb globális kihívása, amely egyre nagyobb hangsúlyt kap a közszolgáltatások és a nemzetbiztonság területén is. A katasztrófavédelem mint a közrend és a lakossági biztonság fenntartásának egyik kulcseleme jelentős erőforrásokat igényel, különösen energiafelhasználás szempontjából. A védekezés, a mentés, valamint a helyreállítás során használt járművek, logisztikai rendszerek, kommunikációs eszközök és infrastrukturális megoldások jellemzően nagy energiaigényűek. Ez az energiafelhasználás gyakran fosszilis energiahordozókra épül, így a tevékenységek jelentős környezeti lábnyomot hagynak.

A 12.1. ábra a polgári védelem fenntarthatósági pilléreit szemlélteti, amelyek egymásra épülve alkotnak komplex rendszert.

A fenntartható katasztrófavédelem célja, hogy csökkentse ezt az ökológiai terhelést, miközben nem veszélyezteti a beavatkozások hatékonyságát. Az energiatakarékos működés előtérbe helyezése nem csupán környezeti, hanem gazdasági és stratégiai érdek is, különösen hosszan elnyúló válsághelyzet vagy természeti katasztrófa során, amikor az energiaellátás akadózhat vagy teljesen megszűnhet.

Az energiatakarékosság megvalósításához elengedhetetlen az erőforrás-hatékonyság, az alternatív energiák alkalmazása, valamint a mobil autonóm rendszerek fejlesztése. Például az olyan hordozható világítási rendszerek, amelyek napenergiával vagy kis teljesítményű generátorokkal működnek, nemcsak fenntarthatóbbak, de kisebb logisztikai terhet is rónak a beavatkozó egységekre.

Zöldtechnológiák a mentési és helyreállítási műveletekben

A zöldtechnológia fogalma azokat az innovatív megoldásokat takarja, amelyek minimalizálják a környezetre gyakorolt negatív hatásokat, miközben hatékonyan támogatják az alapfeladatok végrehajtását. A polgári védelemben a zöldtechnológiák alkalmazása egyre inkább valós gyakorlattá válik. A napelemes és hibrid áramellátó rendszerek alkalmazása a műveleti bázisok energiaellátásában jelentős előrelépést jelent. Az alternatív hajtásláncú járművek, így az elektromos, hibrid vagy hidrogénhajtású eszközök bevetése a szállítási és mentési feladatok során nemcsak környezetbarát, hanem gyakran csendesebb üzemelést is biztosít. Az okoseszközök, például az alacsony energiafogyasztású szenzorhálózatok és a dróntechnológia alkalmazása a felderítésben új dimenziókat nyit meg a hatékonyság és a pontos adatgyűjtés terén. A víz- és hulladékgazdálkodási rendszerek, amelyek a helyreállítás során keletkező anyagok újrahasznosítására és szennyezésmentesítésre alkalmasak, szintén fontos elemei a fenntartható megközelítésnek.

A zöldtechnológiák különösen fontos szerepet játszanak a helyreállítási szakaszban, amely gyakran hosszabb ideig tart, mint maga a mentés. A hosszan tartó katasztrófhelyzetek esetében, például árvíz utáni infrastruktúra-helyreállításnál a fenntartható megoldások alkalmazása csökkenti a költségeket, mérsékli a környezeti károkat és hozzájárul a helyi közösségek gyorsabb regenerációjához is.

A nemzetközi példák között említhetők az ENSZ Katasztrófakockázat-csökkentési Hivatala (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, UNDRR) által támogatott projektek, ahol megújuló energiával működő mobil bázisokat teszteltek délkelet-ázsiai országokban. Hasonló kezdeményezések Magyarországon is megjelentek, például a Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság napelemes töltőállomások és önálló világítótorony-rendszerek kísérleti telepítését kezdeményezte a hivatásos tűzoltóságoknál.

Fenntarthatósági törekvések a katonai és a polgári védelmi rendszerekben

A katonai műszaki tudományok és a polgári védelmi gyakorlat egyre erősebben kapcsolódik a fenntarthatósági elvekhez. A honvédelmi és katasztrófavédelmi együttműködések egyik új iránya a *dual-use* technológiák alkalmazása, azaz olyan eszközök fejlesztése, amelyek békeidőben környezetvédelmi, válsághelyzetben pedig védelmi célokat szolgálnak.

A NATO Környezetvédelmi és Energetikai Iroda több projektjében is előtérbe helyezi a katonai műveletek zöldítését, például a logisztikai lánc környezetbarát átalakítását, az alternatív tüzelőanyagok alkalmazását vagy az energiatakarékos infrastruktúrák kiépítését. Ezek az elvek részben átszűrődnek a polgári védelmi struktúrákba is, különösen az önkéntes mentőszervezetek és a helyi katasztrófavédelmi egységek fejlesztése során.

Hazai szinten a Magyar Honvédség és a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (OKF) közötti együttműködések is egyre gyakrabban fókuszálnak olyan fejlesztésekre, amelyek környezetbarát módon növelik a reagálóképességet. Például mobil víztisztító rendszereket, hibrid áramforrással működő egységeket, valamint olyan kiképzési programokat vezettek be, amelyek kiemelik az ökológiai tudatosságot (*NATO Energy and Environmental Protection Programme 2021*).

Ezek a törekvések hosszú távon nemcsak a környezet védelmét szolgálják, hanem hozzájárulnak a fenntartható biztonsági és védelmi rendszer kialakításához is, amely képes hatékonyan reagálni a komplex, többdimenziós válsághelyzetekre.

Az innovatív, energiatakarékos és környezetbarát technológiák alkalmazása

A fenntarthatóság előmozdításának egyik legkritikusabb eszköze a polgári védelem területén az innovatív technológiák bevezetése, amelyek nemcsak az energiahatékonyságot növelik, hanem hozzájárulnak a környezeti terhelés csökkentéséhez is. A korszerű műszaki megoldások integrációja lehetővé teszi a polgári védelmi szervezetek számára, hogy alkalmazkodjanak az új típusú kockázatokhoz, miközben erősítik a helyreállítási műveletek rugalmasságát és hatékonyságát.

A megújuló energiák használata a polgári védelemben

A katasztrófavédelemben alkalmazott energiaellátási rendszerek korábban jellemzően dízel- vagy benzinüzemű generátorokra épültek, amelyek működése jelentős károsanyag-kibocsátással járt. Napjainkban egyre több példát látunk arra, hogy a megújuló energiaforrásokat, különösen a napenergiát integrálják a terepi műveletekbe. A napelemes áramellátó rendszerek előnye, hogy telepítésük gyors, karbantartási igényük alacsony, és nem generálnak zaj- vagy légszennyezést.

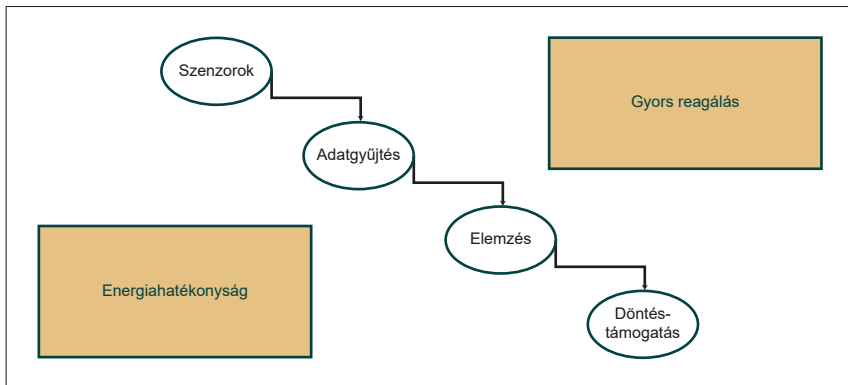
Ezeket a rendszereket mobil műveleti egységek energiaellátására, kommunikációs bázisok működtetésére vagy éppen világítási feladatokra is alkalmazzák. A Bundesanstalt Technisches Hilfswerk például mobil napelemes töltőállomásokat használ kisebb eszközök, drónok vagy kommunikációs rendszerek áramellátására, így növelve az autonóm működés időtartamát (OV Bad Honnef 2013).

Magyarországon is megjelentek olyan kezdeményezések, amelyek célja a megújuló energiák bevonása a védelmi infrastruktúrába. A BM OKF által 2023-ban indított pilotprojekt során hibrid rendszerekkel, amelyek napelemet, akkumulátort és aggregátort kombinálnak, szereltek fel több mobil irányítási pontot, amelyek katasztrófahelyzetekben önálló energiaellátást tudnak biztosítani.

Környezetbarát járművek és szállítóeszközök

A beavatkozó egységek mobilitása elengedhetetlen a gyors és hatékony reagáláshoz. A hagyományos járművek üzemeltetése ugyanakkor jelentős ökológiai lábnyomot hagy, amely nemcsak a környezetre káros, de hosszú távon a működési költségeket is növeli. Ennek megfelelően több ország, köztük Ausztria, Hollandia és Svédország zöldjárműflottát épít ki a polgári védelem területén, főként elektromos vagy hibrid hajtásláncú gépjárművek alkalmazásával (*European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations* 2021).

Az elektromos járművek csendes üzemelése előnyt jelenthet mentési műveletek során, különösen lakott területeken. Az akkumulátortechnológia fejlődése lehetővé teszi, hogy ezek a járművek hosszabb műveleti időtartamra is bevetethők legyenek, különösen ha mobil töltőállomásokkal kombinálják azokat. Kiemelendő, hogy a hidrogénhajtású járművek alkalmazása még kísérleti stádiumban van, azonban hosszabb távon komoly alternatívát jelenthet, különösen nagyobb hatótávolságot igénylő műveleteknél (International Energy Agency 2022).



12.2. ábra. Egyszerű folyamatábra

Forrás: a szerző szerkesztése

Hazánkban egyelőre korlátozott a zöldjárművek elterjedtsége a katasztrófa-védelemben, ugyanakkor a *Zöld Katasztrófavédelem 2030* stratégia előíranyozza elektromos terepjárók és hibrid erőforrással rendelkező szállítójárművek beszerzését a következő években.

Okosérzékelő- és okos-felderítőrendszerek

A kockázatalapú védekezés korszerű eszközeinek egyik fő pillérét az intelligens, alacsony energiafogyasztású szenzorok jelentik. Az IoT-technológiákra épülő rendszerek lehetővé teszik az adatok folyamatos, valós idejű gyűjtését és továbbítását. Ezek segítségével korai figyelmeztetőrendszerek, veszélyjelző hálózatok és kockázatelemző algoritmusok működtethetők, csökkentve a károk bekövetkezésének valószínűségét és mértékét. A Nemzeti Közszerződési Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola kutatói által 2022-ben bemutatott projekt során olyan okos-monitoringrendszert fejlesztettek, amely szenzorok segítségével képes mérni a talajnedvességet, a levegő összetételét, valamint a hőmérsékleti anomáliákat, mindezt önellátó, napelemmel működő egységekkel. Nemzetközi szinten a japán Fire and Disaster Management Agency (FDMA) például integrált drón- és szenzorhálózatot alkalmaz az erdőtüzek korai észlelésére és a károk feltérképezésére. Az eszközök minimális energiaigényük mellett megbízható adatokat szolgáltatnak a beavatkozó egységeknek, lehetővé téve a célzott reagálást (*Fire*

and Disaster Management Agency [é. n.]). Ahhoz, hogy az energiahatékonyság és a gyors reagálás megvalósuljon, elengedhetetlen a következő folyamatok egymásra épülése. A 12.2. ábra egyszerű folyamatábrát mutat be, amely szemlélteti az energiahatékony működés lépéseit.

Újrahasznosított és fenntartható anyagok a védelmi infrastruktúrában

A védelmi létesítmények építése és fenntartása során is egyre nagyobb szerepet kapnak a környezetbarát, újrahasznosított vagy helyben előállított anyagok. A logisztikai bázisok, ideiglenes szálláshelyek, depók és mobil parancsnoki pontok kialakításánál már elérhetők olyan megoldások, amelyek akár 80%-ban újrahasznosított anyagokból készülnek. Ilyen például a kompozit panelek használata, amelyek könnyűek, strapabírók, és kiváló hőszigetelési tulajdonságokkal rendelkeznek. A norvég Directorate for Civil Protection új bázisai ilyen moduláris elemekből épülnek, csökkentve a környezeti terhelést. Magyarországon az MH Anyagellátó Raktárbázis projekt keretében új típusú, újrahasznosított műanyagból készült mobil raktárkonténert teszteltek, amelynek karbonlábnyoma 40%-kal alacsonyabb volt a hagyományos acélszerkezetű megoldásokénál (*Az MH Anyagellátó Raktárbázis parancsnokának pályázati felhívása 2023*).

Gyakorlati példák és esettanulmányok

A fenntarthatóság elvei a gyakorlatban csak akkor érvényesülnek hatékonyan, ha azok konkrét alkalmazási példákban, projektekben is megjelennek. Az alábbi fejezet hazai és nemzetközi példákon keresztül mutatja be, hogyan integrálhatók a környezetbarát, energiatakarékos technológiák a polgári védelmi és katasztrófavédelmi rendszerekbe. Külön figyelmet érdemelnek azok az együttműködési modellek, ahol a honvédség és a katasztrófavédelem közös erőforrásokkal hozott létre zöldinnovációkat.

Nemzetközi és hazai példák környezetbarát polgári védelmi fejlesztésekre

Németország területén a Technisches Hilfswerk már több mint egy évtizede integrál megújuló energiákat és zöldtechnológiákat a működésébe. Az úgynevezett Grüne

Einsatzmodule, azaz a zöld-bevetésiegységek olyan mobil egységek, amelyek saját napelemmel és akkumulátoros energiatárolóval működnek, biztosítva az energiafüggetlen működést akár több napig is. Ezeket az egységeket terepi irányítóközpontok, elsősegély-állomások vagy kommunikációs bázisok táplálására használják.

Finnország esetében a Védelmi Minisztérium és a finn katasztrófavédelmi hatóság együttműködésében több fenntartható logisztikai bázist alakítottak ki, amelyek biomassa-alapú fűtési rendszert, valamint esővízgyűjtést használnak. Ezek az állomások nemcsak környezetbarátak, hanem gazdaságilag is hatékonyabb működést biztosítanak, különösen a hosszabb ideig tartó katasztrófavédelmi műveletek során.

Magyarországon 2022-ben a BM OKF elindította a *Zöld Katasztrófavédelem* programot, amelynek célja a környezeti fenntarthatóság beépítése a polgári védelmi gyakorlatba. Ennek keretében napenergiával működő világítótesteket, hibrid aggregátorokat, valamint újrahasznosított műanyagból készült logisztikai tárolókat vezettek be. A projekt részeként pilotprogram indult a tűzoltóságon belül is, ahol hibrid üzemű járműveket tesztelnek városi és vidéki környezetben.

Bécs város katasztrófavédelmi igazgatósága elektromos hajtásláncú mentőflottát állított üzembe, amely különösen a városi bevetések során bizonyult hatékonyak. A mentőautók napelemmel felszerelt garázsokban parkolnak, így saját töltési infrastruktúrával rendelkeznek. Ez a megoldás a környezeti terhelés csökkentésén túl a logisztikai függőségek minimalizálását is szolgálja (Berufsfeuerwehr Wien nun mit zwei elektrisch angetriebenen Basislöschfahrzeugen im Einsatz 2023).

A haderő és a katasztrófavédelem közös zöldprojektjei

A NATO 2014-ben elfogadta a *Green Defence Framework* című dokumentumot, amely a tagállamok számára közös célként fogalmazza meg a fenntartható és környezetbarát megoldások alkalmazását a védelmi szektorban. Ennek részeként több tagállamban is kialakítottak olyan közös kiképző- és bevetési bázisokat, amelyek megújuló energiával működnek. Magyarország részvétele is erősödött ezen a területen a NATO Energy Security Centre of Excellence révén, amelyben a Honvédelmi Minisztérium és a BM OKF közösen vesz részt.

A Magyar Honvédség és a BM OKF között 2023-ban indított közös fejlesztési program célja egy moduláris, környezetbarát műveleti egység prototípusának létrehozása volt. A rendszer része volt egy napelemekkel és szélgenerátorral felszerelt, elektromos aggregátort használó konténer, amely a helyszíni irányítás, az informatikai támogatás és a világítás energiaellátását biztosította. A rendszer

kipróbálására az MH Bakony Harckiképző Központ területén került sor szimulált árvízhez helyzet során, ahol a BM OKF és a honvédség egységei közösen gyakorolták az interoperábilis működést.

A Nemzeti Közfoglalkoztatási Egyetem katonai műszaki és katasztrófavédelmi kutatócsoportja olyan drónrendszert fejlesztett ki, amely könnyű, újrahasznosított műanyagból készült, és napelemekkel van felszerelve. A projekt célja, hogy a drónok akár napokon át képesek legyenek alacsony magasságban autonóm felderítést végezni, például erdőtűzek, árhullámok vagy ipari balesetek esetén. A prototípus tesztelése 2023-ban történt a Tisza árterében, sikeres eredményekkel.

Kihívások és jövőbeli fejlesztési lehetőségek

A környezetbarát, fenntartható technológiák beépítése a polgári védelem rendszerébe nem csupán lehetőség, hanem a 21. század egyik legfontosabb követelménye. Ugyanakkor e folyamat számos technológiai, pénzügyi és szabályozási kihívással jár, amelyek leküzdése csak tudatos stratégiai tervezéssel és interdiszciplináris együttműködéssel lehetséges.

E kihívások közé tartozik az éghajlatváltozás és a biztonságpolitikai környezet kapcsolatának egyre hangsúlyosabb vizsgálata is. Az éghajlati kockázatok nemcsak a lakosságvédelem feladataira, hanem a katonai és a polgári védelmi szervezetek felkészítésére, eszközparkjára és alkalmazási gyakorlatára is hatással vannak. A jövőben kiemelt figyelmet kell fordítani arra, hogyan lehet a polgári védelem rendszerében alkalmazott technológiákat úgy fejleszteni, hogy azok alkalmasak legyenek a klímaváltozásból fakadó új típusú természeti katasztrófák kezelésére, ugyanakkor hozzájáruljanak a környezeti fenntarthatósághoz. Ez egyaránt érinti a védekezésre használt erőforrások optimalizálását, a zöldtechnológiák integrálását, valamint a haderő és a civil védelmi szervezetek közötti együttműködés erősítését, hiszen a katasztrófák során egyre gyakrabban szükség van katonai kapacitások bevonására is. A komplex helyzetek kezelése átfogó stratégiát kíván, amely ötvözi a környezeti, biztonsági és technológiai szempontokat (PADÁNYI 2022).

Technológiai és pénzügyi akadályok

A fenntartható műszaki fejlesztések bevezetésének egyik elsődleges akadály a magas beruházási költség. A megújuló energiával működő eszközök, például a

napelemes egységek, az elektromos járművek vagy az IoT-alapú szenzorrendszerek beszerzése és integrálása jelentős költséget jelent, különösen ha ezeket nagy rendszerekbe kell illeszteni. Emellett a meglévő infrastruktúrák gyakran nem kompatibilisek az új technológiákkal, így azok cseréje vagy korszerűsítése további pénzügyi terhet ró az érintett szervezetekre.

További problémát jelent a karbantartási és üzemeltetési költségek előre nem látható mértéke, különösen olyan technológiák esetén, amelyek még nem eléggé elterjedtek vagy szabványosítottak. Ilyen például az energiatárolás technológiája, amely jelenleg még gyorsan változó terület, és jelentős technikai kockázatokat is hordoz.

A technológiai akadályok között kiemelendő az interoperabilitás kérdése is. Az új eszközöknek kompatibilisnek kell lenniük a meglévő rendszerrel, különösen katasztrófavédelemben, ahol a gyors és hatékony integráció kulcsfontosságú. Amennyiben például egy új típusú elektromos mentőjármű nem kapcsolható be zökkenőmentesen a távközlési és logisztikai rendszerbe, hatékonysága jelentősen csökkenhet.

Jogszabályi és stratégiai szempontok

Bár az Európai Unió több irányelvében, például az *európai zöld megállapodás* keretében ösztönzi a fenntartható technológiák bevezetését, a tagállami jogalkotás nem minden esetben tart lépést a technológiai fejlődéssel. Magyarországon például a katasztrófavédelmi jogszabályok közé, mint a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény vagy annak végrehajtási rendelete, a 234/2011. (XI. 10.) Korm. rendelet, még nem épültek be átfogóan az energiatárolókosságra és a fenntarthatóságra vonatkozó követelmények [The European Green Deal (é. n.); 234/2011. (XI. 10.) Korm. rendelet].

Stratégiai szinten ugyan léteznek kezdeményezések, mint például a *Nemzeti Energiastratégia 2030*, azonban ezek gyakran nem tartalmazzak konkrét intézkedési tervet a polgári védelem műszaki fejlesztéseire vonatkozóan. Ez jelentős hiányosság, mivel a katasztrófavédelem olyan kritikus infrastruktúrát képvisel, amely fokozottan kitett a klímaváltozás hatásainak, és amelynek működése során az energiahatékonyság kulcsfontosságú tényező (Elkészült a „Nemzeti Energiastratégia 2030” című kiadvány 2012).

A polgári védelem jövőbeli kutatási irányai között kiemelt jelentőséget kap az Európai Unió polgári védelmi mechanizmusához kapcsolódó feladatkör, amelynek

központi célja a természeti és emberi eredetű katasztrófákra adott válaszingázke-
dések összehangolásának továbbfejlesztése. Ez a mechanizmus arra hivatott, hogy
erősítse a nemzeti polgári védelmi szervezetek közötti együttmőködést, növelje a
lakosság katasztrófákra vonatkozó ismereteit és felkészültségét, valamint gyors,
hatékony és összehangolt támogatást nyújtson a bajba jutott országok számára.
Az Európa Tanács 2022 decemberében új rendelkezéseket vezetett be annak
érdekében, hogy biztosítsa, hogy az olyan kulcsfontosságú ágazatok, mint az
energia-, a vízellátás, a közlekedés és az egészségügy, képesek legyenek a hibrid
támadások, a természeti katasztrófák, a terrorfenyegetések és a közegészségügyi
vészhelyzetek megelőzésére, kivédésére, kezelésére, valamint az ezek utáni helyre-
állításra (VASS et al. 2024).

Jövőbeli fejlesztési lehetőségek és kutatási irányok

A technológiai fejlődés dinamikusan kínálja azokat a lehetőségeket, amelyek
rén a katasztrófavédelmi rendszerek fenntarthatóbbá és energiahatékonyabbá
válhatnak. A mobil napelemes töltőállomások továbbfejlesztése nemcsak kom-
munikációs eszközök töltését, hanem nagyobb rendszerek, például vízszivattyúk
és világítási eszközök energiaellátását is biztosíthatja. Az energiafüggetlen ideig-
lenes menedékhelyek kialakítása, amelyek öntöltő rendszerekkel, hőszigetelt
paneleköl és újrahazsnosított anyagoköl készülnek, valamint rövid idő alatt
üzembe helyezhetők, szintén fontos fejlesztési terület.

A vezeték nélküli okos-érzékelőrendszerek fejlesztése minimalizálja a te-
lepitési időt és az energiafogyasztást, ugyanakkor nagy térképi lefedettséget
biztosít. Az intelligens energiamedzsmen-rendszerek alkalmazása a műveleti
központokban lehetővé teszi a fogyasztási adatok valós idejő monitorozását és
optimalizálását.

A kutatás-fejlesztés további irányai között megjelenik az anyagtechnológiai
innováció területe. A könnyő, mégis strapabíró, újrahazsnosított anyagok alkalma-
zása a védelmi infrastruktúrában nemcsak környezetbarátabbá, hanem könnyebben
mozgathatóvá és olcsóbban előállíthatóvá is teszi a bevetési eszközöket.

Szintén ígérates terület a digitális ikrek alkalmazása a kockázatkezelésben.
Adott infrastruktúra vagy védelmi egység valós idejő digitális mása lehetővé
teszi a hatékonyabb tervezést, a hibák előrejelzését és az energiafelhasználás
optimalizálását (UNEP 2022).

Összegzés és következtetések

A 21. században a katasztrófavédelem és a polgári védelem rendszerei új típusú kihívásokkal szembesülnek. A klímaváltozás, az egyre gyakoribb természeti katasztrófák, valamint a társadalmi és gazdasági sebezhetőség fokozódása egyértelművé teszi, hogy a hagyományos megoldások önmagukban nem elegendők a biztonság fenntartásához. Ebben a kontextusban a fenntartható technológiai fejlesztések szerepe felértékelődött, nemcsak környezeti szempontból, hanem a rendszer működőképessége, hatékonysága és jövőállósága tekintetében is.

A cikk célja az volt, hogy átfogó képet adjon a környezetbarát, energiatakarékos és fenntartható műszaki megoldások polgári védelemben való alkalmazásáról, valamint azok aktuális és jövőbeni szerepéről. A bemutatott példák, úgymint napelemes töltőegységek, elektromos és hidrogénmeghajtású járművek, IoT-alapú szenzorhálózatok és újrahasonított anyagok, jól érzékeltetik, hogy a technológiai fejlődés lehetőséget biztosít a katasztrófavédelmi kapacitások bővítésére, miközben csökkenti az ökológiai lábnyomot.

A környezetbarát fejlesztések különös jelentőséggel bírnak a katonai műszaki tudományok területén is. A kettős hasznosítású technológiák, amelyek katonai és civil célokra egyaránt alkalmazhatók, elősegíthetik a védelmi szektor és a polgári védelem közötti szinergiákat. A fenntarthatóság elveinek integrálása a katonai műszaki tervezésbe hosszú távon nemcsak környezeti, hanem logisztikai és gazdasági előnyöket is kínál, különösen az energiaellátási biztonság, a mobilitás és az autonóm működés szempontjából (SZAKÁLYNÉ GYÜRŰ – TEKNŐS – AMBRUSZ 2025).

Az elemzés rávilágított arra is, hogy a fenntartható fejlesztések elterjedését jelenleg több tényező akadályozza. Ezek között megtalálhatók a pénzügyi korlátok, a technológiai interoperabilitás hiányosságai, a megfelelő képzési és karbantartási háttér hiánya, valamint a szabályozási környezet hiányosságai is. Ezen kihívások leküzdése nem lehetséges pusztán technikai megoldások révén, stratégiai tervezésre, szakpolitikai támogatásra és átfogó szabályozási keretekre is szükség van.

A jövőre nézve számos kutatási és fejlesztési irány mutatkozik, amelyek hozzájárulhatnak a környezetbarát innovációk integrációjához a polgári védelem rendszerébe. A multidiszciplináris megközelítés kialakítása a műszaki, környezetvédelmi és humán tényezők együttes figyelembevételével elengedhetetlen. A nemzetközi tapasztalatok adaptálása, különös tekintettel a NATO és az ENSZ fenntarthatósági programjaira, szintén fontos szerepet játszik. A tudásmegosztó platformok létrehozása, ahol a fejlesztők, a kutatók és a beavatkozó szervek közösen dolgozhatnak új, alkalmazható megoldásokon, valamint a hazai szabályozás korszerűsítése,

beleértve a katasztrófavédelmi törvény és az irányadó kormányrendeletek módosítását, kiegészítését környezeti fenntarthatósági elvekkel, szintén kulcsfontosságú lépés (NATO Climate Change and Security Action Plan 2021).

Összességében kijelenthető, hogy a polgári védelem és a katasztrófavédelem nem maradhat ki a fenntarthatóság globális mozgalmából. Az ökológikus szemlélet nem csupán erkölcsi és társadalmi felelősség, hanem a rendszer biztonságos, hatékony és hosszú távon fenntartható működésének egyik alapfeltétele. A környezetbarát technológiák tehát nem a jövő lehetőségei, hanem a jelen követelményei.

SUSTAINABLE TECHNICAL
DEVELOPMENTS IN CIVIL PROTECTION:
THE ROLE OF ENERGY-EFFICIENT AND
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY TECHNOLOGIES

The application of sustainable and energy-efficient technical innovations plays a key role in the operation of civil protection organizations. Due to the increasing frequency of climate change-related events and natural disasters, the integration of environmentally friendly technologies into disaster management equipment has become essential. Renewable energy-powered systems, such as solar-powered electricity units and energy-efficient reconnaissance tools, significantly enhance the efficiency of autonomous operations. Furthermore, the use of alternative propulsion vehicles, smart sensor networks, and recycled materials reduces environmental impact. The aim of this research is to explore the current and future potential of sustainable technologies applicable in civil protection, and to define the possibilities for integrating environmentally friendly innovations into both military and civil protection operations. The results may contribute to the development of a more efficient, sustainable, and energy-conscious disaster management system.

Keywords: energy saving, sustainability, disaster management, environmentally friendly technologies, civil protection

Felhasznált irodalom

- 234/2011. (XI. 10.) Korm. rendelet a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról.
- Az MH Anyagellátó Raktárbázis parancsnokának pályázati felhívása (2023). Magyar Honvédség. Online: <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/b/b9/b9a/b9a8103f7dd6314d4d0ecadbf936a-051167a1d6a.pdf>

- Berufsfeuerwehr Wien nun mit zwei elektrisch angetriebenen Basislöschfahrzeugen im Einsatz (2023). *Stadt Wien*, 2023. június 24. Online: https://presse.wien.gv.at/kategoriennavigation/-/asset_publisher/zraFORwNk9Zp/content/2023-06-24-berufsfeuerwehr-wien-nun-mit-zwei-elektrisch-angetriebenen-basisloeschfahrzeugen-im-einsatz
- Elkészült a „Nemzeti Energiastratégia 2030” című kiadvány (2012). *Kormányzat*, 2012. február 14. Online: <https://2010-2014.kormany.hu/hu/nemzeti-fejlesztési-miniszterium/klima-es-energiagyi-allamtitkarsag/hirek/elkeszult-a-nemzeti-energiastrategia-2030-cimu-kiadvany>
- European Civil Protection and Humanitarian Aid Operations [é. n.]. *European Commission*. https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/index_en?prefLang=hu
- Fire and Disaster Management Agency* [é. n.]. Online: <https://www.fdma.go.jp/>
- Global Assessment Report (GAR) 2025. Resilience Pays: Financing and Investing for Our Future (2025). *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*. Online: <https://www.undrr.org/publication/global-assessment-report-gar-2025-resilience-pays-financing-and-investing-our-future>
- International Energy Agency (2022): Hydrogen for Emergency Response Vehicles. *IEA Publications*. Online: <https://www.iea.org/reports/>
- MUHORAY Árpád (2016): *Katasztrófa megelőzés I.* Budapest: Nemzeti Közszerológiai Egyetem.
- NATO Climate Change and Security Action Plan (2021). *NATO*, 2021. június 14. Online: <https://www.nato.int/en/about-us/official-texts-and-resources/official-texts/2021/06/14/nato-climate-change-and-security-action-plan>
- NATO Energy and Environmental Protection Programme* (2021). NATO Energy Security Centre of Excellence.
- OV Bad Honnef (2013): Informationsveranstaltung: Der Solarboom und seine Folgen für das THW. *THW OV Bad Honnef*, 2013. április 16. Online: <https://ov-bad-honnef.thw.de/aktuelles/aktuelle-meldungen/artikel/informationsveranstaltung-der-solarboom-und-seine-folgen-fuer-das-thw>
- PADÁNYI József (2022): *Kihívások, kockázatok, válaszok: Az éghajlatváltozás okozta kihívások és azok hatása a katonai erőre.* Budapest: Ludovika. Online: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/handle/20.500.12944/24871>
- SIBALIN Iván – KÁTAI-URBÁN Lajos – CIMER Zsolt (2023): A geomérnökség lehetséges energiaipari biztonsági vonatkozásai a környezeti fenntarthatóság keretrendszerében. *Műszaki Katonai Közlelő*, 33(4), 63–76. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.4.5>
- SZAKÁLYNÉ GYÜRŰ Karina – TEKNŐS László – AMBRUSZ József (2025): Innovatív megközelítések a mentőszervezetek árhullámok idején történő hatékony bevetésére, kiemelve a dróntechnológia alkalmazásának lehetőségeit. *Polgári Védelmi Szemle*, 17(Ksz), 437–448.
- TEKNŐS László (2021): A katasztrófavédelem fenntartható fejlődéssel, klímavédelemmel kapcsolatos feladatainak elemzése, értékelése. In FÖLDI László (szerk.): *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből I.* Budapest: Ludovika, 217–232.
- TEKNŐS László (2023) *A katasztrófatudomány terminológiai vizsgálata, tudományometriai elemzése.* Budapest: Ludovika. Online: https://doi.org/10.36250/01118_00
- The European Green Deal [é. n.]. *European Commission*. Online: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- UNEP (2022): *Digital Twins for Environmental Monitoring: United Nations Environment Programme.*
- VASS Gyula et al. (2024): A katasztrófavédelmi kutatások eredményei és fejlesztése a rendészettudomány rendszerében. *Belügyi Szemle*, 72(5), 815–833. Online: <https://doi.org/10.38146/BSZ-AJIA.2024.v72.i5.pp815-833>

Az orosz–ukrán konfliktus okozta gazdasági hatásokra adott magyarországi fiskális és monetáris válaszok elemzése¹

Az orosz–ukrán konfliktus 2022-es eszkalálódása súlyos és tartós gazdasági következményekkel járt Európában, különösen az energiafüggő országok esetében. A tanulmány célja annak feltárása, hogy a konfliktus milyen gazdasági sokkokat okozott, és ezekre milyen fiskális és monetáris politikai válaszokat adtak az Európai Unió (EU) tagállamai, különös tekintettel Magyarországra. A kutatás rávilágít az inflációs nyomás, az energiaárak emelkedése és az árfolyam-ingadozások által előidézett válságkezelési dilemmákra, valamint a költségvetési és jegybanki eszköztár alkalmazásának lehetőségeire és korlátaira. A publikáció tárgyalja a konfliktus gazdasági hatásait, a fiskális és monetáris reakciókat, valamint a két gazdaságpolitikai irány koordinációjának kihívásait. A kutatás alapját hazai és nemzetközi szakirodalom, makro-gazdasági adatok, a Magyar Nemzeti Bank (MNB) jelentései és szakpolitikai dokumentumok képezik. A tanulmány megállapítja, hogy bár a válaszlépések rövid távon enyhíteni tudták a válság egyes hatásait, hosszabb távon újratervezést igényelnek a fenntartható gazdaságpolitikai egyensúly elérése érdekében. A fiskális és a monetáris politika összehangolása – különösen kis, nyitott gazdaságok esetében – a jövőbeli válságkezelés kulcskérdése lesz.

Kulcsszavak: orosz–ukrán háború, gazdasági válság, fiskális politika, monetáris politika, infláció, energiaárak, Magyarország

Bevezetés

2022 februárjában Oroszország Ukrajna elleni inváziója nem csupán a geopolitikai feszültségeket éllezte ki, hanem súlyos, láncreakciószerű gazdasági következményekkel (HALMAI 2023) is járt világszerte, különösen Európában (CSÁKI 2021). Az energiaárak robbanásszerű emelkedése, az inflációs nyomás erősödése, az ellátási láncok akadozása, valamint a pénzügyi piacok volatilitása² új kihívások

¹ A publikáció a Kulturális és Innovációs Minisztérium ekö-p-24-2-165 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

² Azt fejezi ki, hogy mennyire ingadozik az egyes pénzügyi eszközök (például részvények, kötvények, devizák) ára adott időszak alatt.

elé állította a döntéshozókat (CZELLENG 2019). Ebben a komplex és gyorsan változó környezetben a fiskális és monetáris politikák kulcsszerepet játszottak a gazdasági stabilitás megőrzésében, illetve a lakosság és a vállalati szektor alkalmazkodóképességének támogatásában.

A konfliktus kirobbanása alapvetően újraértékelte a költségvetési és jegybanki döntések prioritásait. Egyidejűleg jelent meg az energiafüggetlenség felgyorsításának igénye, a társadalmi kohézió fenntartásának kényszere és az infláció elleni küzdelem szükségessége. Mindez a gazdaságpolitikai eszköztár egyidejű alkalmazására és gyakran egymással ellentétes célok összehangolására kényszerítette a kormányokat és a jegybankokat. A költségvetési élénkítés rövid távon segíthette a sérülékeny csoportokat és ágazatokat, míg a monetáris szigorításra az árstabilitás védelme érdekében volt szükség.

Különösen tanulságos Magyarország esete, ahol a magas energiaimport-kitettség, a már eleve feszes költségvetési helyzet, valamint a forint árfolyamának érzékenysége tovább növelte a válság gazdasági hatásait. A kormány és a Magyar Nemzeti Bank egymástól részben független, részben összehangolt reakciói jól szemléltetik, hogy egy kis, nyitott gazdaság hogyan próbálja kezelni a külső sokkokat az új, bizonytalan világrendben.

Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy az orosz–ukrán konfliktus következtében kialakuló gazdasági válság milyen fiskális és monetáris politikai válaszokat váltott ki az Európai Unióban, különösen Magyarországon. A kutatás központi törekvése annak feltárása, hogy a gazdaságpolitikai eszköztár mennyire volt képes enyhíteni a konfliktus negatív következményeit, illetve hogy a fiskális és monetáris irányítás között kialakuló kölcsönhatások milyen hatással voltak a gazdasági stabilitásra.

A konfliktus gazdasági hatásai Európában

Az orosz–ukrán konfliktus további jelentős eszkalálódása³ 2022. február 24-ével folytatódott, Oroszország agresszori magatartása következtében (HOFFMANN 2022). Ez a jelenleg is tartó eseménysorozat súlyos sokkot okozott az európai gazdaságban is (Center for Preventive Action 2025).

A háborús sokk jelentősen visszafogta a gazdasági növekedést Európa-szerte. Az Európai Bizottság 2022 tavaszán még 2,7%-os növekedést várt az EU átlagában,

³ A publikáció 2025. június 1-jei lezárásáig, 1194 napja tart az orosz–ukrán konfliktus.

azonban ez az év végére 0,9%-ra módosult (European Commission, Directorate-General for Economic and Financial Affairs 2022). A *Same Shock, Different Effects* című tanulmány arra mutat rá, hogy az orosz–ukrán konfliktus közvetlen gazdasági következményei minden uniós tagállamot érintenek, de egyenlőtlen mértékben (REDEKER 2022). Az Európai Unió egésze szembeesül a szankciók, az infláció, az ellátási láncok zavarai és főként az energiaárak emelkedésének hatásaival, azonban a tagállamok eltérő kiinduló gazdasági és kereskedelmi, piaci helyzete miatt egyes országokat különösen súlyosan érinthet a válság.

A válság előzményei és háttere

Ha visszatekintünk a 2022 előtti időszakra, alapvető kérdés, hogy a gazdaságokat a Covid–19 hatásai hogyan érintették, vagyis az, hogy a konfliktus idején mennyire volt vagy lehetett felkészülve a gazdaság. Látható, hogy 2021-től gyors helyreállítási időszak vette kezdetét⁴ (International Monetary Fund 2021), amelyet jelentős gazdasági növekedés és a kereslet ugrásszerű növekedése jellemez. Ezt a Covid–19 utáni fellendülést azonban 2022 februárjában megtörte az Ukrajna elleni orosz agresszió (TOMOLYA et al. 2017). A háború előtti időszakban beindult gazdasági kilábalás megtorpant⁵ (21.1.1.1. A makrogazdaság főbb adatai [é. n.]), a befektetői bizalom megingott (Magyar Nemzeti Bank 2022; IZZELDIN et al. 2023), a vállalati működési költségek megnöttek.

Több európai ország recesszióba süllyedt vagy stagnálásba fordult. A konfliktus után közvetlenül egyfajta bizonytalanság alakult ki, amely különösen a közép- és kelet-európai régiót sújtotta, ahol az orosz gazdasággal való kapcsolódás erősebb volt (OECD 2022). A legkitettebb országok közé a balti államok – Lettország, Litvánia, Észtország – tartoznak (REDEKER 2022). Ezen országok esetében Oroszország az egyik legfontosabb exportpiac, bizonyos termékcsoportokban – például a gépipari termékekben vagy az élelmiszerekben – az orosz piac részesedése az összes export több mint 30–40%-át is elérhette. Lettország és Litvánia földgáz-ellátása szinte teljes mértékben Oroszországból származott.

⁴ A fiskális és a monetáris politika összehangolt működése likviditásbőséget eredményezett, ami növelte a gazdaság ellenálló képességét, stabilabbá és olcsóbbá tette az államadósság hazai finanszírozását, és megalapozta a gazdaság 2021-es újraindulását (Állami Számvevőszék 2022).

⁵ Magyarországon 2023-ban csökkent a reálgazdaság. 2022–2023-ban magas infláció mutatkozik az implicit árindex alapján. A fogyasztás 2023-ban is csökkent, jelezve a háztartások reáljövedelmének csökkenését (21.1.1.1. A makrogazdaság főbb adatai [é. n.]).

Hasonlóan magas az energiafüggőség Magyarország (SIEMPLENSKI LEFORT 2022), Csehország⁶ és Szlovénia esetében is, amelyek földrajzi és infrastrukturális okokból nagymértékben az orosz gázhálózatra támaszkodnak.⁷ Ezen országokban a gáz az energiafogyasztás jelentős részét teszi ki, így az ellátásban vagy az árban bekövetkező változások közvetlenül és azonnal hatnak a gazdaság minden szektorára.

Németország⁸ és Olaszország szintén kiemelkedő kitettséggel bír, főként azért, mert ezek a legnagyobb abszolút gázimportőrök az EU-n belül. Emellett a német és az olasz ipar jelentős részben támaszkodik orosz eredetű nyersanyagokra – például palládium, alumínium, nikkel –, amelyek kritikusak az autóipar és más ipari szektorok számára (Germany – Countries & Regions 2025). E nyersanyagok árának vagy elérhetőségének változása súlyos ellátásilánc-problémákat okozhat. Németország és Olaszország technikai recesszióba süllyedt.⁹ A fogyasztás csökkenése, a beruházások elhalasztása és a reáljövedelmek zuhanása együttesen rontotta a konjunkturális kilátásokat.¹⁰

A gazdasági hatások főbb területei

A gazdasági következmények több hatástényezőn keresztül jelentkeztek. Az orosz–ukrán konfliktus egyik legsúlyosabb gazdasági következménye az energia-piacokon kialakult válság volt. A gáz- és olajszállítás korlátozása soha nem látott árszinteket¹¹ ért el (SUN et al. 2024), különösen 2022 második és harmadik

⁶ Három évvel később, 2025-ben Csehország diverzifikációs programjai a legintenzívebbek. 2025 áprilisában bejelentették, hogy 60 év után teljesen megszűnt az orosz olajimport, az olajimportot nyugati útvonalak (a Transalpine / TAL + IKL csővezetékeken keresztül) biztosítják (HOVET 2025).

⁷ Az Európai Unió REPowerEU tervének részeként EU-s szinten tilalmat vezetnek be, az új orosz gázszerződések és a spotüzletek 2025 végéig, a hosszú távú szerződések pedig 2027 végéig szűnnek meg. A gázimport aránya 2021-hez képest az orosz forrásokból 45%-ról 19%-ra csökkent 2024-re (Directorate-General for Communication 2025).

⁸ 2021-ben az orosz gáz részesedése a német gázimportból több mint 55% volt. Az Északi Áramlat 1 vezetéken keresztül közvetlenül kapta az orosz gázt, ez volt Európa legfontosabb importútvonala. 2022 után az Északi Áramlat 1 leállítása és a vezeték elleni támadás után Németország gyors LNG-importkapacitás-fejlesztésbe kezdett, és 2023-ra teljesen leállította az orosz gázimportot. A 2022 óta tartó orosz–ukrán konfliktus okán mindkét ország drasztikus lépéseket tett az orosz függés csökkentésére, és mára jelentősen csökkent az orosz részarány (Germany – Countries & Regions 2025).

⁹ Olyan időszak, amikor a gazdasági teljesítmény (általában a bruttó hazai termék, GDP) legalább két egymást követő negyedévben csökken.

¹⁰ A gazdaság rövid távú jövőbeli alakulására vonatkozó várakozásokat, előrejelzéseket jelenti.

¹¹ Az olaj ára ~40%-kal, a szén ára ~130%-kal, a földgáz ára pedig akár ~180%-kal is emelkedett.

negyedében. Az energiaárak robbanásszerű emelkedése volt az egyik legközvetlenebb hatás. Az orosz földgáz és kőolaj exportjának visszaesése, az Északi Áramlat vezetékek leállása, valamint az európai gázpiac szűkössege több mint tízszeres gázáremelkedést¹² hozott 2022 nyarára (ALVAREZ–KROEN 2025).

A magas gázárak jelentősen hozzájárultak az EU-ban az infláció növekedéséhez,¹³ amely 2022 októberében 11,5%-ot ért el (A Market Mechanism to Limit Excessive Gas Price Spikes [é. n.]). A villamosenergia-árak követő jelleggel szintén többszörösére nőttek, súlyos terhet róva a vállalatokra és a háztartásokra (GUAN et al. 2023). Oroszország az Európai Unió egyik legnagyobb energiaszállítójaként a háború előtt az EU földgázimportjának mintegy 40%-át, kőolajimportjának közel 30%-át biztosította. A szankciók és a viszontszankciók nyomán ezek az importcsatornák részben megszűntek vagy súlyosan sérültek, ami drasztikus áremelkedéshez vezetett a földgáz és a villamos energia piacán.

Az inflációs nyomás területén a nyersanyagárak és az élelmiszerárak emelkedése gyors és tartós inflációs spirált indított el Európában. A magas energiaárak közvetlenül beépültek a termelési költségekbe (GUÉNETTE–KENWORTHY–WHEELER 2022), így az inflációs nyomás gyorsan általánossá vált. Az eurózónában az infláció 2022 őszén elérte a 10,6%-ot, Kelet-Közép-Európában pedig 15–25% közötti értékeket mutatott (Eurostat 2022). Magyarország esetében az infláció 2022 októberében 21,9% volt,¹⁴ majd 2023 januárjában meghaladta a 25%-ot, aminek fő mozgatórugója az élelmiszerek és az energia drágulása volt.

Az inflációs sokk nemcsak a reáljövedelmeket csökkentette, hanem a kamatpolitikát is jelentősen átrendezte, új kihívások elé állítva a jegybankokat. A háborús inflációs sokk leginkább a lakossági szektoron csapódott le. Az élelmiszerek, az energia (VAN MEIJL et al. 2024) és a közlekedés költségeinek emelkedése miatt a reáljövedelmek csökkentek, miközben a megtakarítások reálértéke is apadt. A társadalmi hatások differenciáltak voltak. Az alacsony jövedelmű, energiaszegény

¹² Az uniós gáztőzsdei árak (TTF) 265–300 EUR/MWh között mozogtak. Viszonyításképpen, az elmúlt tíz év gázátlagára 5 EUR/MWh és 35 EUR/MWh közötti értékű volt.

¹³ A 2022/2578/EU tanácsi rendelet 2022. december 22-én lépett hatályba. Ez olyan korrekciós mechanizmus (Market Correction Mechanism, MCM) az EU-ban, amely a túlzottan magas gázárak korlátozására szolgál, ezzel védve a polgárokat és a gazdaságot az árrobbanások negatív hatásaitól. Automatikusan aktiválódik, ha a holland TTF-gázár három egymást követő munkanapon meghaladja a 180 euró/MWh-t, és legalább 35 euróval magasabb, mint az LNG referenciaára [Council Regulation (EU) 2022/2578 of 22 December 2022 Establishing a Market Correction Mechanism to Protect Union Citizens and the Economy Against Excessively High Prices. ST/15202/2022/INIT 2022].

¹⁴ A harmadik legmagasabb érték az EU-ban.

háztartások különösen sérülékenynek bizonyultak, míg a magasabb jövedelmű rétegek a megtakarításaik reálértékének romlását szenvedték el.

Az ellátási láncok zavarai és a külkereskedelmi hatások területén a konfliktus kitörése súlyos fennakadásokat okozott a nemzetközi ellátási láncokban is. Ukrajna jelentős gabona- és műtrágyaexportőr¹⁵ (Tudnivalók az ukrán gabonaexportról [é. n.]), míg Oroszország nemcsak az energiahordozók, hanem fémek és más nyersanyagok exportja révén játszott fontos szerepet a globális gazdaságban. A katonai műveletek és tengeri blokádok, valamint az ukrán kikötők ellehetetlenítése következtében az élelmiszer-ellátás akadózott, különösen a fejlődő országokban, de az EU-ban is megjelentek élelmiszer-biztonsági aggályok. Ukrajna mint fontos agrárexportőr és tranzitország szintén kiesett az európai és a globális ellátási láncokból. A gabona-, műtrágya- és nyersanyagpiacok zavarai (ALEXANDER et al. 2023) a fejlődő országokat éppúgy érintették, mint az európai országokat, különösen az energiafüggő tagállamokat.

Szankciók és gazdasági átrendeződés

A külkereskedelem szerkezete rövid idő alatt átrendeződött. Ennek markáns oka az EU szankciósorozata. 2024 januárjáig több mint 16 000 korlátozást vezettek be orosz személyek és szervezetek ellen, ami Oroszországot a világ legszankcionáltabb országává tette (LUCK 2025). A szankciók hatalmas nyomása ellenére Oroszország gazdasága nagy fokú ellenálló képességet mutatott (CSEHES et al. 2023). Az elmúlt három évben Oroszország átalakította gazdaságát, a prioritásokat a polgári jólétről a katonai termelésre helyezve át. Az EU az Oroszország ellen 2022 februárjától 17 csomagban bevezetett szankciókkal¹⁶ – amelyek egyre szigorúbb egyéni, pénzügyi, energia-, kereskedelmi, tranzit-, kettős felhasználású és olaj-, gáztilalmakat, árp plafon-intézkedéseket, repülőtéri és hajózási korlátozásokat, valamint a *shadow fleet* kikötői tilalmait is magukban foglalják – próbálta meg korlátozni Oroszország mozgásterét.

¹⁵ Ukrajna a világ egyik legnagyobb gabona-, kukorica-, árpa- és napraforgóolaj-exportőre, valamint jelentős tranzitország az európai és a globális ellátási láncokban. Az ENSZ Élelmiszeri Világprogramja (WFP) 2023-ban gabonakészletének a 80%-át Ukrajnából szerezte be, és a kiesés főként a fejlődő országokat sújtotta, például Etiópiát, Jement, Afganisztánt, Szudánt és Szomáliát (Tudnivalók az ukrán gabonaexportról [é. n.]).

¹⁶ A 18. uniós szankciócsomag Oroszország ellen még nem lépett hatályba.

Az EU szankciós rendszeréből¹⁷ adódó gazdasági hatásokat tekintve a nyugati szankciók célzottan korlátozták Oroszország olaj- és gázexportját, valamint pénzügyi kapcsolódásait. A bevezetett szankciók és energiaszállítási embargók drámai hatással voltak a világg piacra. Ezek a lépések nemcsak az energiahordozók – például az olaj és a földgáz –, hanem az élelmiszerek, a chipek és más stratégiai termékek globális kínálatát is jelentősen befolyásolták, így közvetlenül hozzájárultak a világszerte tapasztalt inflációhoz és gazdasági lassuláshoz.

Chen tanulmányának egyik központi eleme a globális energiapiac átrendeződése, amelyet a szerző két megerősödés, két bővülés tendenciájaként ír le (CHEN 2023). Egyrészt az Egyesült Államok és az Európai Unió közötti LNG (cseppfolyósított földgáz) -együttműködés látványosan bővült. A háború és annak következményei tovább növelték a globális gazdasági instabilitást, különösen az eszközpiacok volatilitását, a munkaerőpiaci kockázatokat és a recesszió veszélyét.

Társadalmi hatások

A konfliktus társadalmi hatásait tekintve megemlítené a menekültválság. Több millió ukrán menekült érkezett az EU-ba, közülük százazrek Magyarországon is áthaladtak vagy letelepedtek. Ez rendkívüli terhet rótt az ellátórendszerekre – egészségügy, oktatás, szociális ellátás, biztonság (PADÁNYI 2015). Kiemelendő a társadalmi szolidaritás, amelynek keretében a civil szervezetek, az önkormányzatok és a lakossági csoportok jelentős szerepet vállaltak a segítségnyújtásban. Az ukrán menekültek egy része belépett az EU-s munkaerőpiacra, de ennek hosszú távú hatásai még nem ismertek teljesen.

Általános fiskális reakciók Európában

Az orosz–ukrán háború kitörése után az európai kormányok gyors költségvetési reakciókat indítottak, amelyek célja az inflációs nyomás enyhítése, az

¹⁷ Szankciósomagok: 1. 2022. február 23.; 2. 2022. február 25.; 3. 2022. február 28.; 4. 2022. március 15.; 5. 2022. április 8.; 6. 2022. június 3.; 7. 2022. július 21.; 8. 2022. október 6.; 9. 2022. december 16.; 10. 2023. február 25.; 11. 2023. június 23.; 12. 2023. december 18.; 13. 2024. február 23.; 14. 2024. június 24.; 15. 2024. december 16.; 16. 2025. február 24.; 17. 2025. május 20.; 18. 2025. nyara?

energiaár-robbanás kompenzálása és a társadalmi feszültségek csökkentése volt. A bevezetett intézkedések jellemzően három fő területre koncentráálódtak.

Az ártámogatási programok keretében több tagállam alkalmazott árszabályozást az üzemanyag, a gáz és a villamos energia esetében. Ezek célja az energiaszegény háztartások védelme, valamint az infláció közvetett fékezése volt. A közvetlen lakossági támogatások területén egyes országok egyszeri juttatásokat, adójóváírásokat vagy kedvezményes energiacsekket osztottak a leginkább rászoruló háztartások számára. A vállalati kompenzációs csomagok révén a leginkább energiaintenzív ágazatok – például a vegyipar, a nehézipar – részére támogatási alapokat hoztak létre, hogy elkerüljék a leállásokat és a tömeges elbocsátásokat.

Ezek az intézkedések ugyan rövid távon enyhítették a válság hatásait, ugyanakkor jelentős fiskális terhet róttak a költségvetésekre. A költségvetési hiányok 2022–2023 során ismét növekedésnek indultak számos tagállamban, és a strukturális hiányok is mélyültek.

Több EU-tagország jelentős állami támogatási programokat indított – például Németország több mint 200 milliárd eurós energiatámogatási csomagot. Az orosz–ukrán konfliktus újra megnyitotta a vitát az EU fiskális szabályainak rugalmasságáról, és előtérbe került az állami beavatkozások szerepe a válságkezelésben.

Általános monetáris reakciók Európában

Az orosz–ukrán háború következtében kialakult energiaválság, az ellátási láncok zavarai és a geopolitikai bizonytalanság 2022-től kezdődően drasztikus ár-emelkedést idézett elő a globális és különösen az európai gazdaságban. A gyorsuló infláció – amely nemcsak az energia-, hanem az élelmiszer- és szolgáltatási árakat (JIA et al. 2024) is érintette – a monetáris politika eszköztárának aktiválását tette szükségessé. A cél az infláció letörése, az árstabilitás visszaállítása és a piaci várakozások kezelése volt.

Az Európai Központi Bank hosszú ideig tartó rendkívül laza monetáris politikát követett, 2022 közepéig fenntartva a nullaközei kamatkörnyezetet és az eszközvásárlási programokat – *Asset Purchase Programme* (APP), *Pandemic Emergency Purchase Programme* (PEPP). Az inflációs nyomás fokozódása nyomán azonban a jegybank 2022 júliusától fokozatos kamatemelési ciklusba kezdett, amelynek során az irányadó refinanszírozási ráta 0%-ról 2023 elejére 4,5%-ra emelkedett (LANE 2024). Az eszközvásárlási programokat fokozatosan leépítették.

Az Európai Központi Bank 2023-ban azért döntött az eszközvásárlási programok (APP és PEPP) keretében végzett reinvesztíciók¹⁸ megszüntetése mellett, mert ezzel kívánta normalizálni a monetáris politikai alapállást és csökkenteni az eurórendszer mérlegét. A jegybank kommunikációjában egyre markánsabban jelentkezett az infláció elleni határozott fellépés hangsúlyozása.

Az EKB mozgástere ugyanakkor szűk volt. A magas államadósságú tagállamok érzékenyen reagáltak a kamatemelésekre, így a jegybanknak egyszerre kellett inflációt fékeznie és pénzügyi stabilitást fenntartania (*Monetary Policy Issues in the Context of the War in Ukraine* 2022).

A fiskális és a monetáris politika koordinációja és kihívásai az EU-ban

Az Európai Unióban több példa mutatja, hogy egyes országok a fiskális és a monetáris politikát képesek voltak részben összehangoltan működtetni. Németország esetében a fiskális támogatások – például energiaár-kompensációk – és az Európai Központi Bank monetáris szigorítása között világos munkamegosztás volt. Lengyelországban és Csehországban hasonló konfliktusok jelentkeztek, mint Magyarországon. Míg a jegybankok gyorsan emelték a kamatokat, a kormányzati költségvetés expanzív¹⁹ maradt, főként politikai megfontolásokból.

Az összehangolt válságkezelés ott működött jobban, ahol a kormányzat és a jegybank kommunikációja transzparens és előre látható volt, valamint ahol intézményi szinten biztosították a jegybanki autonómiát. Az orosz–ukrán konfliktus nyomán kialakuló gazdasági válság rávilágított arra, hogy a fiskális és a monetáris politikák összehangolása (DANYLYSHYN–BOHDAN 2022) nemcsak kívánatos, hanem szükségszerű (VERSAL et al. 2023) a külső sokkokkal szembeni ellenálló képesség megőrzéséhez. Az egyes tagállamok intézkedései alapján megállapítható, hogy a válságok idején rugalmas, de fegyelmezett költségvetési politika szükséges, amely nem akadályozza a jegybank inflációellenes céljait.

A monetáris függetlenség megerősítése célszerű, amely a gazdasági stabilitás egyik záloga. Intézményi szinten szükséges a gazdaságpolitikai egyeztetési mechanizmus, amely segíti a stratégiai összehangolást, akár válságtanács formájában. A kommunikációs koherencia létfontosságú a piaci bizalom fenntartásához.

¹⁸ A lejáró értékpapírokból származó tőketörlesztések újrabefektetése.

¹⁹ Az állam többet költ, mint amennyi bevétele van – tehát növeli a költségvetési hiányt annak érdekében, hogy élénkítse a gazdaságot.

A lakosság, a vállalatok és a befektetők számára világos üzenetek kellenek a gazdaságpolitika irányáról.

Összességében fiskális oldalról a célzott támogatások bevezetése javasolható a lakossági terhek enyhítésére, míg monetáris oldalon az infláció letörésére irányuló szigorúbb politika indokolt.

A konfliktus gazdasági hatásai Magyarországon

Magyarország az EU egyik leginkább energiaimport-függő tagállamaként különösen ki volt téve a válság hatásainak (Magyarország Kormánya 2024). Az orosz gázimport 85% körüli arányt képviselt a hazai fogyasztásban, és az olajimport jelentős része is orosz forrásból származott. A lakossági rezsicsökkentési rendszer hosszú távú fenntartása költségvetési szempontból fenntarthatatlanná vált a megugró világpiaci árak mellett, így a kormány 2022 második felében részleges reformot hajtott végre.

A forint árfolyama történelmi mélypontra esett 2022 őszén, megközelítve a 430 HUF/EUR szintet.²⁰ Ez tovább fokozta az inflációs nyomást, és rontotta az importált termékek versenyképességét. A gyenge árfolyam miatt az MNB kénytelen volt radikálisan szigorítani a monetáris kondíciókat. A költségvetési oldalról szintén erős alkalmazkodási kényszer jelentkezett, mivel a 2022-es választások után újra kellett tervezni a kiadási struktúrát a megváltozott külső környezethez igazodva.²¹

A gyenge árfolyam importált inflációt²² generált, amit az MNB szigorú monetáris politikával próbált kezelni – gyorsított ütemű alapkamat-emelés, likviditáscsökkentő lépések és devizapiaci intervenciók révén. Ugyanakkor a fiskális politikai irányítás inkább expanzív maradt, legalábbis a válság kezdeti szakaszában, ami feszültséget teremtett a gazdaságpolitikai eszközök között.

Az exportorientált gazdaság számára az európai recesszió is kihívást jelentett. Németország mint fő exportpartner gazdasági lassulása közvetlenül érintette a magyar ipart, különösen az autóipart és beszállítói hálózatát.

Csontos *Mi a helyzet az inflációval?* című tanulmánya a 2022-es inflációs folyamatokat elemzi Magyarországon és a közép-kelet-európai régióban (CSONTOS 2022). A szerző megállapította, hogy az infláció növekedése már 2021 elején

²⁰ 2022. október 12-én az euró 432,32 forinton tetőzött.

²¹ 2022. február 24. után nem sokkal, áprilisban Magyarországon országgyűlési választást tartottak.

²² Azt a jelenséget írja le, amikor egy országban az árak nem a belső keresleti-kínálati viszonyok, hanem a külföldről érkező – jellemzően drágábbá váló – termékek és szolgáltatások miatt emelkednek.

elkezdődött, tehát nem kizárólag az orosz–ukrán háború következménye. A háború és az energiaválság ugyan felgyorsította a folyamatot, de az áremelkedés már korábban is jelen volt (BALATONI–QUITTNER 2024).

Az infláció összetevői és jellemzői

A balti államokban különösen magas, 20% feletti inflációt mértek. Az energiaárak emelkedése már 2021-től megfigyelhető volt, amelyet a háború tovább gyorsított. Magyarországon a hatósági árak – rezsicsökkentés, benzinárstop – miatt az energiaárak növekedése lassabb volt, mint a régió többi részén. Az inflációs többletet részben a forint gyengülése, a magyar mezőgazdaságot sújtó aszály, illetve egyéb kínálati szűkösségek okozták.

A magyar kormány árszabályozási intézkedései – rezsicsökkentés, árstopok – rövid távon mérsékeltek az inflációt, de hosszabb távon torzították a piaci információkat és elosztási igazságtalanságokat okozhattak. Összességében az inflációs folyamatok mögött egyszerre vannak jelen külső – energiaárak, háború – és belső – forintgyengülés, kínálati szűkösség, fiskális politika – tényezők. Az árszabályozás rövid távon enyhíti az inflációt, de hosszú távon strukturális átalakulásra és célzottabb támogatásokra lenne szükség.

A magyar fiskális politika fő válaszlépései

A fiskális politika kénytelen volt reagálni a megugró energiaárakra és a lakossági terhek enyhítésére. Ennek eredményeként nőtt az állami kiadások szintje, miközben az adóbevételek szerkezete is átalakult. Magyarországon a 2022-es áprilisi választások után jelentős költségvetési kiigazításra került sor, amely magában foglalta a kiadások visszafogását és új bevételi formák – például ársapkák, extraprofitadók – bevezetését. Magyarországon a kormányzat a válságra több lépcsőben reagált, gyakran rendkívüli jogrend keretében, gyors döntéshozatallal.

Energiatámogatások és rezsicsökkentés

A lakossági energiaárak befagyasztásával, rezsicsökkentéssel és célzott vállalati támogatásokkal próbálták tompítani az energiaár-robbanás hatásait. A rezsicsökkentés

rendszerének módosítása 2022 nyarán lépett életbe. A korábbi, egyetemes hatósági áras rendszer helyébe az átlagfogyasztásig tartó kedvezményes árképzés lépett, e fölött piaci árakat kellett fizetni. Ez csökkentette a költségvetési kiadásokat, ugyanakkor a lakosság számára érdemi terheket jelentett.

A költségvetési egyensúly fenntartása

A kormány egyszerre próbált költséget csökkenteni – például állami beruházások visszafogása – és bevételeket növelni – például extraprofitadók – a hiány mérséklése érdekében. Az árstopok és a rezsicsökkentés területén a 2021 végétől bevezetett ársapkák – például kristálycukor, napraforgóolaj, benzin – célja az infláció korlátozása és a lakossági fogyasztás védelme volt. Az üzemanyagárstop 2022 végéig tartott, de súlyos piaci torzulásokat és üzemanyaghiányt okozott, aminek következtében végül kivették.

Az extraprofitadók bevezetése

A 2022 májusában bejelentett extraprofitadó-csomag célja a megnövekedett költségvetési igények finanszírozása volt. A leginkább érintett szektorok közé tartozott az energia- és üzemanyagipar, a bankszektor, a távközlés, a biztosítási ipar, valamint a légi közlekedés.

Vállalati támogatások és energaintenzív alapok

2022 őszén a kormány bevezette az energaintenzív kkv-k támogatási programját, amely a megemelkedett rezsiköltségeket hivatott részben ellensúlyozni. A program keretében a rászoruló vállalkozások működési és beruházási támogatást is igényelhettek. Emellett a feldolgozóipari nagyvállalatok számára is indult kapacitásbővítő beruházási támogatási program. Ennek célja a termelés fenntartása, a munkahelyek megőrzése és a recessziós spirál megelőzése volt.

Összességében a magyar fiskális politika 2022–2023 során két ellentétes célt próbált egyszerre elérni: a lakosság terheinek enyhítését és a költségvetési stabilitás fenntartását. A gyors és határozott intézkedések kétségkívül mérsékeltek a lakossági elégedetlenséget és rövid távon fékeztek az inflációt.

A magyar monetáris politika fő válaszlépései

A Magyar Nemzeti Bank monetáris politikája szintén a válsághelyzethez igazodott. A konfliktus által felerősített inflációs nyomásra reagálva az MNB jelentősen emelte az alapkamatot. Az alapkamat 2021 júniusában még 0,6% volt, 2022 végére 13%-ra emelkedett. 2022 októberétől az egynapos betéti kamat is kulcsszerephez jutott, amelyet 18%-ra emelt a jegybank, így ez lett az effektív irányadó eszköz. Ez a lépés a forint védelmét, az infláció leszorítását és a piaci bizalom fenntartását célozta.

Jegybanki eszközök és kommunikáció

A jegybank megerősítette elkötelezettségét az árstabilitás mellett, ugyanakkor elismerte a külső, háborús eredetű inflációs sokkok korlátozott befolyásolhatóságát. A pénzpiac stabilitása érdekében az MNB új eszközöket vezetett be és figyelemmel kísérte a bankrendszer likviditási helyzetét.

Árfolyam-stabilizálás

Magyarország kis, nyitott gazdaságként erősen függ a külső környezettől. A befektetői hangulat romlása, a régiós kockázatok és a nemzetközi kamatpályák változása közvetlenül befolyásolta a forintot. A forint árfolyama 2022 októberében történelmi mélypontra került. Az MNB rendkívüli lépések keretében *devizaswapokat*, devizalikviditási aukciókat és célzott kommunikációt is bevetett az árfolyam stabilizálására. Emellett a jegybanki betéti tenderek és a likviditás szűkítését célzó eszközök alkalmazása is erősödött.

A magyar monetáris politikai válasz egyensúlyt keresett az infláció elleni küzdelem és a gazdasági növekedés támogatása között, de a prioritás egyértelműen az árstabilitás biztosítása volt. Az MNB a régió egyik leggyorsabban reagáló jegybankja volt. Az inflációs célkövető rendszerben működő MNB már 2021 nyarán megkezdte kamatemelési ciklusát, amely 2022-ben tovább gyorsult a háború hatására.

Összességében a monetáris politika az orosz–ukrán konfliktus során kulcsszerepet játszott az inflációs nyomás csillapításában és az árfolyam stabilizálásában.

Az MNB gyors reagálása, kamatemelési ciklusa és nem konvencionális²³ eszközei fontos stabilizáló hatást gyakoroltak.

A fiskális és a monetáris politika koordinációja és kihívásai Magyarországon

A gazdaságpolitikai irányítás két fő pillére – a fiskális és a monetáris politika – válsághelyzetekben különösen nagy nyomás alatt áll. A klasszikus elméleti keret szerint a fiskális politika felelős a kereslet stabilizálásáért, míg a monetáris politika elsődleges célja az árstabilitás biztosítása. Ideális esetben a két politikai ág összehangoltan működik, egymás lépéseit kiegészítve, nem pedig gyengítve.

A koordináció kihívásai

A Covid–19-válság idején az Európai Központi Bank hangsúlyozta, hogy a pénzügyi és fiskális politikának együtt, összehangoltan kellett reagálnia a gazdasági összeomlásra (Állami Számvevőszék 2022). Önállóan alkalmazva egyik sem lett volna elég hatékony. Magyarország esetében azonban a 2022-es válság során bizonyos feszültségek alakultak ki a két politikai terület között.

A fiskális politika kezdetben inkább expanzív maradt, különösen a rezsi-csökkentési rendszer fenntartása és az árstopok bevezetése révén. Ezzel szemben a monetáris politika kénytelen volt drasztikusan szigorítani az inflációs nyomás és a forint gyengülése miatt. Ez ellentétes irányú hatásokkal járt: míg a fiskális intézkedések a keresletet támogatták, addig a monetáris szigorítás azt visszafogni igyekezett.

Intézményi keretek és kommunikáció

A Magyar Nemzeti Bank függetlensége alkotmányosan garantált, ami lehetővé tette a gyors és határozott monetáris válaszlépéseket. Ugyanakkor a kormányzati kommunikáció és a jegybanki üzenetek között időnként eltérések mutatkoztak, ami bizonytalanságot okozott a piaci szereplők körében.

²³ Olyan eszközök, amelyeket a Magyar Nemzeti Bank a klasszikus eszközök (például alapkamat, kötelező tartalékráta) mellett vagy helyett alkalmaz különleges gazdasági helyzetekben – például pénzügyi válság, járvány vagy háborús inflációs sokk idején.

A koordináció javítása érdekében szükség lenne olyan intézményi mechanizmusokra, amelyek biztosítják a rendszeres egyeztetést anélkül, hogy sértenék a jegybank függetlenségét. Ez magában foglalhatna rendszeres gazdaságpolitikai konzultációkat, közös elemzések készítését és koordinált kommunikációs stratégiákat.

A fiskális és monetáris politika válság alatti koordinációja kulcsfontosságú a stabilitás és a gazdasági alkalmazkodóképesség szempontjából. Magyarország esetében a két politika közötti feszültségek rávilágítottak arra, hogy a gazdaságpolitikai eszköztár hatékonysága nemcsak a tartalmi lépéseken, hanem az időzíten, az egyeztetésen és az intézményi bizalom szintjén is múlik. A jövőbeni válságok kezelésére a kiegyensúlyozottabb, kiszámíthatóbb és koordináltabb gazdaságpolitika lehet a legjobb garancia.

Következtetések és javaslatok

Az orosz–ukrán konfliktus nem csupán katonai és geopolitikai, hanem súlyos és hosszan elhúzódó gazdasági válságot is előidézett. A konfliktus következményeként kialakuló energiaválság, inflációs sokk, valamint az ellátási láncok zavarai együttesen példa nélküli kihívások elé állították a gazdaságpolitikai döntéshozókat.

Főbb megállapítások

Az európai gazdaságokat ellátási zavarok, nyersanyaghiány, logisztikai problémák sújtották. A konfliktus következtében az Európai Unió gazdasági kilátásai romlottak, a befektetői bizalom megingott. Nőtt az állami kiadások mértéke, különösen a menekültügyi, védelmi és energiatámogatási kiadások terén.

A konfliktus gazdasági hatása rávilágított a fiskális és monetáris politika gyors és rugalmas alkalmazkodásának fontosságára. Az energiafüggetlenség – de legalább az importfüggőség jelentős csökkentése –, az élelmiszerbiztonság és a stratégiai ágazatok védelme kulcskérdés a jövőre nézve.

Fiskális politikai tanulságok

A fiskális politika oldaláról a kormányzatok széles körű támogatási, kompenzációs és árszabályozó intézkedéseket vezettek be, amelyek célja a társadalmi feszültségek enyhítése és a gazdasági szereplők túlélésének biztosítása volt. Ugyanakkor

ezek az intézkedések jelentős költségvetési terhet róttak az államháztartásokra, és hosszabb távon újra napirendre helyezték a fenntartható fiskális pálya kérdését.

Monetáris politikai tanulságok

A monetáris politika ezzel párhuzamosan a történelmi léptékű inflációs nyomásra reagált, a jegybanki alapkamatok drasztikus emelésével és likviditásszűkítő intézkedésekkel. A jegybankok elsődleges célja az árstabilitás helyreállítása és a piaci bizalom megőrzése volt, de a gyors kamatemelések negatív hatással voltak a hitelpiacokra és a növekedésre egyaránt.

Koordinációs szükségletek

A publikáció megállapítja, hogy válsághelyzetben – legyen az közvetlen vagy közvetett – a fiskális és a monetáris politikának nem külön utakon kell járnia, hanem összehangolt, transzparens és stratégiaileg egyeztetett módon kell működnie. A gazdaságpolitikai eszköztár hatékonysága nemcsak a tartalmától, hanem a politikák közötti koherenciától és az intézményi bizalom szintjétől is függ.

A jövőre nézve elengedhetetlen az olyan gazdaságpolitikai keretek kialakítása, amelyek képesek rugalmasan reagálni a külső sokkokra, miközben megőrzik a költségvetési fegyelmet, a monetáris függetlenséget és a társadalmi szolidaritást. Az orosz–ukrán fegyveres konfliktus tanulságai hozzájárulhatnak az ellenállóbb és válságállóbb gazdaságpolitikai gondolkodás kialakulásához – nemcsak Magyarországon, hanem az egész Európai Unióban.

ANALYSIS OF HUNGARY'S FISCAL AND MONETARY RESPONSES TO THE ECONOMIC IMPACT OF THE RUSSIAN–UKRAINIAN CONFLICT

The escalation of the Russia-Ukraine conflict in 2022 has had serious and lasting economic consequences for Europe, particularly for energy-dependent countries. This study aims to explore the economic shocks triggered by the conflict and to examine the fiscal and monetary policy responses of EU Member States, with a special focus on Hungary. The research highlights the dilemmas of crisis management caused by inflationary pressures, surging energy prices, and exchange rate fluctuations, as well as the possibilities and limitations of fiscal

and central bank instruments. The paper discusses the economic impacts of the conflict, the fiscal and monetary policy responses, and the challenges of coordinating these two policy areas. The research is based on domestic and international literature, macroeconomic data series, reports from the Hungarian National Bank, and relevant policy documents. The paper concludes that while these responses have mitigated some of the crisis's effects in the short term, a longer-term redesign is required to achieve a sustainable economic policy balance. The coordination of fiscal and monetary policy, especially for small open economies, will be a key issue for future crisis management.

Keywords: Russian-Ukrainian war, economic crisis, fiscal policy, monetary policy, inflation, energy prices, Hungary

Felhasznált irodalom

- 21.1.1.1. A makrogazdaság főbb adatai [é. n.]. *Központi Statisztikai Hivatal*. Online: https://www.ksh.hu/stadat_files/gdp/hu/gdp0001.html
- A Market Mechanism to Limit Excessive Gas Price Spikes [é. n.]. *Consilium*. Online: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/a-market-mechanism-to-limit-excessive-gas-price-spikes/>
- ALEXANDER, Peter et al. (2023): High Energy and Fertilizer Prices are More Damaging than Food Export Curtailment from Ukraine and Russia for Food Prices, Health and the Environment. *Nature Food*, 4, 84–95. Online: <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00659-9>
- Állami Számvevőszék (2022): Elemzés: „A monetáris politika és a fiskális politika gazdaságra gyakorolt hatása a válságkezelésben”. Online: https://www.asz.hu/dokumentumok/E2209_Mon_fisk_pol_1_.pdf
- ALVAREZ, Jorge A. – KROEN, Thomas (2025): *The Energy Origins of the Global Inflation Surge*. WP/25/91. Washington, DC: International Monetary Fund. Online: <https://doi.org/10.5089/9798229008310.001>
- BALATONI András – QUITTNER Péter (2024): A 2021–2023 közötti inflációs hullám okai és háttere. *Közgazdasági Szemle*, 71(6), 671–689. Online: <https://doi.org/10.18414/KSZ.2024.6.671>
- Center for Preventive Action (2025): War in Ukraine. *Global Conflict Tracker*, 2025. november 25. (utolsó frissítés). Online: <https://www.cfr.org/global-conflict-tracker/conflict/conflict-ukraine>
- CHEN, Qian (2023): Inflation and Energy Crisis under Ukraine Conflict. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 32, 1–7. Online: <https://doi.org/10.54254/2754-1169/32/20231553>
- Council Regulation (EU) 2022/2578 of 22 December 2022 Establishing a Market Correction Mechanism to Protect Union Citizens and the Economy Against Excessively High Prices. ST/15202/2022/INIT (2022). *Official Journal of the European Union*, L 335, 2022. december 29., 45–60. Online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/2578/oj/eng>
- CZELLENG Ádám (2019): *A veszélyes anyagok közúti szállítása során bekövetkezett rendkívüli események megelőzését és kezelését célzó műszaki fejlesztések lehetőségei*. PhD-disszertáció. Szeged: Szegedi Tudományegyetem.

- CSÁKI György (2021): A 2022. évi orosz–ukrán háború gazdasági következményei. *Nemzet és Biztonság*, 14(3), 63–78. Online: <https://doi.org/10.32576/nb.2021.3.4>
- CSEHES András et al. (2023): Hogyan hatnak a szankciók Oroszországra, és hogyan védekezik ellenük? *Külgügyi Szemle*, 22(2), 43–77. Online: https://doi.org/10.47707/Kulugyi_Szemle.2023.2.3
- CSONTOS Tamás (2022): Mi a helyzet az inflációval? *Világpolitika és Közgazdaságtan*, 1(1), 39–48. Online: <https://doi.org/10.14267/VILPOL2022.01.05>
- DANYLYSHYN, Bohdan – BOHDAN, Ivan (2022): Monetary Policy During the Wartime: How to Ensure Macroeconomic Stability. *Investment Management and Financial Innovations*, 19(2), 344–359. Online: [https://doi.org/10.21511/imfi.19\(2\).2022.30](https://doi.org/10.21511/imfi.19(2).2022.30)
- Directorate-General for Communication (2025): Roadmap to Fully End EU Dependency on Russian Energy. *European Commission*, 2025. május 6. Online: https://commission.europa.eu/news-and-media/news/roadmap-fully-end-eu-dependency-russian-energy-2025-05-06_en
- European Commission, Directorate-General for Economic and Financial Affairs (2022): *European Economic Forecast: Winter 2022*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Online: https://economy-finance.ec.europa.eu/document/download/9d2a8067-ebb4-4d5d-afef-dad-c892b97f3_en?filename=ip169_en.pdf
- Eurostat (2022): *Annual Inflation Up to 10.6% in the Euro Area*. Online: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/15265521/2-17112022-AP-EN.pdf/b6953137-786e-ed9c-5ee2-6812c0f8f07f>
- Germany – Countries & Regions (2025). *International Energy Agency*. Online: <https://www.iea.org/countries/germany>
- GUAN, Yuru et al. (2023): Burden of the Global Energy Price Crisis on Households. *Nature Energy*, 8, 304–316. Online: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01209-8>
- GUÉNETTE, Justin-Damien – KENWORTHY, Philip – WHEELER, Collette (2022): *Implications of the War in Ukraine for the Global Economy*. Equitable Growth, Finance, and Institutions Policy Note. Washington, DC: World Bank Group. Online: <https://doi.org/10.1596/37372>
- HALMAI Péter (2023): Háborús sokk és gazdaság. *Magyar Tudomány*, 184(9), 1101–1111. Online: <https://doi.org/10.1556/2065.184.2023.9.3>
- HOFFMANN Tamás (2022): Háború vagy béke? Az államközi erőszak alkalmazásának nemzetközi jogi kérdései az orosz–ukrán konfliktusban. *Közjogi Szemle*, 15(3), 1–13. Online: <https://real.mtak.hu/155759/1/Hoffmann-HaboruvagybekeKozjogiSzemle.pdf>
- HOVET, Jason (2025): Czechs Hail End of Russian Oil Dependence with First Increased Deliveries from West. *Reuters*, 2025. április 17. Online: <https://www.reuters.com/world/europe/czech-republic-becomes-fully-independent-russian-oil-government-says-2025-04-17/>
- International Monetary Fund (2023): *Hungary: 2022 Article IV Consultation-Press Release; Staff Report; and Statement by the Executive Director for Hungary*. IMF Country Report No. 23/70. Washington, DC: International Monetary Fund. Online: <https://doi.org/10.5089/9798400228865.002>
- International Monetary Fund (2021): *World Economic Outlook. Recovery During a Pandemic: Health Concerns, Supply Disruptions, and Price Pressures*. Washington, DC: International Monetary Fund. Online: <https://www.imf.org/-/media/files/publications/weo/2021/october/english/text.pdf>
- IZZELDIN, Marwan et al. (2023): The Impact of the Russian–Ukrainian War on Global Financial Markets. *International Review of Financial Analysis*, 87, 102598. Online: <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2023.102598>

- JIA, Nan et al. (2024): The Russia–Ukraine War Reduced Food Production and Exports with a Disparate Geographical Impact Worldwide. *Communications Earth & Environment*, 5, 765. Online: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01915-5>
- LANE, Philip R. (2024): The Analytics of the Monetary Policy Tightening Cycle. *European Central Bank*, 2024. május 2. Online: <https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2024/html/ecb.sp240502~4066265c78.en.html>
- LUCK, Philip (2025): How Sanctions Have Reshaped Russia's Future. *Center for Strategic and International Studies*, 2025. február 24. Online: <https://www.csis.org/analysis/how-sanctions-have-reshaped-russias-future>
- Magyarország Kormánya (2024): Magyarország középtávú költségvetési-strukturális terve 2024. Online: https://economy-finance.ec.europa.eu/document/download/db036be5-0631-4471-8228-90907a05332e_hu?filename=national_medium-term_fiscal-structural_plan_hungary_hu.pdf
- Magyar Nemzeti Bank (2022): *Inflációs jelentés. 2022. március*. Online: <https://www.mnb.hu/letoltes/hun-ir-digitalis-13.pdf>
- Monetary Policy Issues in the Context of the War in Ukraine* (2022). Luxembourg: Publications Office of the European Union. Online: <https://doi.org/10.2861/217463>
- OECD (2022): *Impacts of the Russian Invasion of Ukraine on Financial Market Conditions and Resilience: Assessment of Global Financial Markets*. Paris: OECD Publishing. Online: <https://doi.org/10.1787/879c9322-en>
- PADÁNYI József (2015): Műszaki zár a határon. *Műszaki Katonai Közlöny*, 25(3), 21–33. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2015_3_03_kerites%20cikk.pdf
- REDEKER, Nils (2022): *Same Shock, Different Effects: EU Member States' Exposure to the Economic Consequences of Putin's War*. Policy Brief. Berlin: Jacques Delors Centre, Hertie School. Online: https://www.delorscentre.eu/fileadmin/2_Research/1_About_our_research/2_Research_centres/6_Jacques_Delors_Centre/Publications/N20220307_same_shock_Redeker.pdf
- SIEMPLENSKI LEFORT, Janel (2022): Ukraine Economic Shock. *European Investment Bank*, 2022. június 14. Online: <https://www.eib.org/en/stories/ukraine-trade-inflation>
- SUN, Mingsong et al. (2024): The Russia–Ukraine Conflict, Soaring International Energy Prices, and Implications for Global Economic Policies. *Heliyon*, 10(16), e34712. Online: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34712>
- PADÁNYI József – TOMOLYA János (2017): Háború és béke Ukrajnában, avagy keleten a helyzet változatlan (1–2. rész). *Hadtudomány*, 27(1–2), 63–83; 27(3–4), 29–42. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2017.27.1-2.63>; <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2017.27.3-4.29>
- Tudnivalók az ukrán gabonaexportról [é. n.]. *Consilium*. Online: <https://www.consilium.europa.eu/hu/infographics/ukrainian-grain-exports-explained/>
- VAN MEIJL, Hans et al. (2024): The Russia–Ukraine War Decreases Food Affordability but Could Reduce Global Greenhouse Gas Emissions. *Communications Earth & Environment*, 5, 59. Online: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01208-x>
- VERSAL, Natalia et al. (2023): Balancing Monetary Policy in Defence Economics in Ukraine. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, 2(49), 24–42. Online: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.2.49.2023.3991>

Veres Violetta – Hornyacsek Júlia

Quo vadis tudományos kutatás? Így kutatunk mi...

Kérdőíves kutatás a tudományos
kutatómunka nehézségeiről, a kutatást segítő
és akadályozó tényezőkről a múltban vagy
a jelenben tudományos kutatást folytatók körében

A tudományos kutatás sikere alapvetően attól függ, hogy a kutatók mennyire ismerik a tudományos tevékenység folyamatát, szakaszait, azok tartalmát, és mennyire tervszerű a tevékenységük. A hatékony kutatás további feltétele, hogy átfogó képünk legyen a kutatómunka szabályairól, etikai kérdéseiről és buktatóiról. A szerzők célul tűzték ki, hogy empirikus kutatással mérik fel a kutatók nehézségeit, a munkájukat lassító, akadályozó tényezőket, és a kutatásuk eredményeire alapozva javaslatokat tesznek az eredményes kutatás folyamatára, módszereire, valamint a krízisintervenció megoldásokra. Elemzéseik tükrében hasznos megoldási javaslatokat kívánnak adni a kutatási kihívások elkerülésére, a felmerülő problémák hatékony kiküszöbölésére. Eredményeiket haszonnal forgathatják a kutatásban még hosszabb fejlődési utat bejárni kénytelen doktoranduszok és doktorjelöltek, de a kutatómunkában már több évet eltöltők számára is szolgálhatnak gyakorlatban alkalmazható ötletekkel. Noha a vizsgálat átfogóan érintette a különböző tudományterületeket, a fókusz különösen a műszaki tudományok, azon belül is a katonai műszaki tudományok kutatóira irányult.

Kulcsszavak: tudományos kutatás, doktori kutatás, katonai műszaki tudományok, kutatásmódszertan, kutatást akadályozó tényezők, publikálás

Bevezetés

A tudomány mint a társadalmi tudat egyik formája szisztematizált ismeretek történelmileg kialakult rendszere (SZIGETI–VÁRI–VOLCZER 1980: 382), életünk elengedhetetlen részét képezi. A tudomány eredményei teszik lehetővé a társadalmi és technikai fejlődést, valamint a tudásalapú társadalmak működését. Ezek az eredmények tudományos módszerekkel folytatott kutatásokból származnak.

A tudományos kutatás adott helyen, időben, tudományterületen és vizsgálati szinten az a tervszerűen végzett emberi tevékenység, amelynek célja új, adott területen hosszabb vagy rövidebb távlatban általános érvényű adat, összefüggés, hatás vagy kölcsönhatás megállapítása vagy létrehozása (PACZOLAY 1970: 27). Magyarország biztosítja a tudományos kutatás és a művészeti alkotás szabadságát az Alaptörvény X. cikk (1) bekezdése szerint, és kialakította a kutatások feltételeit, beleértve a kereteket megteremtő joganyagokat is. A tudományos munka kereteit a 2014. évi LXXVI. törvény a tudományos kutatásról, fejlesztésről és innovációról szabályozza.

Magyarország a tudománypolitika keretében gondoskodik a kutatáshoz szükséges feltételekről, így a kutatási infrastruktúráról, a kutatási stratégiáról, valamint a kutatási-fejlesztési és az innovációs tevékenységet támogató és véleményező testület működtetéséről (Nemzeti Tudománypolitikai Tanács). Az intézményi háttérrel olyan szervezetek biztosítják, mint a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal. Ezen túlmenően Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapot és kutatási adatbázist tart fenn, továbbá Nemzeti Kutatási Infrastruktúra Útitervet működtet. A felsőoktatási intézmények mint a tudomány fellegvárai megalkották az intézményi kutatási stratégiákat, működtetik a kutatóműhelyeket és a doktori iskolákat. Többségük célul tűzte ki a minősített oktatók számának PhD-fokozatot szerző fiatalok bevonásával történő növelését is (*Nemzeti Közzolgálati Egyetem a Kutatási-fejlesztési Innovációs Stratégia végrehajtásának elvei (KFIS)* [é. n.]: 5).

Az elmúlt években a tudományos világ munkájának fókuszába a tudományos kutatás szorgalmazása és a kutatási infrastruktúrák kialakításának ösztönzése került.¹ Egy ország tudományos potenciálját azonban nemcsak ezek a tényezők határozzák meg, hanem a kutatások humán oldala, azaz maguk a kutatók is nélkülözhetetlenek.

A tudományos probléma megfogalmazása

A kutatók képzése, kutatói szerepkörben való fejlesztése és kutatásra motiválása nemzeti érdek. Számos kutatás foglalkozott már a tudományos diákköri munkát folytatók vagy a doktori iskolában tanuló doktoranduszok helyzetével, jövőképevel és nehézségeivel. Már a 90-es években felmerült a kutatói utánpótlásképzés problematikája (FRIES 1997). Kocsis és Kucsera egy 2010-es kutatásában

¹ A Kutatási Infrastruktúrák Európai Stratégiai Fóruma (ESFRI) 2006 óta rendszeresen úgynevezett *roadmapben* foglalja össze a kutatásiinfrastruktúra-fejlesztési terveket. ESFRI: Roadmap 2016, 2008, 2021. stb.

a kutatómunka feltételeit vizsgálta. Megállapították, hogy a témavezetésben és a kutatási feltételekben hiányosságok érzékelhetők (KOC SIS–KUCSERA 2010: 78).

Haig és Kóródi egy 2016-os kutatásában a katonai műszaki tudományok tudományágában képzésben lévő doktoranduszok körében végzett felmérést. Vizsgálták a hallgatói eredmények hasznosulását, a végzettek visszatérési arányát a kutatói és az oktatói munkába. Rámutattak a doktori iskola feladataira és felelősségére a hallgatók kutatásra ösztönzésében (HAIG–KÓRÓDI 2016: 215). Hornyacsek egy 2013-as kutatásában doktoranduszok körében mérte fel, hogy miket tartanak kutatásukat nehezítő tényezőknél. A megkérdezettek a kutatási folyamatban a tervezés hiányát vagy a téves tervezést, a hibás problémamegfogalmazást és a módszerek hibás választását tartották a legnagyobb buktatónak. Hátráltató tényezőként kiemelték a kutatásmódszertani ismeretek hiányát is (HORNYACSEK 2013: 37–39).

A korábbi kutatások óta mind nemzeti, mind az egyetemek szintjén számos változás érzékelhető a tudományos kutatások jogszabályi, intézményi és pályázati vonatkozásában, valamint a kutatási módszerek és eszközök tárháza is bővült. Felmerül a kérdés, hogy a kutatási tevékenységre vállalkozók milyen nehézségekkel küzdenek napjainkban (PADÁNYI–HAIG 2014: 17). További kérdés, hogy a kutatásban már gyakorlatot szerzettek tapasztalataiból milyen tanulságok szűrhetők le, és ezek alapján milyen módszertani javaslatok, tanácsok adhatók a kutatók számára.

A fenti kérdések megválaszolása és a kutatási tevékenységre vállalkozók számára megalapozott javaslatok megfogalmazása érdekében célul tűztük ki, hogy a kutatói munkát folytatók körében kérdőíves kérdezéssel mérjük fel az akadályozó tényezőket, a nehézségeket, a kutatási szokásaikat, valamint haladásukat befolyásoló tényezőket. Mindezt annak érdekében, hogy javaslattal élhessünk a kutatómunka különböző szakaszaiban végzett feladatokra és azok hatékony megoldására.

A kérdőíves kutatás módszerének és folyamatának bemutatása

Kérdőíves kutatásunkat előkutatás előzte meg, amelyben feltérképeztük a témához kapcsolódó külföldi (elsősorban angol, német és spanyol nyelvű) szakirodalmat. Olyan szakírásokra koncentráltunk, amelyek a tudományos kutatás nehézségeit és a sikertelen kutatások, befejezetlen doktori tanulmányok okait, illetve az eredményes kutatások mozgatórugóit vizsgálták. Jelen kutatásunkhoz a kérdőíves kérdezés módszerét választottuk.

Elsőként *konceptualizáltuk* a témát, azonosítottuk a kulcsfogalmakat (a szakirodalom-kutatás, a publikálás, a témaválasztás nehézségei, doktori tanulmányokat akadályozó tényezők, szaknyelvi nehézségek és szokások a kutatás során), majd megfogalmaztuk a kutatás *általános céljait*. Ezután *operacionalizáltuk*, azaz mérhetővé tettük a témát. Azonosítottuk a függő és független változókat, az indikátorokat, valamint a vizsgálat tárgyára jellemző tulajdonságokat és attribútumokat.

Összeállítottuk a *kutatási dizájnt*, amelyben megfogalmaztuk a fő- és alhipotéziseket, a gyakorlati célokat, majd a hipotézisekkel, a kutatáshoz tartozó fogalmakkal és a kutatás céljával összhangban öt kutatási blokkot alakítottunk ki. Ezt követően összeállítottuk a kérdőívben megjelenő konkrét kérdéseket és azok lehetséges válaszait.

Az első kérdéscsoport célja a kérdőívet kitöltők (*minta*) *rétégzése* volt, ebben hét kérdést tettünk fel. A második blokk tizenhárom kérdése a *kutatás módszereire*, a harmadik blokk nyolc kérdése a tudományos *kutatás feltételeire* vonatkozott. A negyedikben tizenegy kérdés segítségével az *idegennyelv-ismeret* és a tudományos kutatás összefüggéseit tártuk fel a szaknyelvekre fókuszálva. Az ötödik blokk a doktori képzésben részt vevőket vagy a már fokozatszerzésre felkészülőket szólította meg, itt speciálisan a tudományos fokozattal még nem rendelkezők *kutatásait akadályozó tényezőket és nehézségeket* igyekeztünk feltárni.

A kérdések és a válaszlehetőségek megfogalmazását követően összeállítottuk a kérdőívet, próbakitöltéseket végeztünk, majd a tapasztalatok alapján javítottuk azt. A kérdőívben összesen 49 kérdés szerepelt. Ezek közül három volt nyitott és 40 zárt, feleletválasztó. Utóbbiak közül kettő volt alternatív kérdés, amelyben két lehetőség közül lehetett választani, a többi a szelektív kérdések csoportjába tartozott, azonban ezek esetében, ahol indokolt volt, saját válaszopciót is elhelyeztünk. A fennmaradó hat pedig skálázó kérdés volt (1–5-ig skálán).

Elkészült a kérdőív online változata is, amelyet az ellenőrzést, a javítást és a próbakitöltéseket követően véglegesítettünk, majd megküldtük a releváns intézményeknek, szervezeteknek, de közzétettük a világhálón is, azaz a minta véletlenszerűen alakult ki: 201 fő.

A kérdőíves kutatás eredményeinek bemutatása

Jelen írásunkban a terjedelmi korlátok miatt a minta bemutatását, valamint az első kérdésblokk fontosabb eredményeit jelenítjük meg, ahol eltérés van, ott *külön*

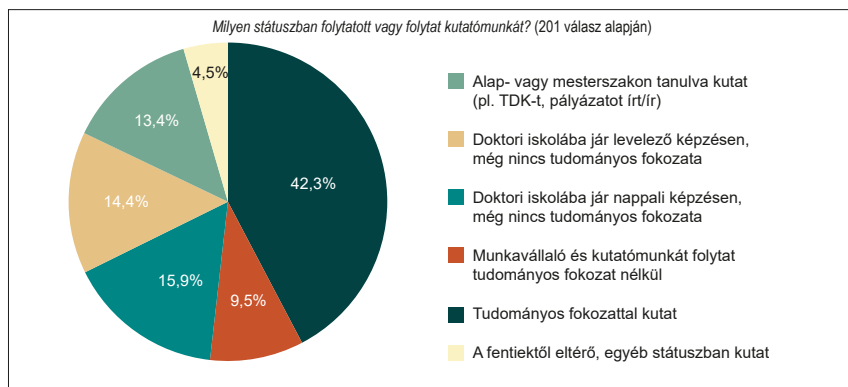
kitérve a műszaki kutatók válaszáira. A további kérdéscsoportok eredményeit és az azokból levont következtetéseket későbbi tanulmányainkban összegezzük.

A minta alakulása

Az első kérdéscsoport a kitöltők kutatással kapcsolatos jellemzőit, azaz a minta rétegzését szolgálta. Életkorukat tekintve a kitöltők 17,4%-a (35 fő) 18–32 év közötti, 42,3%-a (85 fő) 33–45 év közötti, 28,9%-a (58 fő) 46–60 év közötti, a kitöltők 11,4%-a pedig 60 év feletti volt. A felmérés tehát főként az idősebb és középkorú kutatókat érte el, miközben a fiatalabb korosztályok alulreprezentáltak maradtak. A tudományos utánpótlás és generációváltás szempontjából ez fontos figyelmeztetés, hiszen a jelenlegi aktív kutatók utánpótlására is gondolnunk kell. A kutatómunkát különböző státuszokban végezték a válaszolók. A kutatási státusz szerinti megoszlást a 14.1. ábra mutatja.

Az egyéb státuszban kutatók tulajdonképpen beletartoznak a fokozattal kutatók csoportjába, de emellett valamilyen képzésen vesznek részt.

A kérdőívet kitöltők tudományos munkában való jártassága összefügg a kutatói munkavégzés idejével. A *Mióta végez tudományos munkát?* kérdésre 201 fő válaszolt. 1–10 éve kutat 111 fő (55,2%), 11–25 éve 69 fő (34,3%), 26–40 éve 14 fő (7%), több mint 40 éve 7 fő (3,5%), azaz a többség 1–10 éve folytat tudományos tevékenységet. Tudományterületüket tekintve a természettudományok



14.1. ábra. Kutatási státusz szerinti megoszlás

Forrás: Veres Violetta szerkesztése

területén 18 fő (9%) kutat, a műszaki tudományok területén 49 fő (24,4%), az orvostudományok területén 5 fő (2,5%), az agrártudományok területén 2 fő (1%), a társadalomtudományok területén 64 fő (31,8%), a bölcsészettudományok területén 58 fő (28,9%), a művészettudományok területén 4 fő (2%), a hittudomány területén pedig 1 fő (0,5%). Megállapítható, hogy a természettudományok és az alkalmazott tudományok túlsúlya jellemző, más tudományterületek alacsonyabb arányban szerepeltek. Ez a megoszlás tükrözheti a kutatói szféra finanszírozási és intézményi hangsúlyait is. A gyakorlati alkalmazhatóságú tudományágak keresettebbek lehetnek. A társadalomtudományok erős jelenléte arra is utalhat, hogy a humán tényezők, a biztonságpolitika kiemelt szerepet kap napjaink tudományos világában.

A válaszadók tudományágait vizsgálva szerteágazó képet kapunk. A hadtudomány és a katonai műszaki tudományok területén kutatók a harmadik leggyakoribbak. Jelentős számú a történettudományi, a pszichológiai, a jogi, a katasztrófavédelmi, a logisztikai és a néprajzi témamegjelölés, de megjelentek specifikus és interdiszciplináris témák is, mint például táncstudomány, telemedicina, drónazonosítás. Ez a sokféleség bizonyítja, hogy a kérdőív kitöltői között nagy arányban találunk multidiszciplináris kutatókat, akik saját szakterületükön gyakran több tudományág határán dolgoznak. A felsorolás alapján a honvédelem, a biztonságpolitika, a környezetvédelem, az informatikai és a jogi témák súlya is jelentős, ami egyedi összetételt mutat más, hagyományosabb tudományos közösségekhez képest.

Publikációikat tekintve 21 főnek (10,4%) nincs publikációja, 80 fő (39,8%) 1–15 publikációval, 50 fő (24,9%) 16–40 publikációval, 17 fő (8,5%) 41–60 publikációval, míg 33 fő (16,4%) 60-nál több publikációval rendelkezik. Elmondható, hogy a válaszadók negyede már legalább 40 publikációt készített, ami tudományosan érett és eredményes közösség képét sejteti. Ugyanakkor az is látható, hogy jelen vannak a pályakezdők és a növekedési pályán lévők is (együtt a kitöltők közel 50%-a), akik számára a publikálás jelentős kihívás.

A kutatómunka önkéntességét tekintve 53 fő (26,4%) kizárólag önként vállalva kutat, 114 fő (56,7%) zömében önként vállalja, de némelyiket elvárás miatt végzi, 7 fő (3,5%) kizárólag elvárás miatt végzi, 27 fő (13,4%) zömében elvárás miatt végzi, de némelyiket önként vállalja. Megállapítható az önként és a kötelességből végzett kutatás, a belső érdeklődés és a külső elvárások kettőssége. Az adatok alapján világos, hogy a válaszadók nagy százaléka részben vagy egészben külső elvárásoknak is igyekszik megfelelni, miközben saját érdeklődése is hajtja. Ez arra utal, hogy a tudományos munkában – legyen szó doktori fokozatszerzésről,

oktatói kötelezettségekről vagy pályázati elvárásokról – nem a belső késztetés a legerősebb hajtóerő.

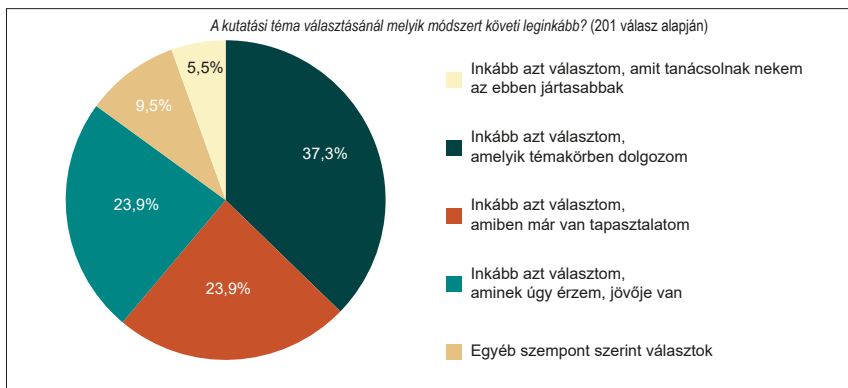
A kutatási módszerre vonatkozó kérdéscsoport eredményei

A kutatási módszerek sokszínűsége, tervezésük, végrehajtásuk nehezítő tényezői kihatnak az eredményességre, ezért ennek feltérképezése a gyakorlatban is hasznosítható tapasztalatokat hozhat. Kérdéseink ebben a blokkban a témaválasztásra, a címválasztásra, a problémafelvetésre, az irodalmak kiválasztására, feldolgozására, az adatgyűjtés módjára és buktatóira, az eredmények megfogalmazására tértek ki. A kérdőívet kitöltők válaszai alapján az alábbi adatokat nyertük.

A kutatási téma kiválasztási módszere vonatkozásában

A válaszokat a 14.2. ábra mutatja be.

Az egyéb szempont szerint választóknál az anyagi érdek volt szempont, vagy az, hogy nem volt más hasonló projektlehetőség. Sokan az érdeklődési kör alapján választottak. Ez azt mutatja, hogy a kutatók többsége szívesen marad az ismereti komfortzónáján belül, de igyekszik nemcsak a jelen, hanem a hosszabb távú



14.2. ábra. A témaválasztás módszere

Forrás: Veres Violetta szerkesztése

hasznosulás felől is gondolkodni. Elmondható, hogy a műszaki tudományterületen kutatók 47%-a a munkaköréhez közeli témát választ.

A címválasztás vonatkozásában

A Milyen címet választ a kutatásához? kérdésre az „inkább átfogó címet választok” mondatot jelölte meg 35 fő (17,4%), az „inkább szűk értelemben az adott témára konkrétan utaló címet választok” mondatot jelölte meg 66 fő, a válaszadók 32,8%-a. Az „inkább átfogó címet választok, de konkrét, szűkítő alcímmel” mondatot jelölte meg 95 fő (47,3%). A műszaki tudományterületen kutatók többsége is ezt a választ jelölte meg. Egyéb módon választ címet 5 fő (2,5%). Ezek között az „ami a médiaközönségnek fontos” vagy az „amiből ismeretterjesztő anyag készíthető” válasz volt gyakori.

A bölcsészettudományokban kutatók egy csoportja úgy készíti címet, hogy egy feldolgozott forrásban előforduló mondatot emel ki. Az egyéb módon címet készítő kitöltők között a figyelemfelkeltésre törekvés, az idézetek használata címként és a közönséghez igazított címstratégia is megjelent. Megállapítható, hogy közel egyharmad a cím logikai felosztását tartja vezérfonalnak, tehát klasszikus szerkezetben gondolkodik. A többség nem követ előzetes elvet, hanem a kutatás során kialakuló irányokat követi, ami a gyakorlati és rugalmas megközelítés fontosságát mutatja. Az egyéb válaszokból kitűnik, hogy sokan dolgoznak csapatban, figyelembe veszik a publikációs célokat, és gyakran úgynevezett iteratív módszert követnek, ahol a kutatási kérdések egymást generálják.

A témája részkutatásokra osztásának módszerét tekintve

A Főként milyen elvet követ? kérdésre 72 fő (35,8%) „a címből indulok ki, és azt osztom a tartalmilag szükséges logikai alegységekre” választ jelölte meg (a műszakiak többsége is). Az „eldöntöm, hogy mekkora terjedelmű legyen, és hány fejezetből álljon az írásmű, és azután »feltöltöm«, nevesítem a fejezeteket” választ jelölte meg 39 fő (19,4%). „A korábban meglévő kutatási anyagomat próbálom egy tartalmi egységbe formálni” választ jelölte meg 24 fő (11,9%), a „nem követek semmilyen előzetes elvet, ahogy a kutatás adja magát, úgy alakulnak ki a részkutatások” mondatot jelölte meg 61 fő (30,3%). Egyéb elvet követett 5 fő

(2,5%), akik zömében csoportban kutatók. Náluk az elvet a többség dönti el, a címben konszenzusra kell jutniuk.

A tudományos probléma felvetése

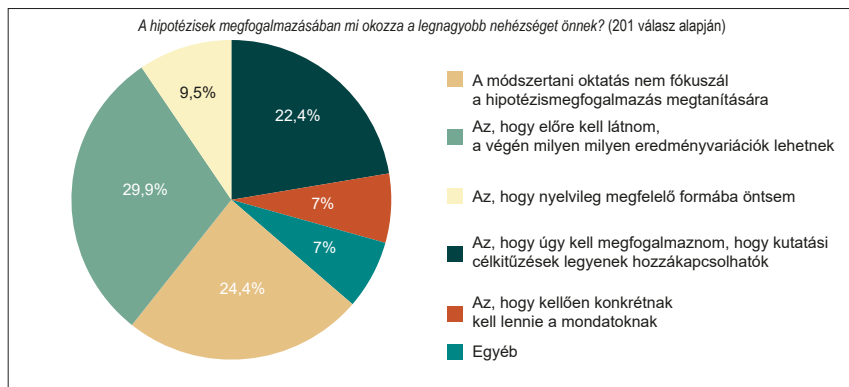
A kutatás eredményességének alapkőve a tudományos probléma felvetése. Ennek megfogalmazásában több nehézség is adódhat. A válaszadók közül 161 főnek (80,1%) *általában* nem okoz gondot a probléma nevesítése (a műszakiak 73%-ának nem okozott gondot), de 40 főnek (19,9%) igen.

Azok, akiknél általában előfordult, hogy nehézségeik voltak a probléma-felvetéssel, más-más okot jelöltek meg. A „nem érzékelem, hogy adott témakörben mi is a tudományos probléma” választ jelölte meg 9 fő (7,1%), az „érezkelem a problémát, de nem tudom problémaként megfogalmazni” választ jelölte meg 32 fő (25,2%), a „más kutatások problémamegfogalmazásai túlságosan befolyásolnak” választ jelölte meg 19 fő (15%), „a munkaköröm miatt óvatossá válok a probléma-felvetésnél” választ jelölte meg 40 fő (31%). A műszaki kutatók közül a többség ezt a választ adta. A „nem szívesen mondok ellent a téma legelismertebbnek tartott szakértőinek, ha ők nem látnak valamiben tudományos problémát” választ jelölte meg 11 fő (8,7%). Egyéb problémafelvetési nehézséget jelölt meg 16 fő (12,6%). Ilyen például interdiszciplináris kutatásnál, ha a domináns tudományág problémáját kell felvetni. Doktoranduszoknál a kudarctól és az érdeklődés hiányától való (gyakran alaptalan) félelem. Megállapítható, hogy a válaszadók egy része a munkaköre miatt óvatosabb a problémafelvetéssel kapcsolatban – ez lehet intézményi megfelelési kényszer vagy szakmai konfliktuskerülés, de a publikációs közeg nyomása is érezhető. Az egyéb válaszokból érzékelhető, hogy sokan küzdenek azzal, hogy a problémát mások számára is érthetően fogalmazzák meg, illetve bizonytalanok, hogy interdiszciplináris kutatás esetén mely szempontokat érvényesítsék.

A hipotézisek megfogalmazása

A hipotézisek megfogalmazása a kutatás alapkőve. A hipotézisalkotás nehézségeit a 14.3. ábra mutatja.

Egyéb nehézséget 14 fő (7%) jelölt meg. Ilyen nehézség volt például, hogy a nem szakértők számára is világosan tudják megfogalmazni a hipotéziseket.



14.3. ábra. A hipotézisalkotás nehézségeinek alakulása a mintában

Forrás: Veres Violetta szerkesztése

A műszakiak többsége a kutatási célkitűzések és a hipotézis összekapcsolását vélte nehéznek.

A kutatási módszerek kiválasztása

A kutatási módszerek nagyban befolyásolják az eredményességet. A kutatási módszerek kiválasztása tekintetében a *Mit tart a legfontosabb szempontnak?* kérdésre 200 válaszadóból a „hogyan illeszkedjen a célkitűzésekhez” választ jelölte meg 67 fő (33,5%) (a műszakiak többsége is ezt választotta), a „hogyan könnyű legyen végrehajtani” választ jelölte meg 3 fő (1,5%), a „hogyan könnyű legyen végrehajtani és egyben illeszkedjen a célkitűzésekhez is” választ jelölte meg 47 fő (23,5%), a „hogyan megbízható legyen a módszer” választ jelölte meg 60 fő (30%), a „hogyan hangozzon jól a tudományos világban” választ jelölte meg 2 fő (1%), a „hogyan megismételhető legyen” választ jelölte meg 9 fő (4,5%), a „hogyan hozzon azonnal eredményt” választ jelölte meg 4 fő (2%). Egyéb kiválasztási módot jelölt meg 8 fő (4%). Ezek között szempont volt a közérthetőség, és hogy a tárgyi feltételei meglegyenek, illetve hogy el tudjon mellett köteleződni az illető.

Megállapítható, hogy egyértelműen érezhető a tudományos minőségre törekvés. A válaszadók több szempontú gondolkodásról tettek tanúbizonyságot: fontos számukra a közérthetőség, az erőforrások megléte, valamint az alkalmazhatóság is. Érdekes, hogy sokan egyszerre szeretnék valid, hatékony és gyakorlatban

kivitelezhető módszert használni – ez viszont gyakran kompromisszumokra kényszeríti őket. Az is világossá vált, hogy a kutatók törekszenek arra, hogy a módszer ne csak tudományosan legyen korrekt, hanem a gyakorlati környezethez is illeszkedjen.

Az irodalmak megtalálása és kiválasztása

Az irodalmak megtalálása és kiválasztása kardinális kérdés a kutatási folyamatban. *A Kutatómunkájához szükséges irodalmak kiválasztásánál mi az Ön számára a legfontosabb választási szempont?* kérdésre 3 fő (1,5%) azt válaszolta, hogy a szerző rangosnak számít-e a tudományos világban. 8 fő (4%) azt, hogy rangos platformon jelenjen meg. 144 fő (71,6%) azt, hogy tartalmában illeszkedjen a saját kutatásához (a műszakiak többsége, 76%-uk is ezt választotta). 20 fő (10%) azt, hogy a benne bemutatott kutatás kutatómódszertani szempontból hibátlan legyen. 14 fő (7%) azt, hogy bőséges és jól feldolgozott legyen a bibliográfia az írásműben. 5 fő (2,5%) azt, hogy az utóbbi néhány évben megjelent legyen. 7 fő (3,5%) egyéb választási módszert adott meg, például hogy olyan szerzőt választ, akinek a logikája az övéhez hasonló.

Megállapítható, hogy a kutatók számára a praktikum és a relevancia fontosabb, mint a szerző ismertsége vagy a publikációs platform rangja. Érdekesség, hogy az egyéb válaszokban sokan a több szempont együttes mérlegelését jelölték meg: például legyen új, koherens, logikus és módszertanilag is helytálló. Ugyanakkor többen jelezték, hogy a szakirodalom válogatásánál nekik nem a szerző presztízse vagy intézményi háttere számít, hanem az anyag újszerűsége és strukturáltsága, azaz kritikus szemmel közelítenek a forrásokhoz, és szívesen lépnek túl a formai szempontokon.

A kutatások alapjául szolgáló irodalmak kiválasztási módjával kapcsolatos akadályok

A kutatások alapjául szolgáló irodalmak kiválasztási módjával kapcsolatban arra a kérdésre, hogy *Önnek mi jelenti a legnagyobb akadályt?* 7 fő (3,5%) azt válaszolta, hogy nem tudja, hol keresse. 28 fő (13,9%) azt, hogy a témának megfelelő anyagok megtalálása. 38 fő (18,9%) azt, hogy a kutatási céljának megfelelő anyagok megtalálása. 41 fő (20,4%) azt, hogy az olyan irodalmak megtalálása, amelyeknek az

eredményei beilleszthetők az írásába. 73 fő (36,3%) azt, hogy van olyan, amihez nem vagy csak nagyon drágán lehet hozzájutni. 14 fő (7%) egyéb választ adott. Ilyen nehézség az idegennyelv-ismeret hiánya, a platformok hitelességének kérdése, az időhiány, a túl sok adatból való szelektálás szükségessége, továbbá hogy nem könnyű megállapítani az irodalom relevanciáját.

Az irodalmak feldolgozása

Az irodalmak feldolgozása során gyakran hátráltató tényezőkbe ütköznek a kutatók. A *Mi hátráltatja a leginkább az irodalmak feldolgozásában?* kérdésre 39 fő (19,4%) azt válaszolta, hogy ha a mű megértése nehéz a bonyolult megfogalmazás miatt (a műszakiakat is ez zavarta leginkább). 40 fő (19,9%) azt, hogy ha nehéz az összefüggés megtalálása az irodalom és a témája között, de szeretne hivatkozni rá. 34 fő (16,9%) azt, hogy ha nem érti az adott nyelvet, vagy a kutatáshoz nem elégséges szinten érti. 54 fő (26,9%) azt válaszolta, hogy ha hiányosak vagy nem találhatók benne a hivatkozási adatok. 27 fő (13,4%) azt, hogy ha az eredeti szerző a hivatkozott műből helytelen következtetéseket vont le. Az irodalmak feldolgozásának nehézségeit a 14.4. ábra mutatja.

7 fő (3,5%) az egyéb válaszlehetőséget jelölte meg. Ilyen volt, ha az adott irodalomban a vizsgálat leírása és a kísérlet eredményeinek rögzítése nem pontos, vagy ha az abban lévő irodalmak elavultak, esetleg a hivatkozási adataik



14.4. ábra. Az irodalmak feldolgozásának nehézségei

Forrás: Veres Violetta szerkesztése

hiányosak. Ilyen továbbá, ha nem anyanyelvi szerző írta a művet, és helytelen a nyelvhasználat. Megállapítható, hogy a nyelvi akadályok – különösen speciális szakszókincs esetén – nagy problémát jelentenek.

Az új tudományos eredmények megfogalmazása

A Nehéznek tartja-e új tudományos eredmények (tézisek) megfogalmazását? kérdésre 34 fő (16,9%) azt felelte, hogy igen, minden kutatásában nehéz volt. A többség, 89 fő (44,3%) azt, hogy igen, de nem minden kutatásában volt nehéz (a műszakiak 51%-a is ezt választotta). 78 fő, közel 39% azt, hogy általában nem tartja nehéznek.

Azoknál, akik nehéznek tartják az új eredmények megfogalmazását, rákérdeztünk az okokra.² A tudományos eredmények megfogalmazásának nehézsége kérdésére a „gond, hogy a megfogalmazásukhoz a kutatás terjedelmes anyagából meg kell találnom a kulcsfontosságúakat” választ adta 31 fő (23,8%). „Az összegzett következtetéseket nem mindig jól fogalmazom meg, ezért az új eredményt is nehezen tudom nyelvi formába önteni” választ adta 11 fő (8,5%). 36 fő (27,7%) azt válaszolta, hogy gondot jelent, hogy több gondolatot kell egy-két mondatba összefoglalni, azaz magas szintű absztrahálás kell. 48 fő (36,9%) azt, hogy nem mindig biztos benne, hogy az eredménye valós tudományos eredmény-e (a műszakiak többsége is ezt a választ jelölte meg). 4 fő (3,1%) egyéb okot jelölt meg. Ilyen ok volt, hogy nehéz az egyedi jelenségekből új általános tanulságot levonni, továbbá hogy a kutatási projekt céljai intézményi szinten esetleg tisztázatlanok, és ez nehezíti a megfogalmazást. További ok az attól való félelem, hogy nem fogják megérteni őt a témában kevésbé jártasak. Megállapítható, hogy a minta pozitív képet mutat a kutatói magabiztosságról az interpretálásban. Az előforduló nehézségek főként az anyag rendszerezésével, az absztrakció szintjének megválasztásával és az újszerűség mértékének megítélésével kapcsolatosak. Ez a kérdés azt mutatja, hogy a tudományos íráskészség fejlesztése és a világos kommunikációs képesség kialakítása, fejlesztése a képzés során kulcsfontosságú lenne a kutatók támogatásában.

² Érdekeség, hogy az eredmények megfogalmazását általában nehéznek tartó kitöltőkön túl hét olyan kitöltő is fogalmazott meg nehézséget, aki nem érezte nehéznek a megfogalmazást. Vélhetően az ebben a kérdésben felsorolt válaszokban mégis felismert néhányat, ami rá jellemző.

Az eredmények közzétételét nehezítő tényezők

Az eredmények közzétételét nehezítő tényezőket 1–5-ös skálán kellett rangsorolniuk a válaszadóknak. A válaszmegoszlásokból az látható, hogy legkevésbé a gyűjtött anyag nyelvi formába öntése és tudományos igényű művé konvertálása nehéz számukra. A leginkább nehezítő tényező az időhiány, a kevés elérhető lehetőség, illetve a publikálási túlszabályozottság volt. A műszakiak leginkább nehezítő tényezőnek az időhiányt jelölték meg. Emellett jelentős nehézséget okoz számukra a tudományos világ elvárásaihoz való igazodás (például impaktfaktor, Q-listák), a nyelvi és formai követelmények, valamint az anyagi akadályok (például publikációs díjak).

A válaszadók külön kitértek a rangos folyóiratokba való bejutás nehézségeire, a lektorálási idő hosszára, valamint a témaválasztással szembeni politikai és munkahelyi érzékenységre is. Az akadályozó tényezők tehát nemcsak szakmai vagy módszertani, hanem szervezeti és infrastrukturális eredetűek is lehetnek. A publikálási kényszer és a minősítési rendszer túlzott súlya is nyomás alá helyezi a kutatókat, különösen a kutatómunkájukat most kezdőket.

Az eredmények közzétételét nehezítő további tényezők

Az eredmények közzétételét nehezítő további tényezőket is kutatni kívántuk, ezért egy megválaszolandó kérdést is betettünk, amelyre harminckilenc válasz érkezett. A válaszadók a szaklektorok tévedését és a nekik való megfelelési kényszert, a hosszú megjelentetési átfutási időt, a rangos folyóiratokba való nehéz bejutást, az alulreprezentált módszertani képzést, az új eredmények felmutatására irányuló nagy nyomást, a drága publikációs megjelentetési díjakat, a munkakörből adódó tiltásokat, a politikai okból való megfontoltságot emelték ki.

A tapasztaltabb publikálók a kiadók túlszabályozottságát vélelmezik, néhányuk kutatói klikkesedést érzékel. Főleg a kezdő kutatóknál jelentkezett az érzet, hogy magányosnak érzik magukat a kutatási eredmények megbeszélésében, keveslik az írásban való mentorálást és többen nehezményezik, hogy a tudományágukat alultámogatottnak érzik, néhányan a tudományos világ részéről elutasító hozzáállást érzékeltek az eredményeikhez. Anyagi jellegű gondot a magas konferenciadíjaknál és a fizetős adatbázisok díjainál, valamint a mérőműszeráraknál érzékeltek.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a kutatói utánpótlás fejlesztése kiemelt feladat lesz a közeljövőben. A kutatók kutatómódszertani szempontból több

nehézséggel küzdenek, ezért célszerű lenne a módszertani képzést növelni és a szakmódszertani anyagok kiadását szorgalmazni, illetve módszertani javaslatokkal segíteni a kezdő kutatókat. A műszaki kutatók több területen eltérő gondokkal küzdenek, mint a más területen tevékenykedők. Leginkább az időnyomás a gondjuk, de náluk a nyelvi nehézség, az absztrakció nehézségei, valamint a munkakörükkkel összefüggő óvatosság is fokozottan jelentkezik. A publikálás túlszabályozottsága, a nívós platformok ára is okozhat problémát az eredmények megjelenítésében.

Javaslatok a hatékony kutatási tevékenységhez

A tudományos kutatásra vállalkozók munkájának segítése érdekében a kérdőívet kitöltők válaszaira alapozva az alábbiakban rövid összefoglalással és néhány javaslattal szolgálunk. Ismert, hogy a kutatási tevékenységet a hatékonyság érdekében célszerű szakaszolni. A javaslatokat a szakaszokhoz kötve fogalmazzuk meg.

A kutatás tervezése és a kutatási terv

A kutatástervezés olyan tevékenység, amelyben a célok elérése érdekében konkrét feladatokat fogalmazzunk meg. A kutatási terv tartalmához tizenkét pontos javaslatot tettünk:

1. a téma kiválasztása;
2. a tudományos probléma és a hívómondatok megfogalmazása;
3. feltételezések, a stratégiai kiindulópont megnevezése;
4. kutatási célkitűzések megfogalmazása;
5. a kutatás módszereinek meghatározása;
6. a részkutatások/résztémák/főbb etapok megnevezése és azok rövid tartalmi összefoglalása;
7. személyi, tárgyi feltételek felsorolása;
8. a főbb mérőföldkövek (valamint ellenőrzési módjuk) és a határidők felsorolása;
9. a várható eredmények megnevezése;
10. krízispontok felsorolása és az esetleges intervenciós megoldások azonosítása;
11. egyéb, a kutatás szempontjából fontos dolgok (pl. engedélyek) rögzítése;
12. a vizsgálandó főbb irodalmak (később: irodalmi összegzés) listája.

Látható, hogy a tervezési folyamat kezdetén a téma kiválasztását és a tudományos probléma meghatározását kell megtennünk. Nem kizárt olyan témák választása, amelyekben nincs kellő tapasztalatunk, de hatékonyabb, ha olyan témát keresünk és kutatunk, amelyhez saját szakmai tapasztalatunk és ismeretünk is van.

A tervezés fontos része a tudományos probléma megfogalmazása. Ennek során gyakran a nyelvi formába öntés jelenti a legnagyobb akadályt, de nem könnyű a témában más, neves kutatók által leírtaktól eltérni sem. Fontos, hogy a választott probléma valós legyen, mutasson rá ellentmondásokra, hiányosságokra, összefüggésekre, és kellően megfogalmazható legyen a kutatás indokoltsága, aktualitása. Befolyásolhatja a problémafelvetést, ha a munkahely vagy a kutatási megbízást adók elvárásai nyomással vannak ránk. Alapvető etikai elvárás, hogy a problémákra való rámutatás szakmai érdekektől független és tárgyilagos legyen. A ráhatást megfelelő határozottsággal kell kezelni.

A témaválasztással és a problémamegfogalmazással párhuzamosan *címet kell adnunk* a kutatásnak, a későbbiekben pedig a publikációknak is. Lehet szűk értelemben a témára utaló címet, de lehet átfogó címet is választani, amelyhez könnyebb lesz a tartalom hozzáigazítása. Szerencsésebb elkerülni a bulvárban bevált úgynevezett *clickbait* (kattintásvadász), túlzó, homályos címadást, mivel így érzelmi hatást kiváltó cím keletkezik ugyan, de a tudományos tárgyilagosságot mindez nem szolgálja. Egy esetben elfogadható, ha az alcím enyhíti a főcím hangzatosságát. Fontos, hogy a kutatási tartalmak illeszkedjenek a címhez, ezért a cím megfogalmazása sok esetben a kutatás befejeztével árnyalódik.

A kutatási terv akkor jól végrehajtható, ha a kutatást *résztémákra* osztjuk. Ennek több módszere lehetséges, de célszerű úgy felosztani, hogy a téma fogalomrendszerét³ felállítjuk, és abból határozzuk meg a tartalmat, majd azt további logikai alegységekre osztjuk. A részkutatások végrehajtása a hipotézisek, módszerek megfogalmazásán, a célkitűzések kijelölésén, a kutatás lefolytatásán át vezet az új eredmények megfogalmazásához.

A hipotézisek megfogalmazása, a célkitűzések kijelölése, a módszerek megválasztása

A kutatás kulcsfontosságú feladata a *hipotézisek* megfogalmazása. Ezek előfeltételezések, amelyeket a témával kapcsolatban alakítunk ki olyan formában, hogy a

³ Végezhetjük mechanikusan papíralapon, elektronikusan szövegszerkesztővel, rajzolóprogrammal, grafikai programokkal, ppt-vel, online grafikai alkalmazásokkal.

kutatásra ösztönözzenek, és a kutatás végén igennel vagy nemmel lehessen válaszolni azokra. Megfogalmazásukhoz jelentős előkutatásra van szükség, amelynek során a szakirodalomban fellelhető adatokban, irodalmakban kell tájékozódni. Célszerű tanulmányozni az adott téma, eszköz gyakorlatban való alkalmazásának körülményeit, módját is, azaz fel kell térképezni a tudomány állását a kérdéskörrel kapcsolatban.

Vannak olyan kutatások, amelyekben a főhipotéziseket az adott rész kutatásnál alhipotézisekkel egészítik ki. A jó hipotézis olyan feltételezést tartalmaz az adott témáról, amely igazságának eldöntése csak kutatással lehetséges, de annak révén nagy biztonsággal megválaszolható.⁴ Elvárás, hogy legyen egyértelműen, tömören, lényegre törően megfogalmazott.

A hipotézisek tükrében kell megfogalmazni a *kutatási célkitűzéseket*. Fontos, hogy a cél valamilyen új eszköz, módszer, követelmény, eljárás, oktatási tartalom, fogalom kialakítása, esetleg új ismeret vagy fogalomrendszer létrehozása, nem pedig az azokhoz vezető út (azaz a módszer) nyelvi formába öntése. A hipotézisek ismeretében meg kell fogalmazni a kutatás módszerét.

A *kutatási módszer* kiválasztása kardinális kérdés. Kvantitatív módszerrel a kutatott téma mennyiségi, kvalitatív módszerrel a minőségi mutatóit elemezzük. A kutatás módszere a céltól függően lehet megfigyelés, dokumentumelemzés, kísérlet, kérdőíves kérdezés vagy interjú, modellezés. Egy kutatásban rendszerint több módszert ötvöztünk. A kutatás elején célszerű eldönteni, hogy a lineáris futású kutatást választjuk, amelyben a részeredményektől függetlenül haladunk, vagy az úgynevezett elágazásos módszert, amelyben a részeredmények tükrében haladunk tovább. A fenti előkészítő munkát követően kezdődhet a konkrét kutatómunka.

A kutatómunka és annak szakaszai

A kutatás kezdetén operacionalizálnunk kell a témát, azaz meg kell keresnünk az ahhoz tartozó legfontosabb fogalmakat. Ehhez célszerű a tudományos irodalmakat, a már meglévő kutatások eredményeként kialakított adatbázisokat áttekinteni.

⁴ Például: *Feltételezem, hogy a VR-szemüveget használók 20%-ában kialakul negatív pszichés vagy fizikai hatás.* Ezt egy alkalmazási kísérlettel és az azt követő kérdőíves kérdezéssel kutatva, az eredmények alapján *igennel* vagy *nemmel* lehet válaszolni.

A tudományos irodalmak és egyéb dokumentumok keresése és feldolgozása

A tudományos irodalmak és egyéb dokumentumok keresése és feldolgozása során fontos, hogy ezek a témánkhoz kapcsolódók legyenek, a szerző és a megjelentető fórum hiteles legyen, az adott műben alkalmazott módszerek feleljenek meg a tudományos kutatással szembeni követelményeknek. A legfontosabb azonban, hogy tudományos igényű művekkel dolgozzunk. Ilyenek a folyóiratcikkek, a tudományos könyvek, a kutatási jelentések, a szabadalmi leírások, a doktori értekezések, a habilitációs anyagok és a konferenciák előadásai, konferenciakötetei.

A valóban igényes irodalom a tudományos közösség elvárásainak megfelelően, szakszerűen és megalapozottan készült. A szerző mindig megjelöli, hogy honnan származnak az információk (rendszerint tudományos publikációk, könyvek, cikkek). Szerkezeti felépítésük kötött: bevezetést, elméleti háttérrel, módszerleírást, eredményeket, következtetéseket, valamint irodalomjegyzéket tartalmaznak. Szövegük tudományos kérdéseket vet fel. Céljuk az új ismeretek kialakítása, az új eredmények bemutatása vagy a korábbi eredmények elemzése, kritikája. Az állításokat érvekkel, adatokkal, korábbi kutatásokra való hivatkozással támasztják alá, és kerülik a szubjektivitást.

Gyakran felmerül a kérdés, hogy hol és hogyan lehet ilyen irodalmakat találni. Fontos lelőhelyek a könyvtárak, a levéltárak adatbázisai, a különböző weboldalak anyagai, de hasznos lehet a tudományos igényű irodalmak irodalomjegyzékében való keresés is. A tudományos irodalmakon túl gyakran kutatunk szakanyagokban, jogszabályokban, belső utasításokban, mert ezek értékes adatokat tartalmazhatnak a munkánkhoz.

Fontos azonban, hogy kellő forráskritikával elemezzük ezeket, és a következtetéseinket más forrásokkal is alátámasztjuk. Az irodalmak feldolgozásának módszere a szöveg- és tartalomelemzés, amely lehet kvalitatív és kvantitatív. *Kvalitatív tartalomelemzés* alatt a tematikus, a narratív, a diskurzus- és a hermeneutikai elemzést értjük (szövegértelmezés filozófiai és kulturális szempontból). *Kvantitatív szövegelemzés* módszer lehet például a szógyakorisági, a korpusznyelvészeti elemzés, illetve a nagy szöveggyűjtemények statisztikai vagy nyelvi vizsgálata.

Leegyszerűsítve: a kvalitatív módszerek a miért jellegű kérdésekre, a kvantitatív módszerek inkább a mennyi/hány típusú kérdésekre adnak válaszokat. Szükséges lehet nevek, helyek, szervezetek automatikus felismerése is a szövegben, azaz a

név- és entitásfelismerő módszer.⁵ A műszaki képadatok elemzéséhez ma már informatikai segítség is rendelkezésre áll. Ilyen például a TwinCAT Vision megoldás, amely szegmentálni és kontúrt elemezni is tud, és a tárgyak megmérésére is számos különféle algoritmust tartalmaz (BECKHOFF Automation Kft. 2023). Az adatgyűjtést adatfeldolgozás követi.

Az adatok feldolgozása, a következtetések levonása,
az új eredmények megfogalmazása

A nyert adatokat adattáblába kell rendeznünk, majd tisztítanunk és rendszereznünk kell. E munkára elegendő időt kell szánni, főleg ha túl sok az adat, mert akkor fel kell azt dolgozni, és szelektálni kell. Előfordulhat pontatlanság vagy torzítás is, ezért ilyenkor a következtetés más forrásokból való alátámasztására is szükség lehet, erre szintén időtartalékkal kell számolnunk. Az adatok értékelésénél be kell tartani az etikai szabályokat, nem szabad azokat a célunkhoz igazítani, a következtetéseket kozmetikázni. Fontos feladat továbbá az adatok védelme és megőrzésének tervezése is.

A nyert adatok feldolgozását és értékelését követően a következtetések levonása, az új eredmények megfogalmazása a következő lépés. Kihívás, hogy a következtetéseknek hibátlanoknak kell lenniük. A kvantitatív adatok statisztikai elemzésénél pontosnak kell lenni, és nemcsak az egyszerű adatáttekintésre, hanem a belső összefüggések keresésére is szükség lehet. Ezek hibátlan megvalósulása esetén is kihívás az eredmények megfogalmazása. Itt a nehézséget a megfelelő absztrakció jelenti. Időt kell szánni arra, hogy ezekhez többször visszatérjünk, és formáljuk, pontosítsuk.

A publikáció készítése és megjelentetése

A tudományos kutatómunka utolsó fázisa a kutatás és a kutatási eredmények közzététele. Ezeket konferenciákon, workshopokon szóban vagy tudományos igényű írásműben kell bemutatni. A kutatásleírásnak olyan egzaktnak kell lennie, hogy a kutatás a leírás alapján megismételhető legyen. Képet kell adni arról,

⁵ Hasznos olvasmányok a témához: KRIPPENDORFF 2019; MANNING–PRABHAKAR–SCHÜTZE 2008; SEBŐK 2016; JURAFSKY–MARTIN 2025.

hogy hogyan tettük mérhetővé, értékelhetővé a kérdéskört, hogyan alakítottuk ki a hipotéziseket, milyen kutatási célokat fogalmaztunk meg, milyen kutatási módszerrel és eszközzel dolgoztunk.

Be kell mutatni az adatgyűjtés és az adatrendszerzés folyamatát, az adatok elemzésének módját, majd a következtetési formát is. Ezt a leírást gyakran nevezik kutatási dizájnnak is. Be kell mutatni az adatokat, a következtetéseket is, majd célszerű a probléma orvoslására javaslatokkal élnünk. A legnagyobb kihívás a terjedelmi korlát.

Figyelmet kell fordítani az írásműben alkalmazott hivatkozások pontos adatainak megadására is. Tilos bárkitől bármilyen gondolatot, adatot, képletet hivatkozás nélkül átvenni, és az írásműben szerepeltetni! A plagizálás súlyos etikai vétségnek számít, amelynek nemcsak etikai és anyagi következményei lehetnek, hanem örökre hiteltelenné is teheti az elkövetőt. Fontos kitétel, hogy az írásunkban felhasznált kép, ábra, idézett szöveg sosem lehet helytöltő szerepű, ezeknek mindig a következtetések alátámasztását, a javaslatok megalapozását kell szolgálniuk.

A publikálás időigényes és a megjelentetésre is kellő időt kell terveznünk. Időben fel kell térképezni a folyóiratokat, a lapzártá- és a megjelentetési határidőket, valamint a lektorálás utáni javítást is be kell kalkulálnunk.

Összegzés

Kutatásunk eredményei rávilágítanak arra, hogy a tudományos kutatói közösség számos kihívással néz szembe napjainkban. A válaszadók többsége tapasztalt kutató. Különböző tudományterületeken dolgoznak, de közös problémákkal küzdenek. Az időhiány, a publikálási lehetőségek korlátozottsága, valamint a módszertani ismeretek hiánya a leggyakrabban említett akadályok között szerepel.

Különösen figyelemreméltó, hogy a műszaki tudományok területén dolgozó kutatók specifikus nehézségekkel találkoznak, amelyek eltérnek más tudományterületek kihívásaitól. Az absztrakció nehézségei, a nyelvi akadályok és a munkakörrel összefüggő óvatosság fokozottan jelentkezik körükben.

A kutatás gyakorlati haszna abban rejlik, hogy konkrét javaslatokat fogalmaz meg a kutatási folyamat egyes szakaszaihoz, amelyek segíthetik mind a kezdő, mind a tapasztalt kutatókat munkájuk hatékonyabbá tételében. A módszertani képzés erősítése, a publikálási folyamatok egyszerűsítése és a kutatói közösség támogatásának növelése kulcsfontosságú feladat a jövőben.

Kutatásunk további eredményeit egy következő tanulmányunkban tesszük közzé.

QUO VADIS SCIENTIFIC RESEARCH? THIS IS HOW WE
RESEARCH...: A QUESTIONNAIRE-BASED SURVEY
ON THE TOPIC OF THE DIFFICULTIES IN SCIENTIFIC
RESEARCH AND THE FACTORS THAT HELP OR HINDER
RESEARCH, AMONG THOSE WHO HAVE CONDUCTED
SCIENTIFIC RESEARCH IN THE PAST OR PRESENT

The success of scientific research fundamentally depends on how thoroughly researchers understand the process and stages of scientific activity and their content, and how systematic their work is. Further prerequisites for effective research are a comprehensive understanding of the rules, ethical issues, and obstacles of research work. The authors aim to use empirical research to assess the difficulties faced by researchers and the factors that slow or hinder their work, and based on the results of their research, to make recommendations for effective research processes and methods, as well as crisis intervention solutions. Based on their analysis, they provide useful suggestions for avoiding research challenges and effectively eliminating problems that arise. Their findings may be useful to doctoral students and doctoral candidates who still have a long way to go in their research, but they may also provide practical ideas for those who have already spent several years in research. Although the study covered a wide range of scientific fields, the focus was particularly on researchers in the technical sciences, and within that, military technical sciences.

Keywords: scientific research, doctoral research, military engineering, research methodology, barriers to research, publication

Felhasznált irodalom

2014. évi LXXVI. törvény a tudományos kutatásról, fejlesztésről és innovációról.
- BECKHOFF Automation Kft. (2023): Részletes műszaki képadatok egyszerű elemzése. *Magyar Elektronika*, 2023. július 7. Online: <https://www.magyar-elektronika.hu/tartalom/reszletes-muszaki-kepadatok-egyszeru-elemzese>
- FRIES István (1997): *A kutatói utánpótlás problémái*. Budapest: Akadémiai.
- HAIG Zsolt – KÓRÓDI Gyula (2016): A katonai műszaki doktori képzésben rejlő potenciális tartalmi hiányok, I. rész: A Katonai Műszaki Doktori Iskola hallgatói körében végzett kérdőíves felmérés eredményei. *Hadmérnök*, 11(2), 211–223.
- HORNYACSEK Júlia (2013): Doktoranduszok kutatási nehézségei. *Tudományos Közlemények*, 15(2), 35–42.
- JURAFSKY, Daniel – MARTIN, James H. (2025): *Speech and Language Processing: Draft*. Online: https://web.stanford.edu/~jurfafsky/slp3/ed3book_aug25.pdf

- KOCSIS Károly – KUCSERA Tamás (2010): A kutatómunka feltételei a felsőoktatásban. *Felsőoktatási Szemle*, 20(3), 75–85.
- KRIPPENDORFF, Klaus (2019): *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology*. Los Angeles – London – New Delhi – Singapore – Washington, DC – Melbourne: SAGE.
- Magyarország Alaptörvénye (2011. április 25.) X. cikk (1). Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100425.atv>
- MANNING, Christopher D. – PRABHAKAR, Raghavan – SCHÜTZE, Hinrich (2008): *Introduction to Information Retrieval*. Cambridge: Cambridge University Press. Online: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809071>
- Nemzeti Köszolgálati Egyetem a Kutatási-fejlesztési Innovációs Stratégia végrehajtásának elvei (KFIS) [é. n.]. Online: <https://www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/nke-kutatas-fejlesztési-innovacios-strategia-vegrehajtasanak-elvei-kfis.original.pdf>
- PACZOLAY Gyula (1970): A tudományos kutatás néhány elméleti és módszertani kérdése. *Filozófiai Tanulmányok*, 12, 25–45.
- PADÁNYI József – HAIG Zsolt (2014): Kihívások, kockázatok és válaszok a hadtudományi doktori képzésben. *Hadtudomány*, 24(1–2), 12–24. Online: <https://ojs.mtak.hu/index.php/hadtudomany/article/view/17180/14155>
- SEBŐK Miklós szerk. (2016): *Kvantitatív szövegelemzés és szövegbányászat a politikatudományban*. Budapest: L'Harmattan.
- SZIGETI Györgyné – VÁRI Györgyné – VOLCZER Árpád szerk. (1980): *Filozófiai kislexikon*. Budapest: Kossuth.

A kötet szerzői

- BALAJTI ISTVÁN egyetemi docens, oktató, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: balajti.istvan@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0003-3566-2904>
- BIRÓ GABRIELLA doktorandusz, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: biro.gabriella@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0009-0004-5924-6694>
- GÁVAY GYÖRGY adjunktus, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék. Kapcsolat: gavay.gyorgy@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0003-0632-5650>
- GUTH-ORJI ÁGNES JUDIT doktorandusz, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: agnesguth@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0138-9807>
- GYARMATI JÓZSEF egyetemi docens, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék. Kapcsolat: gyarmati.jozsef@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0001-7594-2383>
- HALMI LAJOS doktorandusz, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: halmi.lajos@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-7501-9871>
- HEGEDŰS ERNŐ adjunktus, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék. Kapcsolat: hegedus.erno@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0001-8457-5044>
- HORNYACSEK JÚLIA oktató, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: hornyacsek.julia@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0002-2441-7383>
- HUSZÁR ZSOLT egyetemi mestertanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Kapcsolat: huszarzs470@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7970-5664>
- KÁROLY KRISZTIÁN tanársegéd, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülőhajózó Tanszék. Kapcsolat: karoly.krisztian@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0002-5835-7980>
- KÁTAI-URBÁN LAJOS egyetemi docens, tanszékvezető, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Iparbiztonsági Tanszék. Kapcsolat: katai.lajos@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0002-9035-2450>

- KIROVNÉ RÁCZ RÉKA MAGDOLNA adjunktus, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Rendészet-tudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Katasztrófavédelmi Műveleti Tanszék. Kapcsolat: kirovne.racz.reka@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0001-8818-2539>
- KRISZBACHER GERGŐ doktorandusz, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: kriszbacher@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-5600-308X>
- KUTI RAJMUND egyetemi tanár, Széchenyi István Egyetem Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar Automatizálási és Mechatronika Tanszék. Kapcsolat: kuti.rajmund@sze.hu, <https://orcid.org/0000-0001-7715-0814>
- LUCZ ZSOLT doktorandusz, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: lucz.zsolt96@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-9801-8681>
- MAJOROSNÉ LUBLÓY ÉVA ESZTER egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Magasépítés Tanszék. Kapcsolat: lubloy.eva@emk.bme.hu, <https://orcid.org/0000-0001-9628-1318>
- PAPP CSENGE doktorandusz, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: pappcsenge1996@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4950-2461>
- RONYECZ LILLA doktorandusz, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: lillaronyecz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5062-5488>
- SZAKÁLYNÉ GYÜRÜ KARINA doktorandusz, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Műszaki Doktori Iskola. Kapcsolat: gyukarszi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5336-433X>
- TEKNŐS LÁSZLÓ adjunktus, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Rendészet-tudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Katasztrófavédelmi Műveleti Tanszék. Kapcsolat: teknos.laszlo@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0003-0759-5871>
- TÓTH BENCE habilitált egyetemi docens, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Természet-tudományi Tanszék. Kapcsolat: toth.bence@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0003-3958-187X>
- VAS TÍMEA egyetemi docens, tanszékvezető, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülőhajózó Tanszék. Kapcsolat: vas.timea@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0002-0082-0370>
- VERES VIOLETTA nyelvtanár, Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Idegennyelvi és Szaknyelvi Lektorátus. Kapcsolat: veres.violetta@uni-nke.hu, <https://orcid.org/0000-0002-0638-5605>