



MŰSZAKI KATONAI KÖZLÖNY

Kiemelt közlemények

ÁDÁM BALÁZS: *Objektumok robbantás elleni védelmének kialakítási lehetőségei*

SZEPESI VIKTOR: *Ukrajna humanitárius aknamentesítésének problémája a korszerű technológiák és lehetőségek tükrében*

KARDOS GERGELY: *Kémények robbantásos bontása beépített környezetben*

36. évf. (2026)
1. szám

ISSN 2063-4986 (elektronikus)



LUDOVIKA
EGYETEMI KIADÓ

Műszaki Katonai Közlöny

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kara, valamint a Magyar Hadtudományi Társaság Műszaki Szakosztályának elektronikus (online) megjelenésű tudományos folyóirata.

ISSN 2063-4986 (elektronikus)

Főszerkesztő

Kovács Zoltán

Szerkesztőbizottság elnöke

Padányi József

Szerkesztőbizottság

Cibulová Klára

Daruka Norbert

Elek Barbara Júlia

Ember István

Hanka László

Hornyacsek Júlia

Horváth Tibor

Kovács Tibor

Kovács Zoltán

Kuti Rajmund

Lőrincz Árpád

Lukács László

Pavel Manas

Nagy Rudolf

Tóth Rudolf

Szerkesztőség címe

Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Harctámogató Tanszék

1101 Budapest, Hungária krt. 9–11. A épület, 949. iroda

Levelezési cím: 1581 Budapest, Pf. 15

E-mail: kovacs.zoltan@uni-nke.hu

Telefon: +36 1 432 9000/29 539 • HM 02-22-9539

Kiadó

Nemzeti Közszolgálati Egyetem Ludovika Egyetemi Kiadó

Kapcsolat: www.ludovika.hu; kiadvanyok@uni-nke.hu

1083 Budapest, Ludovika tér 2.

A kiadásért felel: Deli Gergely rektor

Olvasószerkesztők: Bujdosó Hajnalka, Gergely Zsuzsanna, Resofszi Ágnes

Tördelőszerkesztő: Dobos Gergely



Tartalom

Ádám Balázs Objektumok robbantás elleni védelmének kialakítási lehetőségei	5
Szepesi Viktor Ukrajna humanitárius aknamentesítésének problémája a korszerű technológiák és lehetőségek tükrében	33
Kardos Gergely Kémények robbantásos bontása beépített környezetben	45
Krisztián Végh Issues of Countering Unmanned Aircraft Vehicles Concerning Deployed Forces	59
István Ember Possible Applications of Photopolymerisation Additive Manufacturing Processes in the Armed Forces	73
Mentolai Sebastian Robbanóanyag-analitikai vizsgálati módszerek alkalmazása a robbanóanyagokkal elkövetett bűncselekmények felderítésében	85
Pap Andrea, Vég Róbert László Térszemlélet fejlesztése a katonai logisztikában 3D-nyomtatás és számítógéppel támogatott műszaki modellezés (CAD) által – 2. rész	101
Nagy Zsolt, Hokstok Kinga Reziliencia és pszichoszociális kockázatok a hivatásos szolgálatban	117
Horváth Krisztián Többtest-dinamika és kapcsolt szimulációk alkalmazása a védelmi iparban	131
Horváth István A gammakitörés-hosszúság és a spektrális keménységi adatok vizsgálatainak ellenőrzése a CGRO T50 és H32 adatok használatával	143

Ádám Balázs¹ 

Objektumok robbantás elleni védelmének kialakítási lehetőségei

Katonai objektumokkal szembeni fenyegetettségek típusai

Design Options for Blast Protection of Structures

Types of Threats against Military Facilities

Az Egyesült Nemzetek Szervezete Humanitárius Ügyek Koordinációs Irodája (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, OCHA) által közzétett statisztikai adatok alapján 2010. október és 2020. szeptember között 2288 IED2-támadás történt Afganisztánban, amelyek közül 117 alkalommal katonai bázis volt a támadás fő célpontja. Az öngyilkos IED-merényletek legkedveltebb célpontjai a katonai járműkonvojok voltak, 78 esetben támadták ezeket, katonai objektumok ellen is előszeretettel alkalmaztak ilyen támadásokat, pontosan 77 alkalommal.³ Napjainkban a katonai objektumok nagyrészeinek helyzete már pontosan beazonosítható bárki számára az internet segítségével, ezért korunk katonai objektumaira és szervezeteire gyakorolt legjelentősebb fizikai fenyegetést (a konvencionális konfliktusokból eredőkön kívül) a terrorcélú robbantások jelentik. A cikksorozat célja a katonai objektumok robbantásos cselekmények elleni védelme utólagos kialakítási lehetőségeinek bemutatása, kiemelve a hazánkban is elérhető technológiákat.

Kulcsszavak: *IED, robbantásos merényletek, robbanóanyag-detektálás, védelem, védőtávolság*

¹ Tűzszerész, robbantástechnikai szakember, e-mail: adam.balazs@mil.hu

² *Improvised explosive device* – improvizált robbanószerkezet.

³ SCALABRINO 2020.

According to statistical data published by the United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), between October 2010 and September 2020, a total of 2,288 IED (Improvised Explosive Device) attacks occurred in Afghanistan. Among these, military bases were the primary targets in 117 cases. The most frequent targets of suicide IED attacks were military vehicle convoys, which were attacked in 78 instances, while such attacks were also commonly used against military installations, with exactly 77 incidents reported. Today, the locations of most military installations can be precisely identified by virtually anyone using the internet. As a result, apart from threats stemming from conventional conflicts, the most significant physical threat to modern military facilities and organisations is posed by terrorist bombings. The aim of this article series is to present the possible retroactive design solutions for protecting military facilities against explosive attacks, with special emphasis on technologies available in Hungary.

Keywords: IED, bomb attacks, explosives detection, protection, standoff distance

Bevezetés

Bár magyar szemmel a terrorizmus szó hallatán elsősorban a közel-keleti háborús konfliktusok alapjául szolgáló indokokat értjük, az utóbbi évtizedben számos alkalommal jelentek meg terrortámadásként aposztrofált cselekmények Nyugat-Európában is. Az Európai Parlament (EP) által közzétett statisztikák alapján 2023-ban az Európai Unióban (EU) 120 terrortámadást regisztráltak (ebből 98 végrehajtott, 9 sikertelen és 13 megghiúsult). A korábbi évek eredményeihez képest (2022-ben 28, 2021-ben 18 regisztrált esemény) ez markáns növekedést jelent. Hét EU-tagállamban történt támadás, közülük a legtöbb Franciaországban (80 eset), Olaszországban (30 eset), Németországban és Spanyolországban (3–3 eset). A megnövekedett eseményszám mellett a terrorizmussal kapcsolatos letartóztatások száma is növekedett, a 2022-es 380 főhöz képest 2023-ban már 426 főt állítottak elő a hatóságok. A letartóztatások jelentős része csupán négy ország területére korlátozódott, ezek Spanyolország (84 letartóztatás) Franciaország (78 letartóztatás), Belgium (75 letartóztatás) és Németország (51 letartóztatás). Ezek a személyek általában fiatal férfiak voltak.⁴

A megjelenített statisztikai adatok is jól bizonyítják, hogy a terrorizmus elleni harc kudarata, történjen az akár aktív, akár passzív eszközökkel, a hadtudományi interdiszciplináris kutatások fő feladatát képezi napjainkban.⁵ A védekezésre pedig időt, energiát és kellő anyagi forrást kell fordítani.

Kovács Zoltán szavaival élve: „Az improvizált robbanóeszközök olyan házilagosan készített, tehát nem üzemi körülmények között gyártott, előállított eszközök, amelyek a pusztító hatásukat a robbanás hatóerejével, az egészségre ártalmas vegyi, biológiai anyagokkal, pirotechnikai eszközökkel, vagy gyújtóhatású anyagok segítségével érik el.”⁶ Ennél kicsivel komplexebb meghatározást ad a hivatalos megfogalmazás:

⁴ Európai Parlament 2025.

⁵ BODA et al. 2016a; BODA et al. 2016b.

⁶ KOVÁCS Z. 2012.

„Házilagosan készített robbanószerkezet: olyan, katonai robbanótestekből, katonai vagy ipari robbanóanyagokból, vagy detonáció kiváltására alkalmas házi készítésű anyagokból, illetve ezek közös alkalmazásával rögtönzött módon összeállított és/vagy elhelyezett, rombolásra, mozgásképtelenné tételre vagy zavarkeltésre szánt szerkezet, amely halálos, egészségre ártalmas pirotechnikai vagy gyúlékony vegyi anyagokat és CBRN-alkotóelemeket is tartalmazhat.”⁷

Az IED-k méretei a levélmérettől egészen a teherautó nagyságáig széles skálán mozognak, összetettségüknek is csak a képzelet szabhat határt – ma már nemcsak az egyszerű mechanizmusokkal lehet találkozni, hanem komplexen összeállított, modern érzékelőkkel és áramkörökkel felszerelt, több működési elven is egyszerre működő megoldásokkal is. Ezek méretétől és működési elvétől függően eltérő eljárásokat, intézkedéseket, rendszabályokat és védelmi mechanizmusokat kell a védekező félnek alkalmaznia.⁸ Éppen ettől lesz olyan komplex feladat a terrorcélú eszközök elleni védelem kialakítása, főleg, ha azt utólagosan kell kiépíteni. Az IED-k felkutatásának technikai szervesen kapcsolódhatnak az aknamentesítési feladatokhoz is, például felszín alá telepített IED esetében. Ezek a keresési technikák sokféle lehetnek, de a főbb felderítési módok és eszközök a következők: mechanikus, biológiai/kémiai, elektromágneses, részecsketechnológiai és akusztikus működési elvű, továbbá ezek kombinációjából jöhet létre.⁹

Célkitűzések megfogalmazása

Objektumok robbanás elleni védelmének kialakítási lehetőségei kapcsán már számos magyar nyelven elérhető publikációval lehet találkozni. Szóljon az akár a terror elleni vagy a robbanóanyag-gyártás és -tárolás kapcsán a védelem kialakításáról. Rendkívül részletes leírásokat adnak különböző nemzeti és nemzetközi irányelvek és szabályzók is, különösen az amerikai védelmi minisztérium UFC-szabványsorozata.¹⁰ Természetesen ezen dokumentumok legfrissebb változatai általában valamilyen minősítési szinttel vannak ellátva, így csak a régebbi változataik kutathatók.

Mivel készültek már a témában kutatások és publikációk, az elsődleges kutatási cél a már meglévő ismeretek rendszerezése, és ezen alapulva az újfajta technológiák bemutatása, azok anyagi vonzatainak összehasonlítása. Természetesen vannak olyan védelmi alapvetések, amelyek az idő folyamán nem változtak, mert alapvető fizikai jelenségeken alapulnak. Ilyen például a biztonsági távolságok alkalmazása, de természetesen annak pontos számítási metodusai és értékei folyamatos kutatások tárgyát képezik.

⁷ DARUKA 2013: 77.

⁸ DARUKA 2022a.

⁹ KOVÁCS–EMBER–DARUKA 2024.

¹⁰ *Unified facilities criteria* (UFC) – egységes létesítmények kritériumai. Ilyen többek között a UFC 3-340-02 Robbanásbiztos szerkezetek kialakítása a baleseti jellegű robbanások hatásainak mérséklésére; UFC 4-010-01 A Védelmi Minisztérium épületekre vonatkozó minimális antiterrorizmus követelményei; UFC 4-023-03 Épülettervezés a progresszív szerkezeti összeomlás megelőzésére vagy a UFC 4-022-03 Biztonsági kerítések és kapuk.

A kutatás fő célkitűzése tehát azon legmodernebb rendszabályok, technikák, technológiák és építészeti megoldások összegyűjtése és rendszerezése, amelyek alkalmasak a katonai objektumok utólagos robbanás elleni védelmének kialakítására, különösen azok a megoldások, amelyek hazánkban is elérhetők. Pénzügyi vonatkozásban fő cél a megoldási lehetőségeket csoportosítani alacsonyabb és magasabb bekerülési értékük alapján, ezzel kínálva gazdaságosabb, de általában alacsonyabb védelmi szintet és maximális védelmet jelentő, de nagy anyagi ráfordítást igénylő változatokat. Az adminisztratív intézkedéseknek nincs költsége, és már ezek alkalmazásával is jó védelmi szintet lehet elérni.

A kutatásnak nem célja a robbanóanyag-gyártással vagy -tárolással összefüggő védelmi rendszerek kialakításának vizsgálata. A menekülőutak, vészkijáratok, tűzjelzés és -oltás vagy az elektromos berendezésekkel és a szellőztetéssel kapcsolatos rendszerek kialakítása önálló kutatási terület.¹¹

Katonai objektumokkal szembeni fenyegetettségek típusai

Ahhoz, hogy a katonai objektumokat rendeltetésüknek megfelelő, továbbá kellően hatékony fizikai védelmi szinttel ruházzuk fel, meg kell határozni azokat a kockázatokat, amelyek a legnagyobb veszélyt jelentik számukra. Éppen ezért fontos kockázatelemzéssel meghatározni a várható kockázatokat és azok szintjét, hogy később prioritizálni lehessen azokat. Mivel a kockázatok típusának meghatározása még nem elégséges, ezen támadási formák hatásmechanizmusának elemzése is fontos, nemcsak a fizikai védelem, hanem a rendszabályok tekintetében is. A fizikai védelem mellett kulcsterület a robbanóanyagok detektálása is műszerek vagy állatok segítségével. Ilyen képességgel a Magyar Honvédség (MH) jelenleg is rendelkezik, így a fejezet célja ezek bemutatása is.

Katonai objektumok elleni robbantásos cselekmények kockázatelemzése

A katonai vezetők a vezetés minden szintjén kötelesek az aktuális környezetükre vonatkozó kockázatokat és veszélyeket azonosítani. A kockázatok nemcsak a katonai szervezetek szűk értelemben vett feladatainak végrehajtása során jelentkeznek, hanem tágabb értelemben az egész katonai szervezetre vonatkozóan is létrejönnek, ilyenek például a helyzetükkel, telepítési objektumokkal kapcsolatos kihívások is. A katonai objektumok nagyrészeinek helyzete pontosan beazonosítható bárki számára az internet segítségével, így a napjaink katonai szervezeteire gyakorolt legjelentősebb fizikai fenyegetést a terrorcélú robbantások jelentik.

A kockázatok értékelését és az azok bekövetkezésének csökkentésére tett intézkedéseket a feladat-végrehajtás tervezése, előkészítése és végrehajtása során folyamatosan végezni kell. Ez alapvetés, viszont a már megépült és használatban lévő katonai objektumok esetén a tervezés és előkészítés (mint robbantás elleni építési technológiák) fázisa irreleváns, így csak a „végrehajtás”, tehát a mindennapi életre vonatkozó kérdésekben lehet a kockázatelemzést megtenni.

¹¹ DARUKA 2022b.

Az ENSZ Humanitárius Ügyek Koordinációs Irodája (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, OCHA) által közzétett statisztikai adatok alapján 2010. október és 2020. szeptember között 2288 IED-támadás történt Afganisztánban, amelyek hatására 27 539 civil sérült meg; az esetek 78,6%-át, tehát 21 637 sérülést (6625 esetben halált, 15 012 esetben sebesülést) IED-k okoztak. Ugyanebben az időszakban a NATO kötelékében harcoló fegyveres erők, valamint a katonai magánvállalatok¹² alkalmazásában álló személyek közül 3071-en sebesültek és 3565-en haltak meg. Összesen 117 katonai bázist ért IED-támadás. A leggyakrabban utak szélén vagy mellett elhelyezett IED-eket alkalmazták, összesen 834 esetben (1. ábra).



1. ábra: A kabuli kormányzóhelyettes, Mahbubullah Mohibi halálát okozó mágneses bomba által hagyott kráter
Forrás: ABED – GIBBONS-NEFF 2021

Érdekes tény, hogy több mint 500 alkalommal öngyilkos merénylek követték el a robbantásos cselekményeket, ezzel 3365 szövetséges fegyveres testülethez tartozó személyt öltek vagy sebesítettek meg. Az afganisztáni konfliktus kezdetétől, vagyis 2001-től 829 amerikai katona hunyt el IED-támadás következtében, ez a nemzet teljes veszteségének 42%-át teszi ki. Ugyanez az adat a brit kontingens esetében 222 haláleset, amely a teljes afganisztáni veszteség 49%-át jelenti.¹³

¹² Private military company, PMC.

¹³ SCALABRINO 2020.

A több mint 500 öngyilkos merényletből az angol nyelvű média szerint 232 köthető a tálibokhoz, 52-ért pedig az ISIS¹⁴ a felelős. A merényletek hatására 13 268 civil és 3365 szövetséges fegyveres sebesült meg. Az öngyilkos támadások 70%-át nagyforgalmú, sokak által látogatott helyszíneken hajtották végre. A legtöbb ilyen esemény 2018-ban volt, egészen pontosan 74 incidenssel. Az öngyilkos IED-merényletek legkedveltebb célpontjai a katonai járműkonvojok voltak, 78 esetben támadták ezeket, katonai és civil objektumok ellen is előszeretettel alkalmaztak merényleteket pontosan 77 és 71 esetben (2. ábra). Rendőrségi objektumokat 61 alkalommal ért ilyen jellegű atrocitás.¹⁵



2. ábra: Öngyilkos merénylet áldozatává vált amerikai katonai objektum Afganisztánban

Forrás: OPPEL JR. – SUKHANYAR 2012

A feldolgozott statisztikai adatok alapján markánsan körvonalazódik, hogy a terrorcélú robbantásos cselekmények elkövetői számára a műveleti területek kiemelt célpontjai közé tartoznak a katonai, rendfenntartó és civil objektumok. Bár az afganisztáni háború alapvetően a NATO¹⁶ reguláris csapatai és irreguláris csapatok között zajlott, valamint az ISAF¹⁷ és később az RS¹⁸

¹⁴ Iszlám Állam nevű szunnita dzsihádistá szervezet, működési területét tekintve leginkább Irakban és Szíriában.

¹⁵ SCALABRINO 2020.

¹⁶ North Atlantic Treaty Organization – Észak-atlanti Szerződés Szervezete.

¹⁷ International Security Assistance Force – Nemzetközi Biztonsági Közreműködő Erő. A NATO vezetésű koalíciós rendfenntartó erő megalakítására az ENSZ Biztonsági Tanácsa 2001. december 20-án adott felhatalmazást.

¹⁸ Resolute Support – Elszánt Támogatás. A NATO ISAF-missziója 2015. január 1-jétől megváltozott célokat és feladatrendszert kapott, így az új típusú megközelítés miatt a feladatrendszert is átnevezték.

kontingensei sem egy NATO-tagország területén állomásoztak, mégis, ilyen esetben is, katonai konfliktus tekintetében, legyen az konvencionális vagy aszimmetrikus, a saját csapatok katonai, illetve rendfenntartó és közigazgatási célú objektumainak védelme kulcsfontosságú.

Katonai objektum esetében, amennyiben csak terrorcélú improvizált jellegű robbantásos cselekményekről beszélünk, és nem konvencionális csapatok rakéta-, esetleg tüzérségi csapásáról, illetve bombázásáról stb., véleményem szerint a legnagyobb kockázatot a személy vagy gépjármű által célba juttatott IED-k (PBIED¹⁹ és VBIED²⁰), továbbá ezek öngyilkos elkövetési módhoz kialakított verziói (SPBIED²¹ és SVBIED²²) jelentik. Fontosnak tartom még megemlíteni két olyan támadási forma elemzését is, amelyekkel az afganisztáni és iraki műveletek során nem, vagy csak nagyon kis számban lehetett találkozni. Az egyik ilyen a drónnal vagy drónokkal (drónrajjal) végrehajtott támadási forma, a másik pedig a vízi úton történő merénylet. Mivel földrajzi adottságából adódóan hazánk nem rendelkezik nagyszámú vízi vagy vízparti katonai objektummal, a meglévő telephelyek védelme kritikus, ugyanis az azokra mért csapással teljes képességbénítás vagy -vesztés érhető el.

A katonai létesítmények támadása mellett további kockázati tényezőt hordozhat a robbanóanyagok kicsempészése egy-egy laktanyából, amely indirekt módon segíthet elő későbbi támadásokat. A robbanóanyag kicsempészése komoly fenyegetést jelent, ugyanis a Magyar Honvédség alakulatainak nagyrésze heti rendszerességgel hajt végre valamilyen robbantással kapcsolatos tevékenységet, és vannak olyan szakcsapatok is, mint például a tűzszerész- vagy utászalegységek, akik nap mint nap robbanóanyagokkal és gyújtószerekkel dolgoznak. A bal-esetekből származó robbanások veszélyeit a kutatás szempontjából jelenleg nem tekintem mérvadónak, így azzal nem is számolok.

Ahhoz, hogy az itt felsorolt legnagyobb kockázattal rendelkező támadási formákat rendszerezni és az ellenük tett óvintézkedéseket prioritizálni lehessen, szükséges azok rangsorolása. A sorrend felállításához a NATO-ban széles körben alkalmazott DD Form 2977²³ módszert használtam (1. táblázat). A kockázatelemzés matematikai valószínűségi alapokon nyugvó elkészítéséhez a Bayes-analízis és a megbízhatósági index módszerek is alkalmazhatók, akár rendelkezünk kellő mintának számító robbantásos esemény leírásával, akár nem.²⁴

A DD Form 2977 használata során első lépésként azonosítani kell a felmerülő veszélyeket, ezeket a személyek, anyagi javak és a feladat szempontjából elemezni kell. A személyi állományra nagy veszélyt jelentenek az IED-k alkalmazásával véghezvitt támadások, hiszen a robbanás hatására keletkező repeszek és a túlnyomási értékek közvetlenül veszélyeztetik az emberi életet, és sebesülések kockázatát hordozzák magukban. Közvetett módon a roncsolódott épületszerkezetek, leszakadó törmelékek is további sérüléseket okozhatnak. Az IED-incidensek az objektumokra és az anyagi javakra is nagy veszélyt jelentenek a kialakuló lökéshullámok roncsoló hatása

¹⁹ *Person-borne improvised explosive device* – személy által célba juttatott IED.

²⁰ *Vehicle-borne improvised explosive device* – jármű által célba juttatott IED.

²¹ *Suicide person-borne improvised explosive device* – öngyilkos személy által célba juttatott IED.

²² *Suicide vehicle-borne improvised explosive device* – öngyilkos jármű által célba juttatott IED.

²³ *Deliberate risk assessment worksheet* – szándékos kockázatelemzési munkalap. Az Egyesült Államok Védelmi Minisztériumának szabványosított űrlapja. Ez az űrlap része a Department of Defense Forms (Védelmi Minisztériumi Űrlapok) rendszernek, tehát a Védelmi Minisztérium fejlesztette ki és hagyta jóvá. Általában katonai szervezetek használják különböző kockázatelemzések készítésére.

²⁴ BALOGH–HANKA 2012; HANKA 2012.

miatt. A roncsolódott épületek és a sebesült, elhalálozott katonák miatt pedig már a katonai szervezetek alaprendeltetési feladatainak végrehajtása is veszélybe kerülhet. Ezzel szemben robbanóanyagok kicsempészése a katonai objektumokból közvetlen hatást nem gyakorol sem a személyi állományra, sem az anyagi javakra, technikai eszközökre. Viszont a hiányzó robbanóanyag-mennyiség felhasználása IED-kben és azzal támadás végrehajtása már katonai szervezetek alaprendeltetési feladatainak végrehajtását is akadályozhatja, korlátozhatja.

1. táblázat: Kockázatértékelő mátrix

Kockázatértékelési mátrix		Valószínűség (várt gyakoriság)				
		Cyakori: Folyamatos, rendszeres vagy elkerülhetetlen előfordulások	Valószínű: Több vagy számos előfordulás	Alkalmi: Szórványos vagy megszakított előfordulások	Ritkán: Ritka előfordulások	Kicsi valószínűség: Lehetséges előfordulások, de valószínűtlenek
Súlyosság (várt következmény)		A	B	C	D	E
Katasztrofális: küldetés kudarca, egység készenléti képességének megszűnése; halál, elfogadhatatlan veszteség vagy kár	I	RM	RM	M	M	K
Kritikus: jelentősen csökkent egység-készültség vagy küldetéképesség; súlyos sérülés, betegség, veszteség vagy kár	II	RM	M	M	K	A
Mérsékelt: enyhén csökkent egység-készültség vagy küldetéképesség; kisebb sérülés, betegség, veszteség vagy kár	III	M	K	K	A	A
Elhanyagolható: kis vagy semmilyen hatás a katonai egység készülttségére vagy a küldetés képességére; minimális sérülés, veszteség vagy kár	IV	K	A	A	A	A
Jelmagyarázat: RM – Rendkívül magas kockázat M – Magas kockázat K – Közepes kockázat A – Alacsony kockázat						

Forrás: a szerző szerkesztése Deliberate risk assessment worksheet alapján

A VBIED-k alkalmazása kapcsán az olyan esetekre kell asszociálni, amikor egy gépjárműves elkövető a laktanya kerítésén kívül, de ahhoz nagyon közel helyezi el a járművet, illetve amikor sikeresen behajt az objektum külső védelmét alkotó kerítésen belülré, és a gépjárművet a parkolóban vagy épületek mellett helyezi el. A hatályos tűzserékszabályzók személygépjárműben elhelyezett IED-k esetében legalább 200 m biztonsági távolságot írnak elő.²⁵ Egy ilyen, személyautóban vagy kisebb méretű dobozos furgonban elhelyezhető robbanóanyag-tömeg amerikai eljárásrendek alapján körülbelül 227–454 kg²⁶ között lehet. Ilyen tömegű robbanóanyag esetén a katonai gyakorlatban alkalmazott

²⁵ AEODP–03 2020.

²⁶ DHS–DOJ Bomb Threat Stand-Off Card.

számítással (60 cm széles cementhabarcsos téglá falazóanyaggal kalkulálva) képlettel számítva (ahol C: a robbanóanyag tömege; A: az igénybe vett robbanóanyagtól függő tényező; h: a legtávolabbi robbantandó elem vastagsága és r: a töltet és a robbantandó elem közti távolság)²⁷ a töltettől mért 5,6–7,9 m távolságon belül biztosan rombolódik minden falszerkezet, amely természetesen nem csak az épület ezen részének sérülését jelenti. Ugyanez a számítás 40 cm széles vasbeton tartó esetében 3,4–4,8 m-t eredményez. Amerikai ajánlás alapján is, az ekkora robbanóanyag-tömegek esetében alkalmazandó elsődleges biztonsági távolság 98–122 m.²⁸

Az esemény súlyossága ebben az esetben II, mivel függetlenül attól, hogy áldozat által elműködtetett, időzített vagy távirányított indítási móddal rendelkezik az IED, a legpontosabb célzást és a legkisebb távolságot a rombolandó objektumhoz képest nem lehet vele elérni összehasonlítva az öngyilkos merényleti formával. Valószínűség tekintetében „D” típusú az eset, mivel a különböző indító mechanizmusok elkészítéséhez előismeretre és nagyobb anyagi forrásokra van szükség. Ilyen nagy mennyiségű robbanóanyagot beszerezni vagy házi körülmények között előállítani rendkívül időigényes és összetett folyamat, és egy katonai objektumba is sokkal nehezebb egy gépjárművel becsempészni, mint kisebb mennyiséget csupán egy hátizsákban vagy robbanóeleményben (hozzávetőleg 9–10 kg).²⁹ Ezek alapján a VBIED-k alkalmazásának kockázata közepes.

Az SVBIED-k használatával a VBIED-khez képest hasonló tömegű robbanóanyag juttatható célba, viszont a merénylő általi indítással már az épületekhez sokkal közelebb (akár az épületbe fizikálisan behajtva) lehet a robbantást kiváltani, ezzel többszörözve a robbanóanyag épületszerkezetre gyakorolt pusztító hatását (3. ábra).



3. ábra: Lefoglalt SVBIED Raqqa városában

Forrás: Postings 2018

²⁷ Lukács 2017: 130.

²⁸ DHS-DOJ Bomb Threat Stand-Off Card.

²⁹ DHS-DOJ Bomb Threat Stand-Off Card.

Mivel az ilyen *ramming*³⁰ típusú támadásokkal sokkal pontosabb lehet a célkiválasztás, az esemény súlyosságát tekintve már I-es is lehet. Bár ilyen esetben az indító mechanizmusok elkészítése egyszerűbb lehet, a nagy mennyiségű robbanóanyag beszerzése és a gépjármű nehézkes fedett bejuttatása egy objektumba összességében „D” valószínűséget eredményez. Ezek alapján az SVBIED-k alkalmazásának kockázata magas.

PBIED-k esetében azokra az incidensekre kell asszociálni, amikor egy általában magányos elkövető hátizsákban vagy saját testére erősítve juttat robbanóanyagot egy katonai objektumba. A hatályos tűzszerész-előírások aktatáska méretű IED-k esetében legalább 100 m biztonsági távolságot írnak elő.³¹ Személyek testén elhelyezhető vagy csomagjában elrejthető robbanóanyag-tömeg amerikai elvek alapján körülbelül 9–22,7 kg³² között lehet. Ilyen tömegű robbanóanyag a korábban használt képlettel számolva 60 cm széles cement-habarcsos téglafalat 1,1–1,8 m távolságból lenne képes pusztítani, 40 cm széles vasbeton szerkezetet pedig már csak körülbelül 0,7–1,1 m távolságból lehetne vele rombolni. Ebből jól konstatálható, hogy a személy által célba juttatott eszközök nem az épületszerkezetek rongálására használhatók hatékonyan. Ellenben az UFC 3-340-02 Table 1-1³³ alapján a robbantás túlélésének valószínűsége már csak 50%-ra csökken ilyen volumenű robbanóanyag-tömeg esetén (pontos robbanóanyag-tömegtől függően) körülbelül 3,3–5,2 m-es távolságban szabadterén végzett támadás esetén. Természetesen ezek a távolságértékek beltéri robbantások során a visszavert nyomásfrontok miatt sokkal távolabbra is elnyúlhatnak. Ezért a PBIED-k a legnagyobb pusztítást beltéri iniciálással érik el. Mivel a kisebb robbanóanyag-tömeggel kisebb szerkezeti roncsolódás és anyagi kár, továbbá kevesebb sérülés okozható, az események súlyosságát tekintve III-as kategóriába lehet sorolni. PBIED-t méretéből fakadóan könnyebb készíteni, mint gépjárműbe rejtett pokolgépet, így ennek alkalmazási valószínűsége is nagyobb, tehát már a „C” kategóriába fog tartozni. Összesítve, a PBIED-k katonai objektumok elleni alkalmazásának kockázata közepes.

SPBIED-vel azonos tömegű robbanóanyag juttatható célba, mint egy őrizetlenül a helyszínen hagyott csomaggal (hátizsákkal, utazótáskával). A sima PBIED-k használatával a megfelelő célpont kiválasztása, főleg beépített környezetben, elég nehézkes, szinte lehetetlen feladat, ezzel szemben az öngyilkos merénylő által használt típusok alkalmazásával pontosabb lehet a célpontkiválasztás (4. ábra).

Az esemény súlyosságát tekintve így az már II-es kategóriájú. Bár egy olyan magasabb beosztású személy vagy kiemelt prioritású épületrész megközelítése, amely indokolja ezt a magasabb kategóriát, összetettebb előkészítést igényel, de a pontos iniciálási idő megválaszthatósága miatt (az elkövető választja meg) a célpontválasztás ideálissá válik. Habár az SPBIED-k indító mechanizmusa könnyebben elkészíthető, az esemény bekövetkezésének valószínűsége nem lesz nagyobb, mert a gyújtási lánc legnehezebben beszerezhető eleme

³⁰ A VBIED-k csoportjába tartozó elkövetési módszer, amikor az elkövető egyenesen a lezárt objektumba vagy épületbe hajt a nagyobb pusztítás érdekében.

³¹ AEODP-03 2020.

³² DHS-DOJ Bomb Threat Stand-Off Card.

³³ UFC 3-340-02 2008.

jelen esetben is a robbanóanyag lesz, így a valószínűségi csoport a „C”. A kockázatértékelő mátrixból ez alapján az határozható meg, hogy az SPBIED-k alkalmazásának kockázata magas.

Napjainkban már a közforgalomban lévő drónok is képesek terhek szállítására, azok célba juttatására, kisebb módosítások mellett ezeket el is képesek engedni. Ez a fejlődő tendencia fogja eredményezni az idő előrehaladtával, hogy ezek az eszközök kisebbek lesznek, jobb aerodinamikai tulajdonságokkal, jobb vezérléssel, nagyobb hatótávolsággal, magasabb képességű szenzorokkal, jobb szoftveres háttérrel és könnyebb irányítással fognak rendelkezni. Ebből adódóan gyorsabbak, és több hasznos teher cipelésére lesznek képesek.³⁴ A jelenleg közforgalomban elérhető eszközök képességei még nem teszik lehetővé a többkilós terhek szállítását, így a hatékonyság növeléséhez SPBIED-k alkalmazásához hasonlóan a célszemélyek közelében kell a robbanást előidézni. Ez nem egyszerű feladat, főleg zárt terű környezetben, így nagyobb valószínűségű a kültéri alkalmazás. A pontos célpontválasztás miatt az esemény súlyosságát tekintve azt II-es kategóriájúnak tekintem. A drónok könnyű beszerezhetősége miatt a szűk keresztmetszet a PBIED-khez hasonlóan a robbanóanyag lesz, így a valószínűségi csoport a „C”. A kockázatértékelő mátrix alapján a dróntámadások kockázata magas.



4. ábra: A nigériai Dadin Kowa településen SPBIED alkalmazása bankrabláshoz

Forrás: ABDULLAHI 2024

A vízi és vízparti katonai objektumok védelme nemcsak objektum-, hanem képességvédelmi feladat is. Az ilyen objektumok elleni támadások (amennyiben azok nem hadihajók személyzettel a fedélzeten, hanem kikötők) nem járnak nagyszámú személyi sérüléssel, inkább a kikötőkben állomásozó hajók és a kikötői infrastruktúra roncsolását eredményezik. A képességvesztés tehát elsősorban nem személyi, hanem anyagi-technikai jellegű. Éppen

³⁴ PLEDGER 2021.

ezért az esemény súlyosságát tekintve az II-es kategóriájú. Mivel a hatékony támadás végrehajtásához olyan tömegű robbanóanyagra van szükség, mint a VBIED-k esetében, így annak beszerzése rendkívül körülményes, ezért „D” valószínűséget eredményez. Ezek alapján a WBIED-k³⁵ alkalmazásának kockázata közepes.

A robbanóanyagok és gyújtószerek katonai objektumokból történő terrorcélú kicsempészése olyan fenyegetettség, amely magasabb terrorveszélyeztetettségi szint nélkül is viszonylag könnyedén előfordulhat. A kockázatot okozó legfőbb kitettség véleményem szerint a katonai alakulatok gyakori és széles körű robbanóanyag-használata. Természetesen ezek a felhasználások kiképzési céllal történnek, vagy egyes szakcsapatok esetében (például tűzszerészek) az alaprendeltetésű tevékenységek ellátásához szükségesek. Éppen ezért, ennek a kockázatnak a minimalizálását jelentő tényezője nem elsősorban a robbanóanyag-felhasználás csökkentése vagy korlátozása lenne, hanem a felhasználás pontosabb monitorozása és a beléptetési pontokon a kimenő forgalom magasabb fokú átvizsgálása, továbbá a robbanóanyag- és gyújtószernyomok detektálása.

Robbanóanyag és gyújtószer eltulajdonítása katonai objektumból egzakt módon nem hat ki a katonai alakulatok tevékenységére, mivel egy olyan mennyiséget jelentő tolvajlás, ami már képességcsökkenést jelenthetne, szinte lehetetlen, vagyis ezen bűncselekmény következményének súlyossága a katonai szervezetre nézve IV-es kategóriájú. Ellenben az esemény lehetséges gyakoriságát górcső alá véve annak valószínűsége jóval magasabb a korábban említett IED-típusoknál, ezért a gyakoriságot tekintve az a „B” csoportba sorolható. Összességében a robbanóanyag és gyújtószer csempészésének kockázata alacsony.

A kockázatelemzésben felsorolt és részletezett IED-események rangsorolása alapján a katonai objektumokra legnagyobb veszélyt jelentő robbantással vagy robbanóanyaggal kapcsolatos (kivéve a balesetből származó) eseményeket csökkenő sorrendben a 2. táblázat mutatja.

2. táblázat: Rangsorolt IED-események

Ssz.	Típus	Kockázat
1.	SVBIED	Magas
2.	SPBIED	Magas
3.	Dróntámadás	Magas
4.	VBIED	Közepes
5.	PBIED	Közepes
6.	WBIED	Közepes
7.	Robbanóanyag és gyújtószer kicsempészése	Alacsony

Forrás: a szerző szerkesztése

³⁵ *Water-borne improvised explosive device* – vízi úton célba juttatott IED.

Természetesen ez a fenyegetettség-értékelés és a kockázati kategóriák csak terrorcélú robbantások kapcsán értelmezhetők, ugyanis, ha más típusú fenyegetettségeket is figyelembe vennénk és a megfelelő mátrix alapján értékelnénk, akkor a katonai objektumokkal szembeni robbantásos cselekmények kockázati csoportjainak homogenizálódását okoznánk. Ez káros lenne, mivel az egyértelmű rangsorolás elősegíti és támogatja a döntéshozók védelmi célú fejlesztési prioritásainak meghatározását és az anyagi forrásoknak a rangsor alapján megvalósuló optimális elosztását.

IED-támadások mechanizmusa

Korunk IED-környezete nagymértékben eltér attól a környezettől, amely az IED-k megjelenésének idejében volt tapasztalható. Teljesen átalakult a támadások mechanizmusa és az elérni kívánt célok is, ezért az ellenük való hatékony védekezés érdekében meg kell határozni a napjainkban leggyakrabban használt elkövetési módokat, trendeket.

Lukács László kutatási eredményei alapján 1605–1950 között körülbelül 3000³⁶ robbanóanyaggal elkövetett merényletről tudunk, ezzel szemben 1970–2007 között már mintegy 44 800³⁷ ilyen eseményről. Kezdetben az elkövetők két fontos cél érdekében választották a támadások ilyen formáját. Egyrészt a robbanás hatásával nagyobb pusztítást és biztosabb megsemmisítést lehetett elérni a fegyveres támadásokhoz képest, másrészt az elkövetőnek nem kellett közvetlenül a helyszínen tartózkodnia, ami magasabb megmenekülési, elszökési valószínűséget eredményezett.³⁸ Míg az IED-k alkalmazásának kezdeti időszakában még nem volt jellemző az öngyilkos merényleti forma, addig napjainkban ez már a leggyakrabban és a leghatékonyabban alkalmazott támadási mechanizmusok között szerepel.³⁹ Balogh Zsuzsanna kutatási eredményei alapján a 2000-es évek elejétől jól nyomon követhető az öngyilkos mechanizmus szélesebb körű elterjedése. 2000-ben 20, 2004-ben 94, 2006-ban 522 és 2008-ban már 608 esetben követtek el ilyen támadásokat.⁴⁰

A robbantásos cselekmények elvi céljuk alapján öt csoportba sorolhatók. Nacionalista jellegű célok vezérlik általában a függetlenségi követelésekért küzdő csoportokat, mint az IRA,⁴¹ ETA⁴² vagy PKK⁴³ és más palesztin terrorszervezetek. Politikai célok is vezérelhetik a tevékenységeket, ahogy történt ez a szélsőbaloldali eszméket támogató Vörös Brigádok⁴⁴ esetében is. Egy konkrét célra összpontosítanak például a szélsőséges növény- és állatvédő szervezetek. Az üzleti célok vezérelte csoportok bérmunkaként végzik a támadásokat a megrendelők céljaitól függetlenül, ilyen volt például a japán Vörös Hadsereg. Napjainkban

³⁶ LUKÁCS 2012.

³⁷ LUKÁCS 2012.

³⁸ LUKÁCS 2012.

³⁹ SCALABRINO 2020.

⁴⁰ BALOGH 2013a: 50.

⁴¹ Irish Republican Army – Ír Köztársasági Hadsereg: Észak-Írország Egyesült Királyságtól való elszakadásáért küzdő csoport.

⁴² Euskadi ta Askatasuna – Baszkföld és Szabadság: Baszkföld Spanyolországtól való elszakadásáért küzdő csoport.

⁴³ Partiya Karkerên Kurdistan – Kurdisztáni Munkáspárt: Törökország területén a kurd jogokért küzdő csoport.

⁴⁴ Brigate Rosse: Olaszországban tevékenykedő szélsőbalos politikát követő terrorszervezet.

a legtöbb támadást vallási célból követik el. Ilyen vallás által vezérelt terrorcsoport például az ISIS vagy a Boko Haram⁴⁵ is.⁴⁶

A terrorcélú robbantásos cselekmények jellemzőik alapján csoportokba sorolhatók. A pontos célszemélyek elleni támadások jellemzői, hogy konkrét személyeket céloznak általában kis tömegű töltet közeli alkalmazásával, amelyet gyakran valamilyen használati tárgyba rejtnek. Gyakori formái lehetnek a csomagküldemények, színlelt elhagyott táskák, de akár gépjárművek is. A demoralizálást, vagyis bomlasztást és zavarkeltést célzó eszközök általában nem a nagy pusztító erejükkel érik el hatásukat. Hatásmechanizmusukra jellemző a kis robbanóanyag-töltet alkalmazása, viszont nagy tömegek által látogatott helyszíneken robbantva. Ezzel leginkább a polgári lakosságban generálnak általános félelemérzetet, ami folyamatosan pszichológiai nyomásként hat, a társadalom minden szintjén befolyásolva a mindennapi életvitelt. A pszichés hatásokat már egy tervezett merénylet helyszínének bejelentésével is el tudják érni: a bejelentés hatására általános pánik törhet ki. Közvetlen hatása még a helyzetkezeléshez szükséges nagyszámú rendfenntartó erők lekötése is. A bosszút célzó eszközök hatásmechanizmusukban hasonlítanak a demoralizáló célúakra, de ez esetben a nagyszámú emberi és anyagi kár okozása a legfőbb szempont. Így a nagy tömegű robbanóanyag-töltetek alkalmazása a legerjedtebb. Ennek pontos tömege viszont széles skálán mozog, ugyanis a testre helyezett, néhány kilós töltetű robbanó övektől és mellényektől egészen a gépjárművekbe helyezett többtonnányi robbanóanyagig terjedhet.⁴⁷ Ez a legnagyobb pusztítást célzó elkövetési mód, így a legnagyobb védelmi potenciált is ennek megelőzésére és/vagy következményeinek csökkentésére kell megszervezni és kialakítani.

Mivel egy robbantásos cselekmény elvi célját pontosan meghatározni csak annak bekövetkezése után, szerencsésebb esetben sikeres megelőzéssel lehet, ennek valószínűségét nem is célravezető értelmezni katonai objektumok esetében. Jellemzőik alapján viszont megállapítható, hogy a katonai objektumok elleni robbantásos cselekmények fő célkitűzése az általános bosszú jellegű támadás. Bizonyos kiemelt katonai vezetők munkaállomásaként szolgáló objektumok, mint például minisztérium, magasabbegység- és egységvezetési objektumok esetében már jóval nagyobb a kitétség a konkrét személyek elleni célzott támadásoknak is. Éppen ezért az ilyen objektumok védelmének kialakítását ebből a szempontból is vizsgálni kell.

Ki- és beléptetési pontok robbanóanyag-detektálási lehetőségei

Kockázatelemzésemben megállapítottam, hogy a katonai objektumokból robbanóanyag és gyújtószer ki- és becsempészése markáns kockázati elem a terrorcselekmények elleni védelemben. A robbanóanyag becsempészésének oka az IED-támadások véghezvitele, amelyek akár személy, akár gépjármű által célba juttatottak is lehetnek. A robbanóanyag kicsempészése közvetlen módon nem fenyegeti a katonai objektumokat, vagy azok műveleti képességét; annyi robbanóanyagot kicsempészni egy laktanyából, hogy az a műveleti képesség csökkenését

⁴⁵ Nigériában alapított szélsőséges iszlamista szervezet.

⁴⁶ BALOGH 2013a: 50–51.

⁴⁷ LUKÁCS 2012; LUKÁCS–BALOGH 2019.

okozza, szinte lehetetlen. Ellenben gyakori, kis mennyiségű csempészéssel már egy nagyobb szabású terrortámadás fő töltetét is meg lehet alapozni. A fejezet célja azon technológiák bemutatása, amelyek hatékonyan alkalmazhatók robbanóanyag detektálása céljából katonai környezetben. A fejezetnek nem célja egyes eszközök bemutatása, azokat csak a konkrét védelmi helyzetek kapcsán tárgyalom.

A detektálás alapvetően kettő módon történhet: állat (5. ábra) vagy műszer, műszerállomás segítségével. Bár folynak kutatások méhekkal és patkányokkal robbanóanyag kimutatására, azokat személy- és gépjármű-, valamint csomagátvizsgálásra nem lehet alkalmazni az időigényességük miatt, valamint higiénias és egészségügyi szempontból sem. Ezzel szemben kutyákat gyakran és megbízhatóan lehet használni. A kutya rendkívül érzékeny orra még nem elég ahhoz, hogy munkakutyának is alkalmas legyen, ahhoz könnyen taníthatónak, fegyelmeztetnek, nyugodtnak és tanulékonynak is kell lennie. Általában a következő fajtákat szokták alkalmazni a feladatra: labradorok, juhászkutyák, foxterrierek és spánielek.⁴⁸



5. ábra: Robbanóanyag-kereső kutya kiképzése a Magyar Honvédségben

Forrás: TAKÁCS–SZOVÁTHY 2022

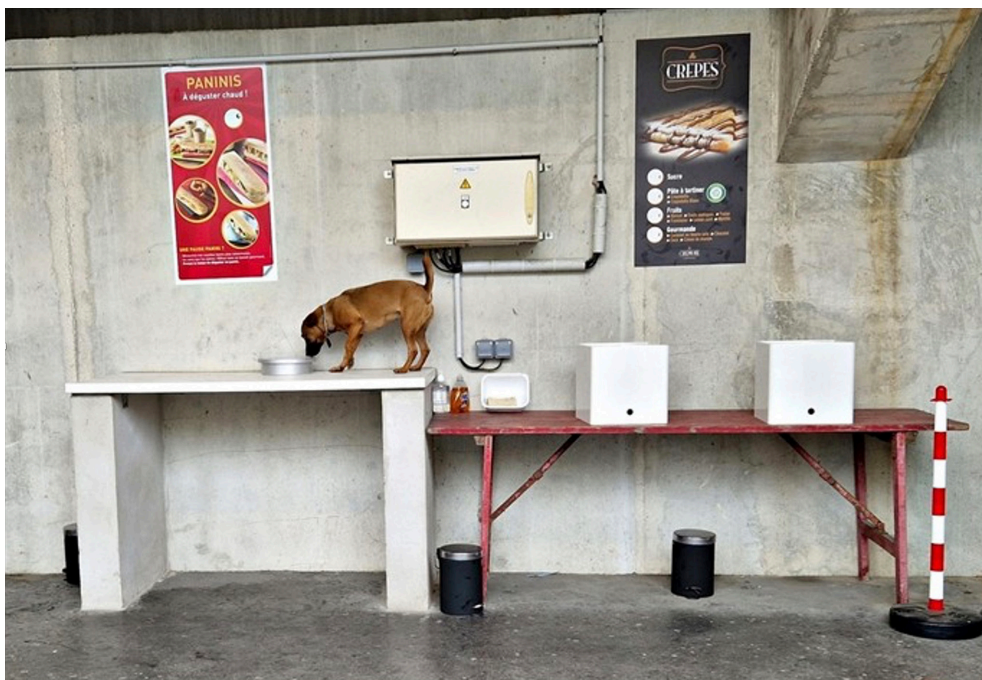
A robbanóanyag-kereső kutyák legfőbb feladata a katonai, polgári vagy házi készítésű robbanóanyagok detektálása. Legtöbbször passzív jelzésre képezik őket, hogy ne bolygassák meg a talált eszközt, kockáztatva ezzel egy esetleges „csapda” elműködtetését. Nemzetenként

⁴⁸ KOVÁCS 2012.

eltérő, de alapvető elvárás a felderítési képességgel kapcsolatban, hogy már 10 g robbanóanyag-maradványt képes legyen felismerni a kutya. A keresési folyamat történhet pórázzal és póráz nélkül is, de minden esetben szájkosár nélkül, hogy az a szaglást ne befolyásolja.⁴⁹

A kutyák orra rendkívül összetett és érzékeny szerv, szövetekből, csontokból, idegekből és az agy egyes részeiből áll. Illatreceptorok helyezkednek el egy csontok és szövetek által alkotott üregben, amely illatreceptorok és a szaglászervi idegek segítségével történik az illatérzékelés az agylebeny megfelelő részén. Amíg az emberek 5 millió, addig a kutyák átlagosan 200 millió ilyen receptorral rendelkeznek. Szaglászervi gumóik négyszer nagyobbak, viszont ez a szaglászervi képesség kisebb helyen helyezkedik el a kutyák esetében, mint az embernél. Bizonyos kutyafajtáknak, illetve általánosságban a hosszabb orrú kutyáknak még ennél is jobb mutatóik lehetnek.⁵⁰

A Magyar Honvédség, bár rendelkezik robbanóanyag-kereső kutyás képességgel (6. ábra), az csak szakaszerejű, és nem lenne képes ellátni a katonai objektumok védelmét a robbanószer-csempészés elleni küzdelemben.



6. ábra: Robbanóanyag-kereső kutya keresési feladat közben

Forrás: MH 1. Tűzserész és Folyamőr Ezred 2022

⁴⁹ SZATAI 2019.

⁵⁰ KOVÁCS 2012.

Ahhoz, hogy ez a honvédségi képesség eleget tegyen az igényeknek, az állomány bővítésére lenne szükség. Vizsgáljuk meg ezt a kérdéskört anyagi szempontból is! Amennyiben (a teljesség igénye nélkül) körülbelül 30 katonai objektum védelmét szeretnénk ellátni, akkor objektumonként legalább 2 kutyára és vezetőjére van szükség 24/72-es váltási rendben. A kutyák számát minimum kettőben kell meghatározni, ugyanis mindig szükség van az állatok pihentetésére, továbbá kontrollkutya alkalmazására. Ilyen esetben objektumonként legalább 8 kutyára és vezetőjére lenne szükség, ami 30 objektum esetén 240 kutyát + vezetőt jelent. Bérezés tekintetében kedvezőbb lehet, ha ezt a képességet nem önálló alakulat biztosítja, hanem a kutyavezetők az ügyeletes tiszt rendszerhez hasonlóan az adott alakulat állománytáblájában szerepelnek. Így a felsorolt létszám fele legénységi, fele altiszti állományú lehetne. Az állandó kiképzéshez, szinten tartáshoz, doktrinális háttéralkotáshoz és egyéb feladatokhoz szükséges körülbelül 10 zászlós, 4 tiszt és 1 főtiszt. Ezen személyi állomány anyagi járandósága havonta (legénységi, altiszt-, zászlós-, tiszt és főtiszt állományt 550, 650, 750, 800 ezer és 1 millió forint bruttó jövedelemmel számolva)⁵¹ 155,7 millió Ft. Ehhez még hozzá kell számolni a kutyák fenntartásából (élelem, állatorvos stb.) származó költségeket, ami körülbelül 10 millió Ft havonta. Természetesen ez nem pontos, hanem hozzávetőleges számítás, de a havi bruttó 165,7 millió Ft-os kiadás jó közelítő minimumérték.

A szolgálati kutyák mellett vagy helyett alkalmazhatók helyszíni, tehát nem laboratóriumi kémiai analitikai vizsgálati lehetőségek is a robbanóanyag-detektálás érdekében. Ezeket a módszereket Lapat Attila doktori értekezése⁵² alapján Horváth Tibor és Ember István dolgozta fel, egészítette ki a katonai alkalmazás aspektusából.⁵³ Az ő csoportosításuk alapján 3 fő csoport határozható meg:

- klasszikus kémiai analitikai módszerek;
- tömeget érzékelő módszerek;
- kis mennyiségű robbanóanyag-maradvány vagy -nyom analizálására alkalmas módszerek.⁵⁴

A klasszikus módszerek közé tartozik a kolorimetrikus detektálás, amelynek lényege, hogy vegyületek vagy azok csoportjai megfelelő reagens hatására csak rájuk jellemző színváltozást szenvednek, ezzel jól láthatóan azonosítva a kémiai folyamatban szereplő vegyületet vagy vegyületcsoportot. Legfőbb hátránya, hogy a helyszíni azonosítást megerősítendő laboratóriumi vizsgálatokat is kell végezni a mintán. Legnagyobb előnye, hogy gyors és olcsó, leggyakrabban spray formában alkalmazzák.⁵⁵

A tömeget érzékelő módszerek egyike a nukleáris technológiák csoportja, amelyek tovább bonthatók neutron- és nem neutronalapú eljárásokra. A technológia sugárzó anyagok, izotópok felhasználásán alapszik, ezért rendkívül nagy egészségügyi kockázatot jelent. Éppen ezért szigorú szabályozási és engedélyeztetési háttere van az alkalmazásának. Legnagyobb előnye,

⁵¹ ANDREJCSIK 2024.

⁵² LAPAT 2002: 28–31.

⁵³ HORVÁTH–EMBER 2022.

⁵⁴ HORVÁTH–EMBER 2022.

⁵⁵ HORVÁTH–EMBER 2022.

hogy a sugárzó anyagok részecskéi rendkívül vastag vizsgálandó közegen képesek áthatolni, így rendkívül nagy hatékonysággal alkalmazhatók nagy kiterjedésű rakományok gyors és hatékony átvizsgálására, amelyekben képesek kis mennyiségű robbanóanyagot is detektálni. Másik tömeget érzékelő módszer a röntgentechnológiák csoportja. A röntgensugárzás felhasználása bűnmegelőzési célból is rendkívül elterjedt. A több mint száz éve használt röntgentechnológiát napjainkban széles körben alkalmazzák közforgalmú repterek, katonai és közigazgatási objektumok beléptetési pontjain. Éppen ezért a legalapvetőbb robbanóanyag-felderítési módszerek is tekinthetjük. A tomográfiaalapú technológiák is röntgensugárzást használnak, viszont itt a csomagokról megjelenő kép többletinformációt hordoz a hagyományos röntgenképekhez képest. Egyrésztől 3D-s ábrázolásmódja van, másrészt az eltérő vastagságú és sűrűségű rétegek (csomagoló-, rejtő-, takaró- és vizsgálatot nehezítő anyagok) nem tudnak takarást biztosítani a rejteti kívánt anyagoknak, így könnyebb detektálást tesz lehetővé a biztonsági személyzet számára.⁵⁶

A kis mennyiségű robbanóanyag-maradvány vagy -nyom analizálására alkalmas módszerek közé tartozik a tömegspektrometria-alapú detektálási eljárás. Az egyik legrégebb óta alkalmazott technológia lényege, hogy a robbanóanyagból vagy annak maradványaiból származó részecskék párolgást tudja azonosítani. Két fő típusa a négypólusú és az ioncsapdás tömegspektrométer. Rendkívül jól alkalmazható helyszínelési feladatok során, azonban az ilyen technológiával végzett valós idejű robbanóanyag-felderítés nem terjedt el szélesebb körben. Az infravörös spektrometria alapú detektálás során egyrészt Fourier-transzformációt alkalmaznak, amelynek segítségével pontosabb molekulaösszetétel azonosítható, mint a kromatográfias készülékek használatával, másrészt Raman-spektroszkópia is alkalmazható, aminek detektálási folyamata nem az infravörös fénnyalábok elnyelésén, hanem szóródásának analizálásán alapul, ezzel alkalmassá téve a technológiát átlátszó csomagolásokban lévő tárgyak vizsgálatára is. Az ionmobilitás-spektrometrián alapuló detektálás módszer széles körben elterjedt a repülőtereken, mivel felületekről vett mintákat képes azonosítani (7. ábra).



7. ábra: IONSCAN 600 ionmobilitás-spektrometrián alapuló műszer mintavizsgálata

Forrás: IONSCAN 600

⁵⁶ HORVÁTH-EMBER 2022.

Egyik hátránya, hogy a robbanóanyaghoz hasonló ionmobilitás-spektrummal rendelkező anyagokat is jelzi, ezért viszonylag sok téves riasztást ad. A gázkromatográfia-alapú detektálás során kemilumineszcens anyagok segítik elő a műszerek érzékenységét. Jól használható nitrogénalapú robbanóanyagok detektálására, ami a robbanóanyagok nagyrésztében alkotóelem. A felerősített fluoreszkálópolimer-alapú detektálás jelenleg még kutatás témáját képezi, de a kutatók nagy reményt fűznek hozzá mint jövőbeni vezető detektálási módszerhez.⁵⁷

Az itt felsorolt detektálási eljárásokat alapvetően nem laboratóriumi közegben alkalmazzák, így az ilyen módon működő technikai eszközök megfelelőek lehetnek egy katonai objektum ki- és beléptetésének ellenőrzésére. A fejezet célja nem konkrét eszközök bemutatása volt, azokat majd meghatározott esetekben, helyzetekben mutatom be.

Épületek rendeltetésének meghatározási lehetőségei és a védelem általános alapelvei

Hazánk olyan nemzetközi szervezeteknek tagja, mint az Európai Unió vagy a NATO, amely szervezetek tagjaik számára a robbanások elleni védelem kialakításával kapcsolatos ajánlásokat is megfogalmaznak. E szabályzók mellett természetesen az amerikai vonatkozó dokumentumokat is érdemes a kérdéskörben megismerni, ugyanis azok rendkívül részletesen kidolgozottak és sokszor kísérleti eredményekre támaszkodnak. Éppen ezért én is az amerikai ajánlásokat és előírásokat vettem alapirodalomnak a témában.

A robbanás hatásaival szembeni leghatékonyabb, legegyszerűbb és legköltséghatékonyabb védekezési módszer a biztonsági védőtávolságok alkalmazása (3. táblázat). A védőtávolságok tudományos, robbanásfizikai magyarázata a robbanási lökéshullámok szabad térben történő terjedésén alapul. A távolság és a lökéshullám ereje négyzetesen arányos, ezért fontos a megfelelő beépítetlen területek meghatározása. Természetesen ezek újonnan épült ingatlanok esetén egyszerűen kivitelezhetők a tervezőasztal mellett (ezek később megkönnyíthetik az épületek további fejlesztését, a védelmi szint növelését), de már megépített objektumok esetén szükséges azok szakszerű, statikai elemzést követő megerősítése.⁵⁸ A védőtávolságok alkalmazása azért fontos, mert a robbanásnak óriási pusztító ereje lehet. A pusztító erő nagysága általában a robbanóanyag fajtájától, mennyiségétől, a burkolat típusától, az elhelyezkedésétől, továbbá az érintett személy tömegétől, orientációjától függ leginkább.⁵⁹

A gépjárművek parkolóhelyei körül fokozott körültekintéssel kell meghatározni a biztonsági távolságokat. Meg kell különböztetni és el kell szeparálni a parkolón belül az ott dolgozók járműveit, a gazdasági vagy technikai kiszolgálást végző járműveket (postai, karbantartó, ételalanyanyagot szállító, mosodai vagy szemétszállító járműveket) és a szolgálati gépjárműveket. Meg kell határozni azokat a parkolóhelyeket, amelyeket az ügyintéző és megálló, de helyszínen nem várakozó járművek használhatnak. A kiemelt parkolóhelyeket a támadhatóság elkerülése érdekében nem ajánlott megjelölni, névvel vagy beosztástáblával ellátni.⁶⁰

⁵⁷ HORVÁTH–EMBER 2022.

⁵⁸ UFC 4-010-01 2012, BALOGH 2013b.

⁵⁹ DARUKA–BUNYITA 2023.

⁶⁰ BALOGH 2013a: 28–29.

Törekedni kell arra, hogy a parkolóhelyek a külső periméterművelmen belül helyezkedjenek el, kerítéssel legyenek körülveve, kamerával legyenek megfigyelve és valamilyen beléptető rendszeren keresztül lehessen odajutni. Amennyiben ez nem kivitelezhető, úgy a parkolók és az objektumok közötti biztonsági távolságot kell a meghatározott értékűre növelni. Meglévő objektumok esetében, ahol a parkolóterületek és épületek közötti biztonsági távolság nem elégséges, az épülethez közeli parkolóhelyeket a forgalom elöl el kell zárni, illetve az utak mentén a parkolást meg kell tiltani a megfelelő távolságig. Erre passzív forgalomszabályozó eszközök alkalmazása a legkézenfekvőbb.⁶¹

3. táblázat: Biztonsági távolságok hagyományos vasbeton szerkezetek esetén

Védelmi szint	Robbanóanyag tömege (kg)	Megkívánt biztonsági távolság hagyományos vasbetonszerkezet esetén	
		Teherhordó szerkezetként (m)	Nem teherhordó szerkezetként (m)
Nagyon alacsony	25	7	4
	100	32	7
	250	71	13
Alacsony	25	7	4
	100	32	11
	250	71	32
Közepes	25	84	7
	100	149	32
	250	251	71
Magas	25	84	84
	100	149	149
	250	251	251

Forrás: a szerző szerkesztése UFC 4-010-01 2018 alapján

Az UFC 4-010-01 2018-as kiadása alapján a minimális tartandó biztonsági távolság (beépítetlen terület) az épületek környezetében 10 m. Ezen a távolságon belül semmi olyan utcabútor, növényzet vagy áttekintést gátló építmény nem lehet, amely alkalmas lehet egy 15 cm átmérőjű vagy annál nagyobb robbanótöltet rejtett elhelyezésére. Amennyiben az objektum

⁶¹ UFC 4-010-01 2018.

körül kerítés van, úgy a belső tiszta zónának legalább 6 m szélesnek, a kerítés túoldalán pedig még egy 9 m széles külső tiszta zónának kell lennie. Általánosságban törekedni kell arra, hogy a kerítés 15 m távolságban helyezkedjen el az objektumtól.⁶²

Az UFC 4-010-01 2018-as kiadása a korábbi szabályzatokhoz képest jóval összetettebb módon adja meg az építményekre vonatkozó minimális biztonsági távolság értékeit. Terjedelmi megfontolásból a mátrixos megoldótáblák pontos számítási módszerét nem mutatom be, az a hivatkozott szabályzatban megtalálható. A bonyolult számítási módszert az adja, hogy a biztonsági távolságot az elvárt biztonsági szint, a várható robbanóanyag-tömeg, a teherhordó és nem teherhordó falazat anyaga és azok építési paraméterei alapján határozza meg (8. ábra).⁶³

Már a biztonsági távolságok alkalmazása is nagymértékben javítja az épületek védelmi képességét, azonban a szerkezeti megoldásoknak is van jelentősége. A teljes összeomlás és megsemmisülés veszélye a három vagy annál több emelettel rendelkező épület esetében sokkal jelentősebb, így azok szerkezeti kialakítására, megerősítésére az UFC 4-023-03⁶⁴ tartalmaz szabályokat. Új építésű objektumoknál kerülni kell a három emeletnél magasabb épületszerkezetek kialakítását, továbbá az épület alatti parkolóházat. Amennyiben ennek elkerülése nem lehetséges, akkor a parkolóba való behajtást még szigorúbban kell ellenőrizni, továbbá a teherhordó oszlopok állapotának felmérése és megerősítése első számú prioritássá válik. Az épületszerkezetek kapcsán kerülni kell a konzolosan túlnyúló szerkezeteket, ha vannak ilyenek, akkor azok alatt a parkolást ugyancsak tiltani kell. A szomszédos épületeket szerkezeti nem szabad összekapcsolni, mert ezzel a progresszív összeomlás továbbterjedésének kockázata is megnő.⁶⁵

A bejáratokat úgy kell kialakítani, hogy a be- és kilépő személyeket ne lehessen vizuálisan megfigyelni, ugyanis az belövések és célzott IED-támadások kockázatát hordozhatja magában. A bejáratok ajtóinak esetében javasolt, hogy azok kifelé nyíljanak, mert így jobban ellenállnak a robbanási lökéshullám erejének. A külső forgalmat folytató kiszolgáló helységeket, legyen az posta, mosoda, üzemi konyha stb. javasolt az épületek külső oldalán elhelyezni.⁶⁶

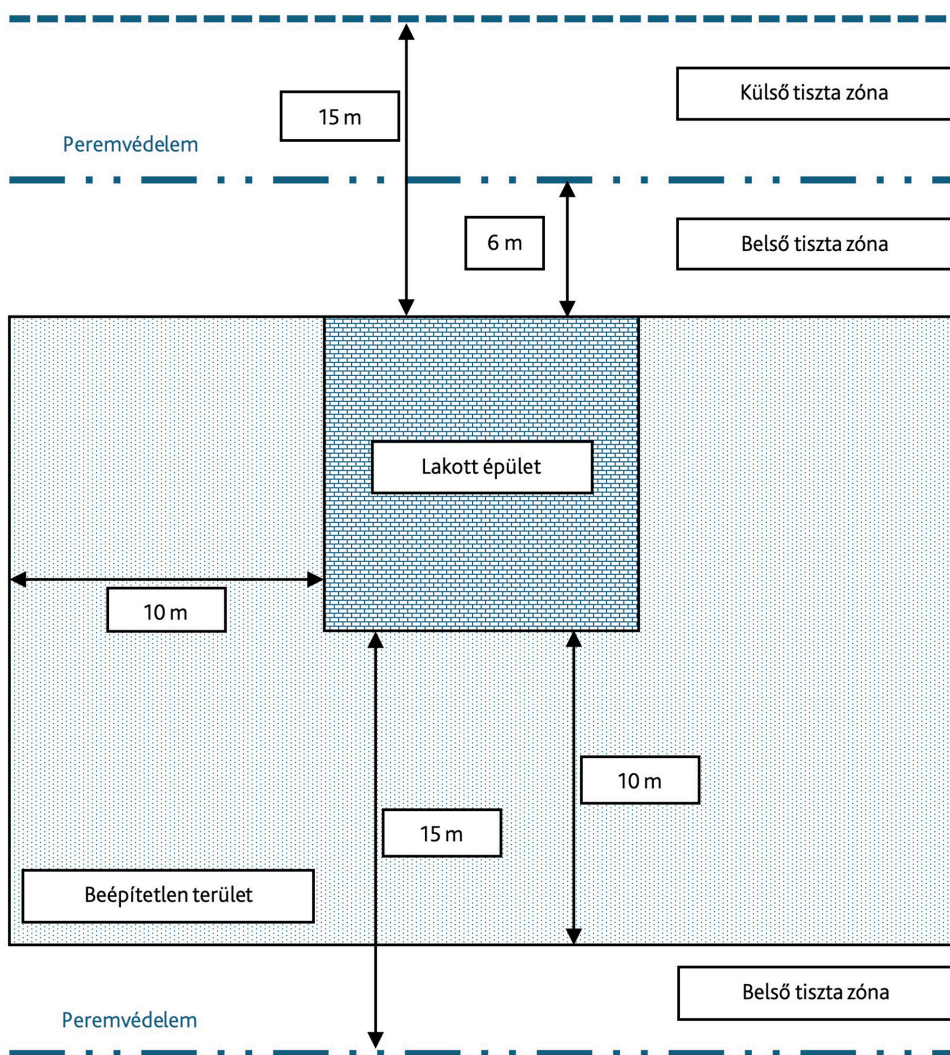
⁶² UFC 4-010-01 2018.

⁶³ UFC 4-010-01 2018.

⁶⁴ UFC 4-023-03 2009.

⁶⁵ BALOGH 2013a: 29–30.

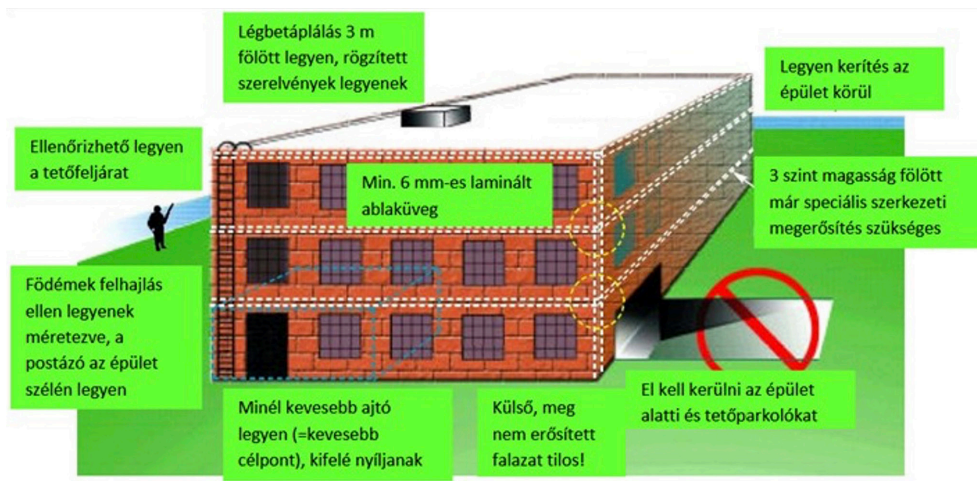
⁶⁶ BALOGH 2013a: 30.



8. ábra: Beépítetlen terület és a tiszta zónák biztonsági távolságai

Forrás: a szerző szerkesztése UFC 4-010-01 2018 alapján

Az épületek gépészeti elemeit, elsősorban a levegőztető rendszer légcserélő elemeit legalább a harmadik emelet magasságáig kell felvezetni, de ennél jobb megoldás lehet, ha az a tetőn kap helyet (9. ábra).



9. ábra: Minimális biztonsági ajánlások

Forrás: BALOGH 2013b

A légkondicionáló rendszert óvni kell bárminemű kis méretű improvizált robbanóeszköztől vagy CBRN-anyagtól,⁶⁷ amelyek a leginkább veszélyeztetik az épületben elhelyezett személyeket. Javasolt levegőelzáró szelepek beépítése is a rendszerbe, amelyek bizonyos rendszerrészeket képesek légmentesen elszeparálni, megakadályozva ezzel az esetlegesen mégis rendszerbe került veszélyes anyagok terjedését. A vízellátás a levegőellátáshoz hasonlóan kulcsfontosságú, a vízvezetékek és a vízelosztó termek fizikai védelme hasonlóan fontos. Az ivóvíz támadása alapvetően a vízvezetékekben vagy a tárolótartályokban történhet meg biológiai vagy vegyi anyagok szennyezésének segítségével. Más épületgépészeti vezetékrendszereket érdemes egy közös szerelőaknába helyezni, a teherhordó szerkezeti elemektől távol, hogy a teherhordó szerkezetek sérülésének hatására közvetlenül az épületgépészeti rendszerek ne sérüljenek meg.⁶⁸

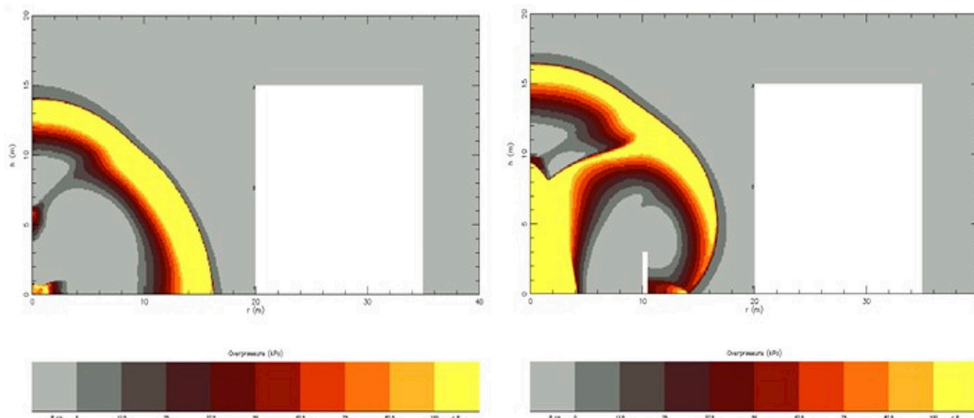
Mivel a körkörös védelemnek köszönhetően a katonai objektumok geometriai közepén van a legjobban védett terület, az épületek rendeltetését úgy kell meghatározni, hogy a legmagasabb szintű védelmet jelentő főépület is itt helyezkedjen el. Ettől koncentrikusan kifelé kell elhelyezni vagy meghatározni a többi épület rendeltetését, fontossági sorrendjüket figyelembe véve.

Robbanásvédelmi alapvetés lehet még az épületek köré emelt repeszvédelmi fal is, ugyanis Román Zsolt és Nagy Róbert áramlástani szoftverekkel végzett kutatásai alapján az épületek köré emelt megfelelő magasságú és távolságra elhelyezett földtöltés (mint fal) képes nemcsak

⁶⁷ A CBRN angol mozaikszó, a chemical, biological, radiological, and nuclear azaz kémiai, biológiai, sugárzó és nukleáris szavakból.

⁶⁸ BALOGH 2013a: 30; Singapore Police Force [é. n.].

a repeszek felfogására, hanem a töltés mögötti épület homlokzatára eső túlnyomási értékek jelentős csökkentésére is (10. ábra).⁶⁹



10. ábra: Védőfallyal körbevett épület robbanásterhe
Forrás: ROMÁN 2016: 78

Összegzés

Az IED-k alkalmazásával végrehajtott katonai támaszpontok elleni támadásokkal kapcsolatos részletes statisztikai információkkal az afganisztáni háborúból rendelkezünk. Bár ennek a műveletnek már vége, fontos levonni a következtetéseket, amelyekkel a hazai és más missziós területen fekvő katonai objektumaink felkészíthetők az ilyen jellegű veszélyek ellen. A tapasztalatfeldolgozást napjaink kihívásai is sürgetik, gondoljunk csak az ukrajnai vagy az izraeli–palesztin konfliktusokra.

A védelmi építmények optimális, leghatékonyabb és legcélszerűbb kialakítása érdekében elemezni kellett azokat a kockázatokat, amelyek a legvalószínűbbek és a legjelentősebb kihatással lennének a hazai katonai objektumokra. Az események súlyossága és a bekövetkezés valószínűsége alapján a vonatkozó mátrixból magas, közepes és alacsony kockázati kategóriákba osztottam ezeket. Magas kockázatot jelentő eseményeik lettek az SVBIED-vel, az SPBIED-vel és a drónokkal végrehajtott támadási formák. Közepes kockázatot jelentő események a VBIED-vel, a PBIED-vel és a WBIED-vel végrehajtott támadási formák. Mivel a katonai telephelyről reális mennyiségű robbanóanyag kicsempészése a katonai szervezetre minimális hatást gyakorol, ennek a kockázata alacsony besorolási szintet kapott.

A robbantásos cselekményeket elvi céljuk alapján öt fő csoportra oszthatjuk,⁷⁰ ezek közül véleményem szerint a katonai objektumokra a nacionalista és a vallási célú támadások

⁶⁹ ROMÁN–NAGY 2012; ROMÁN 2016: 78.

⁷⁰ BALOGH 2013a: 50–51.

a legveszélyesebbek, ugyanis alapvetően ezek céljai között szerepelhet a támadott ország fegyveres testületeinek gyengítése. A főbb jellemzők megismerése alapján az általános bosszú célú vagy mechanizmusú támadások a legvalószínűbbek. Ugyanakkor bizonyos vezető pozíciójú személyek ellen közvetlen támadások védelmére is fel kell készülni.

Ahhoz, hogy az IED-támadások valószínűségét csökkentsük, megfelelő eljárás mód lehet az azokhoz szükséges technikai eszközök és alapanyagok monitorozása. Ennek legkézenfekvőbb módja a legnehezebben beszerezhető alapanyag, tehát a robbanóanyag monitorozása. Mivel a MH számos alakulata használ mindennapos tevékenységeinek támogatására robbanóanyagot, vagy csupán raktározza azt, a kicsempészés lehetőségét az objektumokból meg kell szüntetni. Az ilyen irányú biztonsági megoldásokkal természetesen az objektumokba bűnös szándékkal becsempészni kívánt anyagok is detektálhatók. Így ezzel a képességgel kettős cél érhető el. A detektálás két alapvető módon történhet, egyrészt műszerrel, másrészt robbanóanyag-kereső kutyák és kutyavezetők bevonásával. Mindkét módszernek megvannak az előnyei és hátrányai is. A nagyobb teljesítményű keresőműszerek beszerzési ára magas, ám biztosabb detektálást tesz lehetővé, ezzel szemben a kutyák sokkal mobilabban alkalmazhatók, és a műszerekkel ellentétben nemcsak stacioner helyzetben, hanem mobil módon is. A pozitív és negatív tulajdonságok miatt javaslom ezeket a technológiákat kombinált módon alkalmazni. Természetesen a gépi és állati detektálás helyes arányának meghatározásához az objektum rendeltetésének ismerete nélkülözhetetlen.

Az épületek és objektumok védelmének határfoka már néhány rendszabállyal is jelentősen növelhető. Alapvetés lehet a biztonsági távolságok kialakítása az áttelepíthető építmények (például szeméttárolók, aggregátorok, mobil raktárak) között, vagy robbanásvédelmi töltések építése, ahol ez nem lehetséges. A következő legfontosabb elv a parkolóterületek elszeparálása és azok megközelítésének korlátozása. Ezek mellett fontos a nyílászárók és az épületszerkezetek megerősítése, valamint a közműhálózatok fizikai védelme.

Felhasznált irodalom

- ABDULLAHI, Maryam (2024): Police Arrest Man 'Strapped With Bomb' in Plateau Bank. *The Cable*, 2024. május 14. Online: <https://www.thecable.ng/police-arrest-man-strapped-with-bomb-in-plateau-bank/>
- ABED, Fahim – GIBBONS-NEFF, Thomas (2021): Targeted Killings Are Terrorizing Afghans. And No One Is Claiming Them. *New York Times*, 2021. január 2. Online: <https://www.nytimes.com/2021/01/02/world/asia/afghanistan-targeted-killings.html>
- ANDREJCSEK Gábor (2024): *Honvédségi béremelés*. Online: <https://andrejcsegabor.hu/honvedsegi-beremeles/>
- BALOGH Zsuzsanna (2013a): *Objektumok robbantásos cselekmények elleni védelmének lehetőségei*. PhD-disszertáció. Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola. Online: https://www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/balogh_zsuzsanna.pdf
- BALOGH Zsuzsanna (2013b): Az USA védelmi minisztérium által kiadott, épületek minimálisan kialakítandó terrorizmus elleni védelmének szabványa – egységes létesítményi előírások. *Műszaki Katonai Közlöny*, 23(2), 47–63. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2397/1668>

- BALOGH Zsuzsanna – HANKA László (2012): Bayes-analízis alkalmazása a kockázatelemzésben. *Műszaki Katonai Közlöny*, 22(különszám), 57–72. Online: https://real-j.mtak.hu/18277/3/MKK_2012_ksz.pdf
- BODA József et al. (2016a): A hadtudományi kutatási irányok, prioritások és témakörök. *Államtudományi Műhelytanulmányok*, 16, 1–23. Online: https://www.uni-nke.hu/document/uni-nke-hu/2016_evi-16_szam-a-hadtudomanyi-kutatasi-iranyok_prioritasok-es-temakorok-2.original.pdf
- BODA József et al. (2016b): Fókusz és együttműködés. A hadtudomány kutatási feladatai. *Honvédségi Szemle*, 144(3), 3–19. Online: <http://real.mtak.hu/id/eprint/124069>
- DARUKA Norbert (2013): *A bűnös célú/terror jellegű robbantások és az ellenük való védekezés lehetőségei, különös tekintettel a tűzszerész feladatok ellátására*. PhD-disszertáció. Nemzeti Közszerológiai Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola.
- DARUKA, Norbert (2022a): Advanced Tools for the Explosive Materials Identification. In KOVÁCS, Tünde Anna – NYIKES, Zoltán – FÜRSTNER, Igor (szerk.): *Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection*. Berlin: Springer. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 455–469. Online: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-024-2174-3>
- DARUKA, Norbert (2022b): Critical Infrastructure Protection in the Production and Use of Explosives Industry Products. In KOVÁCS, Tünde Anna – NYIKES, Zoltán – FÜRSTNER, Igor (szerk.): *Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection*. Berlin: Springer. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 297–313. Online: https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_26
- DARUKA Norbert – BUNYITA Ákos (2023): A robbanóanyaggal elkövetett támadásoknak az emberi szervezetre, a tárgyra, épített és természeti környezetre gyakorolt hatásai. *Katonai Logisztika*, 31(3–4), 131–154. Online: <https://doi.org/10.30583/2023-3-4-131>
- Deliberate Risk Assessment Worksheet*. Online: https://academy.armymwr.com/application/files/6217/2003/1486/DD2977_sample_Tubing_Trip_nonfillable.pdf
- DHS-DOJ Bomb Threat Stand-Off Card*. Online: [https://www.fbiic.gov/public/2013/oct/DHS-DOJ%20Bomb%20Threat%20Stand-off%20Card%20\(Front-Back\).pdf](https://www.fbiic.gov/public/2013/oct/DHS-DOJ%20Bomb%20Threat%20Stand-off%20Card%20(Front-Back).pdf)
- Európai Parlament (2025): *Terrorizmus az EU-ban: terrortámadások és letartóztatások 2023-ban*. Online: <https://www.europarl.europa.eu/topics/hu/article/20250124STO26468/terrorizmus-az-eu-ban-terrortamadasok-es-letartoztatások-2023-ban>
- HANKA László (2012): Kockázat becslése a valószínűség kiszámítása nélkül, a megbízhatósági index és alkalmazása. *Műszaki Katonai Közlöny*, 22(2), 69–86. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2810/2069>
- HORVÁTH Tibor – EMBER István (2022): A robbanóanyagok azonosításának biztonsági jelentősége a tűzszerész szakfeladatok ellátása során. *Honvédségi Szemle*, 150(4), 94–103. Online: <https://kiadvany.magyarhonvedseg.hu/index.php/honvszemle/article/view/856/818>
- IONSCAN 600 robbanóanyagnyom- és narkotikumnyom-detektor*. Online: <https://znz.hu/termek/ionscan-600-robbanoanyag-detektor/>
- KOVÁCS Ádám (2012): Robbanószer detektálás állatok segítségével. *Hadmérnök*, 8(1), 5–14. Online: https://hadmernok.hu/2012_1_kovacs.pdf
- KOVÁCS Zoltán (2012): Az improvizált robbanóeszközök főbb típusai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 22(2), 37–52. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2012_2_03%20IED-k%20f%C5%91bb%20t%C3%ADpusai%20-%20Kov%C3%A1cs%20Z.pdf
- KOVÁCS Zoltán – EMBER István – DARUKA Norbert (2024): Orosz IED- és akna-távfelderítő eszközök. *Nemzetközi Haditechnikai Szemle*, 58(3), 24–30.
- LAPAT Attila (2002): *Robbanóanyag analitikai vizsgálati módszerek alkalmazása az igazságügyi szakértői munkában, szerepük a robbanóanyaggal elkövetett bűncselekmények felderítésében*. PhD-disszertáció. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Hadtudományi Doktori Iskola.

- LUKÁCS László (2012): Épületek elleni robbantásos cselekmények és jellemzőik. *Műszaki Katonai Közlöny*, 22(Különszám), 4–13. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2554/1822>
- LUKÁCS László (2017): *Szemelvények a magyar robbantástechnika fejlődéstörténetéből. Különös tekintettel a továbbfejlesztés várható irányaira és a kor új kihívásaira*. Budapest: Dialóg Campus.
- LUKÁCS László – BALOGH Zsuzsanna (2019): A kritikus infrastruktúra létesítményeinek robbantásos cselekmények elleni védelméről. *Honvédségi Szemle*, 147(3), 85–102. Online: https://honvedelem.hu/files/files/115996/hsz_2019_3_beliv_085_102.pdf
- MH 1. Tűzszerész és Folyamőr Ezred (2022): National Military Dog Championship 2022. Facebook, 2022. október 30. Online: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=495462425957484&set=pb.100064811915549.-2207520000>
- NATO STANDARD. *AEODP-03 Inter-Service Improvised Explosive Device Disposal Operations on Multinational Deployments – A Guide for Staff Officers/Operators* (2020). Edition D, Version 1.
- OPPEL JR., Richard A. – SUKHANYAR, Jawad (2012): Bombers Strike Outside U.S. Military Base in Afghanistan. *New York Times*, 2012. szeptember 2. Online: <https://www.nytimes.com/2012/09/02/world/asia/us-base-in-afghanistan-target-of-fatal-bomb-attacks.html>
- PLEDGER G., Thomas (2021): The Role of Drones in Future Terrorist Attacks. *Land Warfare Paper*, 137, 1–10. Online: https://www.ausa.org/sites/default/files/publications/LWP-137-The-Role-of-Drones-in-Future-Terrorist-Attacks_0.pdf
- POSTINGS, Robert (2018): An Analysis of the Islamic State's SVBIED Use in Raqqa. *International Review*, 2018. május 11. Online: <https://international-review.org/an-analysis-of-islamic-states-svbi-ed-use-in-raqqa/>
- ROMÁN Zsolt (2016): *SVBIED támadások elemzése, és a valószínűségi módszerek alkalmazása a védekezéssel kapcsolatos méretezési eljárásokban*. PhD-disszertáció. Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola. Online: https://lib.uni-obuda.hu/sites/lib.uni-obuda.hu/files/Roman_Zsolt_ertekezes.pdf
- ROMÁN Zsolt – NAGY Róbert (2012): Áramlástanai megközelítés alkalmazása a robbantások elleni védekezésben. *Műszaki Katonai Közlöny*, 22(különszám), 45–56. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2587/1853>
- SCALABRINO, Giulia (2020): Afghanistan: a Case Study in IED Harm. AOAV, 2020. október 15. Online: <https://aoav.org.uk/2020/afghanistan-a-case-study-in-ied-harm/>
- Singapore Police Force [é. n.]: *Guidelines for Enhancing Building Security in Singapore*. Online: <https://www.police.gov.sg/Advisories/Infrastructure-Protection/Building-Security>
- SZATAI Zsolt József (2019): A robbanóanyag-kereső kutyák alkalmazási lehetőségei napjainkban. *Műszaki Katonai Közlöny*, 29(1), 65–81. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2019.1.6>
- TAKÁCS Vivien – SZOVÁTHY Kinga (2022): Egy jó robbanóanyag-kereső kutya olyan, mint Logan. *Honvédelem*, 2022. január 5. Online: <https://honvedelem.hu/hirek/egy-jo-robbanoanyag-kereso-kutya-olyan-mint-logan.html>
- Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse*. UFC 4-023-03. Change 4 (2009). Online: https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_023_03_2009_c4.pdf
- Unified Facilities Criteria (UFC). DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings*. UFC 4-010-01. (2012). Online: https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ARCHIVES/ufc_4_010_01_2012.pdf
- Unified Facilities Criteria (UFC). DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings*. UFC 4-010-01. Change 3 (2018). Online: https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_4_010_01_2018_c3.pdf
- Unified Facilities Criteria (UFC). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. UFC 3-340-02. (2008). Online: https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ARCHIVES/ufc_3_340_02.pdf

Szepesi Viktor¹ 

Ukrajna humanitárius aknamentesítésének problémája a korszerű technológiák és lehetőségek tükrében

The Problem of Mine Clearance in Ukraine in the Light of Modern Technologies and Opportunities

Az Ukrajnában zajló háborús konfliktus következményeként kialakult aknaszennyezés messze túlmutat a katonai műveletek közvetlen hatásain. Az aknamezők jelenléte nemcsak az azonnali fizikai veszély szintjén jelent problémát, hanem hosszú távon is korlátozza a társadalmi és gazdasági helyreállítás lehetőségeit. A megszállt vagy visszafoglalt területeken a civil lakosság mozgása, a mezőgazdasági termelés újraindítása, valamint az infrastruktúra helyreállítása mind komoly akadályokba ütköznek.

Kulcsszavak: aknamentesítés, Ukrajna, humanitárius aknamentesítés, aknaharc

As a consequence of the ongoing armed conflict in Ukraine, the resulting mine contamination extends far beyond the immediate impacts of military operations. The presence of minefields poses not only an immediate physical danger but also severely limits the potential for long-term social and economic recovery. In the occupied or recaptured territories, the movement of civilians, the restart of agricultural production, and the restoration of infrastructure all face significant obstacles.

Keywords: demining, Ukraine, humanitarian demining, mine warfare

¹ Robbantástechnikai szakember, GCFA, e-mail: szepesi.viktor@protonmail.com

Bevezetés

Ukrajna jelenlegi helyzetében az aknamentesítés technológiai és szervezeti megoldásai kulcsszerepet játszanak. A humanitárius mentesítés nem csupán emberi életek megóvását szolgálja, hanem az ország gazdasági újraindításának, területi integritásának és társadalmi stabilitásának is alapfeltétele. Az ukrán mezőgazdasági szektor, amely a globális gabonakereskedelem egyik meghatározó szereplője, különösen érzékeny a termőföldek aknaveszélyére.

A probléma nem tekinthető elszigeteltnek: az ukrainai aknaszennyezés kérdése szorosan összefonódik a globális geopolitikai és biztonságpolitikai folyamatokkal.

A helyzet súlyosságát jól jelzi, hogy Ukrajna területének több tízezer négyzetkilométere minősül jelenleg potenciálisan aknával szennyezett zónának. A mentesítés nemcsak pénzügyi és technikai kihívás, hanem komoly logisztikai és emberi erőforrásokat igénylő feladat is. Egyes becslések szerint az ország teljes megtisztítása – a jelenlegi tempóval – több évtizedet vehet igénybe. Ebben a kontextusban felértékelődik a modern technológiák szerepe: a gépesített aknamentesítő járművek, a szenzoralapú és robotrendszerek, valamint az új típusú detektálási eljárások számottevően képesek lehetnek gyorsítani és biztonságosabbá tenni a folyamatot.

A humanitárius aknamentesítés tehát nem csupán technikai feladat, hanem politikai és stratégiai jelentőségű kérdés. Megfelelő koordinációval, folyamatos nemzetközi együttműködéssel és a legkorszerűbb technológiai megoldások alkalmazásával valós esély mutatkozik arra, hogy Ukrajna a következő évtizedek során lépésről lépésre visszaszerezze lakható és biztonságosan hasznosítható területeit.

A modern aknahadviselés és az orosz–ukrán konfliktusban alkalmazott aknák

A modern aknahadviselés kialakulása szorosan összefügg a 20. század elejének technikai fejlődésével és a hadviselés iparosodásával. Bár az aknák előzményei – például puskaporos taposócsapdák – már korábban is ismertek voltak, az első világháború hozta el azt a léptéket és rendszerszintű alkalmazást, amely megalapozta a későbbi aknafejlesztések irányát. A lövészárok-harcászat állóháborús viszonyai között az aknák egyik elsődleges szerepe a csapatmozgások korlátozása, a védvonalak megerősítése lett.

A háború technikai csúcspontját a világ első harckocsijának megjelenése jelentette: a brit hadsereg 1916 szeptemberében vetette be először a Mark I nevű lánctalpas páncélozott járművet a somme-i csatában (1. ábra). A harckocsi – amelyet eredetileg azzal a céllal terveztek, hogy áttörje a lövészárokat és leküzdje a géppuskaállásokat – új fejezetet nyitott a haditechnika történetében. Bár a korai típusok nehézkesek és technikailag megbízhatatlanok voltak, a Mark I és utódai egyértelműen jelezték: a hadszíntér háromdimenzióssá válik, ahol a mobilitás és a páncélvédelem stratégiai előnyt jelent.



1. ábra: A brit Mark I harckocsi a somme-i csatában

Forrás: IWM 2024

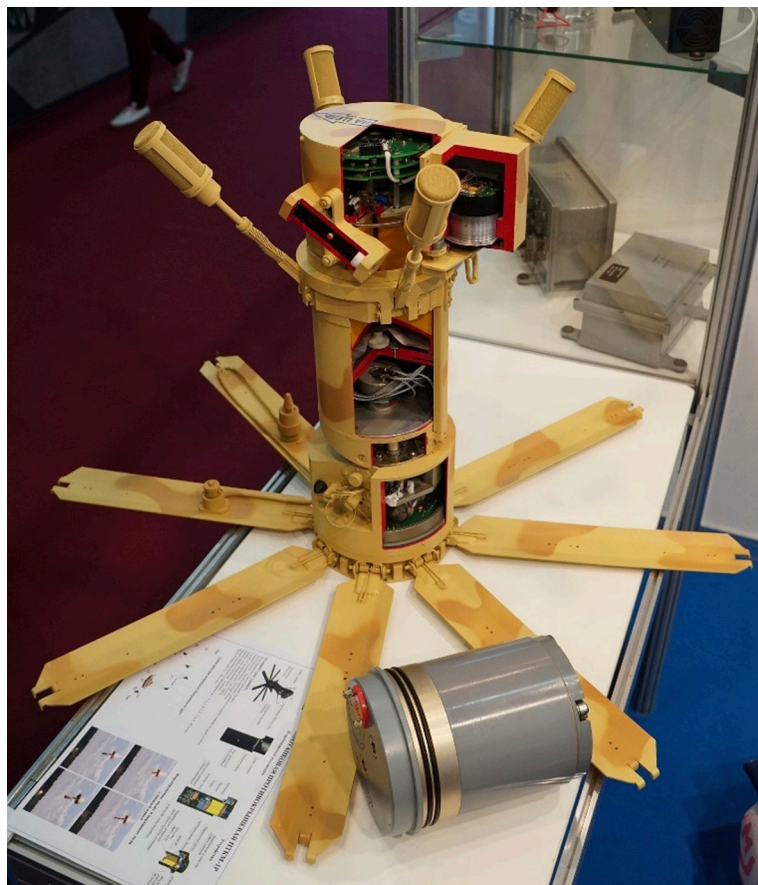
Az első tankok megjelenésére adott válaszként alakultak ki a kifejezetten harckocsiellenes aknák. Míg az első világháborúban még csak rögtönzött, robbanóanyaggal töltött gödröket és primitív nyomásérzékelő szerkezeteket használtak a páncélos járművek ellen, a második világháborúra már szabványosított páncéltörő aknák jelentek meg. A német Tellermine sorozat (például Tellermine 29, 42) és a szovjet TM–35 az akkori harckocsik lánctalpaira és alvázára céloztak, nagy robbanótöltetükkel súlyos károsodást vagy teljes megsemmisítést okozva.

A hidegháború idején az aknák technológiája tovább fejlődött. Megjelentek a távtelepítésű aknamezők, valamint a szenzoros, célfelismerésre képes eszközök, mint az amerikai M15 vagy a szovjet TM–62 variánsai. Ezek már nemcsak nyomásra, hanem mágneses vagy szeizmikus jelekre is reagáltak, és célzottan a harckocsik mozgását voltak hivatottak akadályozni.²

A 21. századi konfliktusokban, így az orosz–ukrán háborúban is új generációs harckocsiellenes aknák jelentek meg. Különösen figyelemre méltó az orosz PTKM–1R típus: intelligens, torony elleni irányított akna (2. ábra). A szerkezet érzékeli a közeledő páncélozott járművek hangját és rezgését, majd ballisztikus pályán robbanófejet lő ki, amely robbanással formált lövedékkel támadja a jármű torony részét – jellemzően ott a leggyengébb a páncélvédelem. Ez a fejlesztés már egyértelműen a precíziós hatású eszköz kategóriájába esik.³

² Lukács 2024: 25–53.

³ Rosoboronexport [é. n.].



2. ábra: Az orosz fejlesztésű PTKM-1R akna
Forrás: LEE 2021

A konfliktus során használt másik gyakori típus a többféle érzékelővel is ellátható, klasszikus TM-62M. Ez a fémházas akna képes harckocsi láncfalainak vagy alvázának megbontására, miközben olcsón és nagy számban telepíthető. A korábbi típusokkal ellentétben ezek egy része nehezen detektálható, vagy kifejezetten műanyag burkolattal készül a fémkeresők kijátszása érdekében.⁴

Az aknák tehát nem csupán statikus védekező eszközök: fejlődésük szorosan követte a haditechnika más területein – különösen a páncélozott járművek fejlesztésében – bekövetkező változásokat. A modern harckocsik, mint például a T-90 vagy a Leopard 2, már aktív védelmi rendszerekkel is rendelkeznek, amelyek képesek lehetnek egyes aknaindításokat vagy indított lövedékeket észlelni és semlegesíteni. Az aknaharc azonban ennek ellenére is hatékony

⁴ CAT-UXO [é. n.].

eszköz maradt: nem csupán fizikai kárt okoz, hanem mozgásra kényszeríti, megállítja vagy átirányítja az ellenséges járműveket – stratégiai szempontból ez a funkció gyakran fontosabb, mint maga a pusztítás.

A modern aknák sokfélesége jól tükrözi, hogy ezek az eszközök mennyire alkalmazkodtak a különböző harcászati célokhoz és környezetekhez. A korábban bemutatott példák mellett érdemes kiemelni további két jelentős típust gyalogság elleni, illetve harckocsi elleni kategóriában is.

A gyalogsági aknák között kiemelkedik a szovjet eredetű OZM–52 ugró repeszakna. Ez a típus a földbe süllyesztve várja az aktiválást – rendszerint botlódrót által –, majd a robbanás előtt 1-1,5 m magasba ugrik, ahol a repeszrobbanás hatékonysága sokszorosára nő. Különösen nagy veszélyt jelent sűrű növényzetben és városi környezetben, ahol nehezebb észlelni és semlegesíteni.

Szintén említésre méltó a POMZ–2M, egy botlódrótos, fix telepítésű repeszakna, amelyet gyakran erdős vagy épített területeken helyeznek el. A kis töltetű, de körkörös repeszhatású eszköz célja nem feltétlenül a végzetes sérülés okozása, hanem a csapatmozgás akadályozása és a morál rombolása.

A harckocsi elleni aknák palettáján a TM–62M egy klasszikus, tömegesen alkalmazott, többféle gyújtószerkezettel ellátható típus. Fémburkolata, magas robbanóanyag-tartalma és egyszerű kezelhetősége miatt máig széles körben használják mind kézi, mind gépesített telepítéssel.

A másik kiemelt példa a német AT–2, a szórva telepíthető, kumulatív töltetű harckocsi elleni akna tüzéségi rakéták vagy aknatelepítő rendszerek révén juttatható célba. Az „érítődrótos” gyújtószerkezet és mágneses érzékelő együttesen biztosítják, hogy a jármű alá kerülve aktiválódjon, és a páncél leggyengébb pontját célozza.

Humanitárius aknamentesítés

A humanitárius aknamentesítés elsődleges célja az emberi élet védelme, valamint a lakosság biztonságos mozgásának és a gazdasági tevékenységek újraindításának biztosítása. A gyalogság elleni aknák és más háborús robbanóeszköz-maradványok (ERW/UXO)⁵ gyakran évtizedekkel a konfliktusok lezárulta után is súlyos fenyegetést jelentenek. A probléma súlyosságára reagálva született meg az 1997-es ottawai egyezmény, amely tilalmozza a gyalogsági aknák alkalmazását, gyártását, készletezését és kereskedelmét. Az egyezmény értelmében a csatlakozó államok vállalták a meglévő készleteik megsemmisítését, valamint a már telepített aknák feltérképezését és felszámolását.⁶

A hatékony és biztonságos mentesítési tevékenység szabályozását az ENSZ által kidolgozott IMAS (International Mine Action Standards) szabványrendszer biztosítja, amely nemcsak az operatív eljárásokat, hanem a minőségbiztosítást, a képzést, a biztonsági protokollokat és az információkezelést is részletesen szabályozza. Az IMAS egyúttal lehetőséget ad

⁵ *Explosive remnants of war/unexploded ordnances.*

⁶ KREJSA 2004.

a tagországoknak nemzeti szabványok kidolgozására is, és támogatja a mentesítési programok egységes végrehajtását.



3. ábra: Gyakorlati vizsgán az FSD leendő aknamentesítői

Forrás: FSD 2024

A mentesítés folyamata több, egymásra épülő szakaszból áll (3. ábra). Első lépés a nem műszaki felmérés (NTS⁷), amely térképekre, katonai jelentésekre, civil bejelentésekre és helyszíni megfigyelésekre támaszkodva határozza meg a feltételezetten szennyezett területeket (SHA⁸). Az NTS célja a veszélyes zónák behatárolása, valamint az információk összegyűjtése és dokumentálása annak érdekében, hogy megalapozott döntések születhessenek a további műszaki beavatkozás szükségességéről. Ezt követi a műszaki felmérés (TS⁹), amely során műszeres mérések¹⁰ – például fémdetektorok, talajradarok, kutyás egységek¹¹ – segítségével pontosítják a szennyezés mértékét és kiterjedését. A célzott TS előnyben részesül az általános, rendszerszintű megközelítéssel szemben, mivel így a veszélyes területek határai pontosabban meghatározhatók, és elkerülhető a felesleges mentesítés. A TS során gyűjtött információ visszacsatolható a korábbi szakaszokhoz, és folyamatosan alakíthatja a teljes műveleti tervet.

⁷ NTS – non technical survey.

⁸ SHA – suspected hazardous area.

⁹ TS – technical survey.

¹⁰ DARUKA–KOVÁCS–EMBER 2024.

¹¹ DARUKA–CSURGÓ 2017.

A területfelszabadítás (*land release*) csak akkor kezdődhet meg, ha megbízható adatok állnak rendelkezésre az aknák vagy egyéb robbanóeszközök jelenlétéről. Ennek célja, hogy kizárólag olyan zónákat mentesítsenek, amelyek valóban veszélyt jelentenek, így optimalizálva az erőforrás-felhasználást.¹²

A mentesítési műveletekhez három alapvető technológiai megoldás áll rendelkezésre:

1. Kézi fémkeresők – olcsók, széles körben elérhetőek, de fémmentes vagy alacsony fémtartalmú aknák esetén nem hatékonyak.
2. Talajradarok (GPR) – képesek érzékelni a nem fémtartalmú vagy sekélyen elhelyezett eszközöket, bár hatékonyságuk bizonyos talajtípusokban – például nedves agyagban – jelentősen csökkenhet.
3. Elektromos impedancia tomográfia (EIT) – újabb technológia; ígéretes lehetőségként jelenik meg a fémmentes robbanószerkezetek detektálásában. Hátránya, hogy érzékeny a talajnedvességre és a kontaktus minőségére.

A jövőben további áttörést hozhatnak az autonóm robotrendszerek, a mesterséges intelligencia által támogatott érzékelés, valamint a gépi tanulás segítségével végzett adatértelmezés. Ezek a technológiák nem csupán a felderítés gyorsaságát növelhetik, hanem csökkenthetik a humán erőforrások kitettségét is veszélyes környezetben. Végül, a humanitárius aknamentesítés nem kizárólag technikai művelet, hanem összetett társadalmi és intézményi kihívás is, amelynek sikeressége nagymértékben függ a nemzetközi együttműködéstől, a politikai stabilitástól és a helyi lakosság aktív bevonásától.

Ukrajna területének aknamentesítése

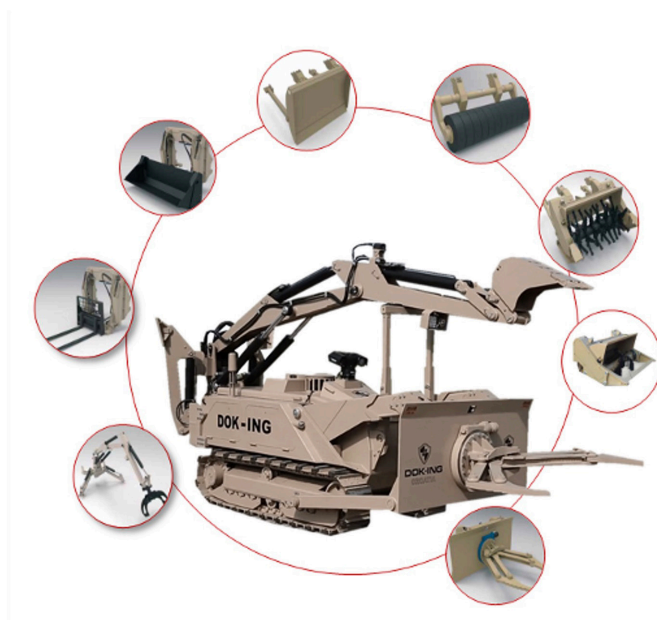
Ukrajna a 2022-ben eszkalálódó háború óta a világ egyik legnagyobb mértékben elaknásított országa. A 2024-es Ukraine Mine Action Conference adatai szerint mintegy 174 000 km² földterületet érint potenciálisan valamilyen típusú akna vagy fel nem robbant robbanóeszköz (UXO), ami az ország területének közel egyharmadát teszi ki. A szennyezett zónák nemcsak katonai jelentőségűek, hanem a mezőgazdasági, ipari, lakó- és természetvédelmi területeket is érintik, súlyos humanitárius és ökológiai következményeket vonva maguk után. Az aknamentesítési feladatok mérete és komplexitása példátlan Európában. Ennek kezelése érdekében Ukrajna tízéves határidő-hosszabbítást kapott az ottawai egyezmény 5. cikke szerinti kötelezettségek teljesítésére, így a teljes humanitárius mentesítés jogi határideje jelen állás szerint 2033. december 1. Ez a haladék azonban nem jelenti a probléma elodázását, sokkal inkább elismeri annak fizikai és szervezeti realitásait. 2023-ban az ukrán hatóságok több mint 40 szervezetet akkreditáltak, amelyek közvetlenül vesznek részt az aknamentesítési feladatok végrehajtásában. Ezek között nemcsak állami és katonai szervek (például SESU, Ukrán Fegyveres Erők, Nemzeti Gárda), hanem nemzetközi szervezetek is szerepelnek, köztük a HALO Trust, a GICHD, az FSD, a MAG és a Norwegian People's Aid. A nemzetközi támogatás volumene 2024-re meghaladta az 1,07 milliárd amerikai dollárt, és olyan államok járultak

¹² GICHD 2008.

hozzá, mint az Egyesült Államok, Norvégia, Hollandia, Svájc, Kanada vagy Luxemburg. E támogatások részben technikai berendezésekben (például aknamentesítő gépek), részben pénzügyi és képzési formában érkeztek. A svájci kormány például három darab GCS-200 típusú aknamentesítő gépet bocsátott Ukrajna rendelkezésére, míg a HALO Trust több régióban végzett műszaki felméréseket. Ugyanakkor az operatív nehézségek súlyosak. A 2023. júniusi kahovkai gátrobbantás következtében elárasztott területeken a víz több ezer aknát mosott el, és ezek pontos helye ismeretlen, ami újratemti a szennyezés földrajzi kockázatát. A HALO Trust például csak 2022 májusának végén tudta újraindítani a munkát a megszállt területekről való visszavonulás után.

A mentesítési folyamatban a gépesített aknamentesítő eszközök központi szerepet játszanak. Ezek alkalmazása gyorsítja a munkavégzést, és csökkenti az emberi személyzet közvetlen veszélyeztetettségét.¹³

DOK-ING MV-4



4. ábra: DOK-ING MV-4 típusú aknamentesítő

Forrás: DOK-ING 2023

A horvát fejlesztésű MV-4 könnyű lánctalpas robot városi és domborzatban tagolt környezetben egyaránt bevethető (4. ábra). A gép fő munkaszerkezete flail rendszerű, amely 34 darab láncolt kalapácsból áll. A kalapácsok forgási sebessége 350–390 fordulat/perc,

¹³ GICHD 2008; BAKER 2024; Human Rights Watch 2023.

munkamélysége pedig eléri a 24–32 cm-t. A rendszer képes akár 5 kg TNT-nek megfelelő robbanóanyagot semlegesíteni, miközben a kezelő biztonságos távolságból irányítja a járművet.

2023 végéig az MV-4-típusú gépekkel több mint 12 millió m² területet mentesítettek Ukrajnában, és több ezer robbanótestet hatástalanítottak. A gép előnye, hogy gyorsan mozgósítható, joystickkal vezérelhető, és Hardox páncélzatának köszönhetően túléli a robbanásokat anélkül, hogy károsodna.¹⁴

ScanJack 3500



5. ábra: ScanJack 3500 típusú aknamentesítő
Forrás: ScanJack [é. n.]

A svéd fejlesztésű ScanJack 3500 egy mélyakna-mentesítésre specializált nehézgép, amelyet a finn John Deere 1710D erdészeti jármű alapjaira építettek (5. ábra). Tömege közel 40 t, munkaszélessége 2,5 m, a láncos rotoros rendszer akár 40 cm mélyen fekvő eszközöket is képes semlegesíteni. A meghajtásról egy 215 LE hathengeres dízelmotor gondoskodik, amelyet egy Scania V8 motor egészít ki. A gép óránként 60–80 l gázolajat fogyaszt, és páncélozott fülkéje védi a kezelőt az esetleges robbanásoktól.

¹⁴ DOK-ING 2023.

A svéd kormány 2023-ban adományozta az első példányokat Ukrajnának, válaszul a mélyen fekvő harcokcsellenes aknák eltávolításához szükséges technológia hiányára. A ScanJack 3500 alkalmazásával főként sík, laza vagy agyagos talajokon dolgoznak, ahol hagyományos módszerekkel nem lehetne biztonságosan mentesíteni.¹⁵

Összefoglalás

A modern aknahadviselés fejlődése, a humanitárius aknamentesítés nemzetközi rendszere és Ukrajna jelenlegi helyzete összetett, egymásra épülő összefüggésrendszert alkotnak. A gyalogsági és harcokcsell elleni aknák történeti és technológiai fejlődése megmutatta, hogy ezek az eszközök nem csupán harctéri felhasználásra alkalmasak, hanem hosszú távon is mély társadalmi, gazdasági és környezeti hatásokat generálnak. A haditechnika iparosodásával párhuzamosan az aknák egyre precízebbek, ugyanakkor nehezebben detektálhatók lettek, így a konfliktusok után is tartós fenyegetést jelentenek a civil lakosságra nézve.

A humanitárius aknamentesítés az elmúlt évtizedekben önálló, szabványosított tevékenységgé vált, amelyet az ENSZ által kidolgozott IMAS szabványrendszer, valamint az ottawai egyezmény előírásai szabályoznak. A mentesítési folyamat lépései – nem műszaki és műszaki felmérés, területfelszabadítás, minőségbiztosítás – mind a nemzetközi protokollokhoz illeszkednek, de alkalmazásuk gyakran helyspecifikus nehézségekbe ütközik. A technológiai háttér folyamatosan fejlődik: az elektromos impedancia tomográfia, a GPR, a drónalapú felmérés és a mesterséges intelligencia mind új lehetőségeket nyitnak meg a hatékonyság növelése irányába.

Ukrajna esete különösen összetett, hiszen itt egy jelenleg is zajló konfliktus során keletkezett szennyezésről van szó, amelynek kiterjedése és típusösszetétele is rendkívül változatos. A több tízezer négyzetkilométernyi fertőzött terület nemcsak a mezőgazdaságot bénítja meg, hanem akadályozza a lakosság visszatelepülését, az infrastruktúra újjáépítését és az ökoszisztémák regenerációját. A rekonstrukciós munkák egyik legfőbb feltétele éppen az aknamentesítés, amely nem valósulhat meg nemzetközi támogatás és technológiai innováció nélkül.

A hatékonyság és fenntarthatóság érdekében a jövőben fokozott figyelmet kell fordítani a helyi kapacitásépítésre: a helyi közösségek, szakemberek, önkéntesek képzése és bevonása a folyamatba éppoly fontos, mint a gépek rendelkezésre állása. Emellett a magánszektor megjelenése újabb lehetőségeket, ugyanakkor szabályozási kockázatokat is magában hordoz. Az ukrajnai korrupciós gyakorlatok miatt külön figyelmet érdemel az átláthatóság és a forrásfelhasználás nyomon követése is.

Az aknamentesítés jövője nem csupán technológiai kérdés. Egyúttal politikai akarat, intézményi stabilitás és nemzetközi szolidaritás függvénye is. A stratégiai cél nemcsak a fizikai fenyegetettség csökkentése, hanem a bizalom újjáépítése és a háború utáni társadalmi konszolidáció elősegítése. Az emberi tényező – a helyi lakosság tudatossága, a túlélők rehabilitációja, a gyermekek oktatása – kulcsszerepet játszik abban, hogy az aknamentesítés ne csupán technikai projekt, hanem hosszú távon is fenntartható társadalmi újrakezdeményezése legyen.

¹⁵ ScanJack [é. n.].

Felhasznált irodalom

- BAKER, Sinéad (2023): Ukrainian Soldier Says They Find Bodies of Dead Russian Soldiers Booby-Trapped. *Business Insider*, 2023. szeptember 25. Online: <https://www.businessinsider.com/ukraine-soldier-say-find-bodies-dead-russia-soldiers-booby-trapped-2023-9>
- CAT-UXO [é. n.]: *TM-62M Landmine*. Online: <https://cat-uxo.com/explosive-hazards/landmines/tm-62m-landmine>
- DARUKA, Norbert – CSURGÓ, Attila (2017): The Use of Animals in Military Operations. In BEŇOVSKÝ, M. (szerk.): *Trhacia technika 2017. Zborník prednášok z 29. medzinárodnej konferencie na počesť 390. výročia prvého použitia výbušnín na svete v podzemí*. Banská Bystrica: Slovenska spoločnosť pre trhacie a vrtacie práce, 32–43.
- DARUKA, Norbert – KOVÁCS, Zoltán – EMBER, István (2024): Using Search Tools to Detect Military and Improvised Explosive Devices. In *Trhacia Technika 2024*. Banská Bystrica: Slovenská spoločnosť pre trhacie a vrtacie práce Prezídium spoločnosti, 15–32.
- DOK-ING (2023): *MV-4*. Online: <https://dok-ing.hr/defence-security/mv-4/>
- FSD (Fondation Suisse de Déminage) (2024): *Ukraine – Humanitarian Mine Action Operations*. Online: <https://fsd.ch/en/operations/ukraine/>
- GICHD (Geneva International Centre for Humanitarian Demining) (2008): *Implementation of CCW Protocol V on Explosive Remnants of War – Background and Status*. Online: <https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Publications/CCW-Protocol-V-2008.pdf>
- Human Rights Watch (2023): *Ukraine: Banned Landmines Harm Civilians*. Online: <https://www.hrw.org/news/2023/06/13/landmine-use-ukraine>
- IWM (Imperial War Museums) (2024): *The Battle of the Somme, July–November 1916*. Online: <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/205078852>
- KREJSA, P. (2004): *EC Project for the Destruction of PFM-1 Stockpiles in Ukraine*. Standing Committees Meetings, Stockpile Destruction, Geneva, 2004. február 12. Online: https://old.apminebanconvention.org/fileadmin/APMBC/IWP/SC_feb04/speeches_sd/EC_12Feb04_text.pdf
- LEE, Rob (2021): Twitter-bejegyzés, 2021. március 6. Online: <https://x.com/RALee85/status/1379580121003220994/photo/1>
- LUKÁCS László (2024): Szemelvények a hagyományos szárazföldi aknák fejlődésének történetéből. In *III. Fúrás – Robbantástechnika Nemzetközi Szimpózium 2024 – Szimpózium kiadvány*. Magyar Robbantástechnikai Egyesület, 10–56. Online: <https://mhht.eu/bazisadatok/TUDASTAR/III.FURASROBBANTASTECHNIKA.pdf>
- ScanJack [é. n.]: *ScanJack – Deep Demining Solutions*. Online: http://scanjack.com/en/?page_id=300
- Rosoboronexport [é. n.]: *Russian Defence Export – PTKM-1R*. Online: <https://roe.ru/en/production/land-forces/engineer-equipment/ptkm-1r/>

Kardos Gergely¹ 

Kémények robbantásos bontása beépített környezetben

Demolition of Chimneys in Built Up Environments Using Blasting Technology

A kémények robbantásos bontása viszonylag jól kutatott és tapasztalatok alapján körülírt tudomány, amely ennek ellenére a gyakorlatban sok veszélyt hordozhat magában, különösen, ha az a kémény, épület beépített környezetben (lakóingatlanokhoz közel) helyezkedik el. Az ipari robbantástechnika egy olyan ágazatát szeretném bemutatni, amellyel ma Magyarországon kevés kellő tapasztalattal rendelkező szakember foglalkozik. Szót ejtek a robbantás biztonsági kérdéseiről (szeizmikus hatás, repeszhatás, léglökés), amelyeket a tervezésnél kötelező vizsgálni, hiszen jogszabály írja elő. Targyalni fogom, hogy a közműegyeztetés miért fontos (amellett, hogy kötelező) eleme a tervezésnek-engedélyeztetésnek, hiszen a különböző szolgáltatók akár meg is tagadhatják a robbantásos bontást. Egy konkrét feladatot fogok ismertetni, hogy a megkereséstől milyen úton lehet eljutni odáig, hogy a bányafelügyelet a részünkre robbanóanyag-felhasználási engedélyt adjon, és elvégezhesük a kitűzött feladatot. Részletesen ismertetem a terepi munka mozzanatait, képekkel dokumentálva.

Kulcsszavak: ipari robbantástechnika, kéményrobbantás

The blasting of chimneys is a relatively well-researched and experience-based area, which nevertheless can carry many dangers, especially if the chimney or building is located in a built-up environment (close to residential properties). I would like to introduce a branch of industrial blasting technology that few experienced professionals deal with in Hungary today. I will show the safety issues of blasting (seismic effects, shrapnel effects, air blast), which are mandatory to examine during planning, as required by law. I will discuss why public utility coordination is an important (in addition to being mandatory) element of planning and permitting, since various service providers may even refuse blasting. I will describe a specific task to illustrate the process

¹ Robbantástechnikai szakmérnök, okleveles bánya- és geotechnika-mérnök, e-mail: kardos_gergely@yahoo.com

from the initial request to the point where the Mining Authority issues us a permission to use explosives, allowing us to carry out the assigned task. I will describe in detail the moments of the fieldwork, documented with pictures.

Keywords: industrial blasting technology, chimney blasting

Bevezetés

Mindenekelőtt fontos tisztázni pár alapfogalmat: mit értünk robbanás alatt, mit nevezhetünk robbanóanyagnak. Robbanóanyagnak nevezhetjük azt az anyagot, amely adott körülmények között és feltételek mellett robbanásra képes. A robbanás jellege szerint megkülönböztethetünk fizikai, kémiai, atommag-átalakulás jellegű robbanást.

Robbantási alapismeretek

Robbantástechnikában a kémiai jellegű robbanás hatásait használjuk fel a különböző feladatok elvégzésére. A továbbiakban tárgyalt fogalmak a kémiai jellegű robbanásra vonatkoznak. Kémiai robbanás során a robbanóanyaggal az aktiválási energiáját meghaladó energiát közlünk, aminek hatására az elindított folyamat során számottevő energia szabadul fel, amely elegendő az egész anyag aktiválásához (önfenntartó). Robbanóanyag robbanásakor nagy mennyiségű hő szabadul fel, gázok képződnek nagy sebességgel, önmagától tovaterjedő – önfenntartó – kémiai folyamat. Jellegzetességei: exoterm folyamat (jelentős mértékű hőképződés); gázképződés (nagy mennyiségű); nagy a reakciósebesség; önmagától tovaterjedő folyamat (külső energiabevitelt nem igényel), kémiai átalakulás megy végbe. Átalakulási sebesség szerint lehet: deflagráció ($v < 350$ m/s), robbanás ($350 < v < 4000$ m/s), detonáció ($v > 4000$ m/s).

Robbanás során a következő hatásjellemzők jelentkeznek a környezetben: lökőhullám, rezeshatás (elsődleges – fragment, másodlagos – debris), hőhatás, szeizmikus hatás, emberi szervezet sérülésének mértéke, földfelszíni és föld alatti képződmények károsodása, roncsolódása, mérgező gázok-gőzök keletkezése, mérgező szilárd/folyékony anyagok keletkezése. Robbantás során a hirtelen felszabaduló energia kisebb része kőzetbontásra, roncsolásra, aprításra fordítódik, a felszabaduló energia további része pedig a környezet káros igénybevételére. Robbantásos kéménybontásnál az a cél, hogy a kéményben olyan felületet – éket – robbantsunk ki, amelynek hatására a kémény súlypontja annak alapterületén kívülre kerüljön, és ennek következtében a kijelölt irányban eldőljön. A célunk robbantási munkák során az, hogy a káros energiák mértékét a lehető legjobban minimalizáljuk.

$$E_k = E_{ll} + E_{sz} + E_r,$$

ahol: E_{ll} a léglökés, E_{sz} a szeizmikus hatás, E_r a rezeshatás, illetve a káros hatás.

A negatív hatások között is különbséget tudnunk tenni, hiszen lehetnek olyanok, amelyek mindig, illetve olyanok, amelyek csak rendellenes robbantáskor jelentkeznek, keletkeznek.

Rendellenes robbantáskor jelentkező negatív hatás a töltetmegállás. Előidézője lehet robbanóanyag-hiba, gyutacshiba, vezetékhiba, elégtelen iniciálás, illetve a detonáció leállása.

A mai modern, korszerű gyártás- és minőségellenőrzött robbanóanyagok esetében nagyon kis eséllyel fordul elő, hogy robbanóanyag-hiba okozza a töltetmegállást. Töltés során a robbantásvezető, robbantómester feladata, hogy a töltetmegállást előidéző körülményeket csökkentse, minimalizálja.

Robbanóanyagok esetében beszélhetünk az úgynevezett detonációátadásról, amely fogalom alatt azt értjük, hogy mekkora az a maximális távolság, amely még elegendő ahhoz, hogy az egyik töltetről a másikra átadódjon a detonáció, és így a teljes töltetoszlop felrobbanjon.

A töltés során figyelni kell arra, hogy az indítótöltet elhelyezése során ne sodorjon magával a lyuk faláról törmelékdarabot. Az esetlegesen besodort darab okozhatja, hogy az indítótöltet felrobban, de a detonáció nem adódik át a mögötte lévő töltetre, hiszen ebben az esetben a detonációs átadási távolság már nem megfelelő. Épületrobbantások során a falvastagságokból adódóan nem jellemző, hogy egy lyukba az indítótölteten kívül még másik töltetet is el kell helyezni.²

A robbantás során káros igénybevételek lépnek fel. Ezek az esetek döntő többségében a léglökés, a repeszhatás és a szeizmikus hatás.

A robbantás során törekedni kell, hogy a robbanóanyag robbanásakor létrejövő gázok hasznos munkát végezzenek, és az adott építőanyagban (tégla, beton) lévő repedéseket tovább nyissák, ugyanakkor arra is nagy hangsúlyt kell fektetni, hogy a munka elvégzésére kis gáztérfogatú robbanóanyagot használjunk, hogy a robbantás során pont annyi gáz szabaduljon fel, amennyi a roncsolás végrehajtására elegendő. Amennyiben nagy gáztérfogatú robbanóanyagot használunk, a keletkező többletgázmennyiség a káros igénybevételre fog fordítódni (repszek elhajítása). Kivételt képez, ha a kéményt nagyszilárdságú, lyukacsos téglából építették. Ebben az esetben kifejezetten célszerű nagy fajlagos gáztérfogatú robbanóanyagot használni.³

Léglökés, repeszhatás, szeizmikus hatás

A fent leírtak szerint minden robbantásos munkánál számolni kell káros hatásokkal. Dolgozatomban csupán az épületrobbantásra vonatkozó részeket tárgyalom, a kőbányászati robbantások ide vonatkozó részeit nem.

Robbantások tervezésénél az irányadó és alkalmazandó jogszabály a 27/2022. (I. 31.) SZT-FH rendelet (ÁRBSZ). Az ÁRBSZ-t 2024. szeptember 17-én frissítették, amely során a különböző biztonsági távolságok számítási metodikáját módosították, a szeizmikus biztonsági távolság megállapítására a nemzetközileg elfogadott, német DIN 4150-3 jelű szabványt emelték be.

² BOHUS–HORVÁTH–PAPP 1983; KARDOS 2016; BENEDEK et al. 1989; DARUKA 2011.

³ BOHUS–HORVÁTH–PAPP 1983; KARDOS 2016.

Léglökés

A robbanóanyag átalakulásakor felszabaduló energia hatékony felhasználásához elengedhetetlen, hogy a töltési teret (robbantólyuk) megfelelően lezárjuk, hiszen akkor a felszabaduló gázok energiája arra fordítódik, hogy a roncsolandó közeget megbontsa, azt tovább gyengítse.

Ökölszabályként elmondható, hogy a robbanóanyagok kémiai átalakulása során minden felrobbantott kg robbanóanyagból közel 1000 l (1 m³) gáz fejlődik. A robbantás nagyon gyorsan végbemenő folyamat (2000–8000 m/s). Az átalakulás során kitáguló gázok a helyben megtalálható légtömeget maguk előtt tolják, ennek köszönhetően a légellenállás mértéke emelkedik, az áttörhetetlen felületnek bizonyul, és lökéshullám keletkezik.

A kémiai átalakulás a robbanóanyag saját térfogatában lejátszódó folyamat. A lökéshullám mindaddig fennmarad, amíg a frontja mögötti átalakult térben oly mértékű a hullám terjedési sebessége, hogy e lökéshullámot utoléri. A gyorsan táguló termékek a szabadban feltorlasztják a robbantás környezetében található levegőt, amely levegő a tehetetlenségénél fogva ellenáll az így létrejövő elmozdításnak, felületnek a környezetben.

A fent leírtak alapján épület- és kőzetjövészti robbantásoknál a lyukak megfelelő fojtásáról gondoskodni kell, hiszen csak ekkor lehet sikeres az elvégzendő feladat.⁴

Repszhatás

Épületrobbantásnál minden esetben azzal kell számolnunk, hogy bizonyos méretű repesz fog képződni, hiszen a robbantás hatására létrejövő lökőhullám az építőanyagból (tégla, beton) bizonytalan méretű anyagdarabot fog leszakítani, elhajítani.

Építmények, műtárgyak robbantásos bontása során a várható repszhatás becslése nehézkes. Főként azért, mert minden robbantási feladat más mérnöki megoldást kíván meg. Építményrobbantások tervezője a robbantásvezető. Felelősségét fokozza, hogy az ilyen robbantásos feladatok során az esetlegesen létrejövő repszshajítási távolságon belül védendő létesítmények helyezkednek el. A robbantandó épületekről szinte sosem lelhető fel építési, kivitelezési terv, ami szintén nehezítő körülmény. Az épületrobbantás során létrejövő repsz oka abban rejlik, hogy a telepítésre kerülő lyukak sok esetben rövidek, aminek következtében a fojtás hossza is lerövidül(het). Főként kis keresztmetszetű épületszerkezeteknél képződhetnek, hiszen ilyenkor az előtét mértéke jelentősen lecsökken. Vastag, széles épületszerkezetek esetében (például gépalapok) akár még a repszvédelem is elhagyható, amennyiben a töltetek megfelelően méretezettek. A megfűrt és betöltött tartóoszlopokat, épületszerkezeteket védelemmel kell ellátni, hiszen ezek az elsődleges repszkepződési helyek. Másodlagos repszek is létrejöhetnek, amennyiben a robbantáskor felszabaduló repsz olyan tárgyba ütközik, amelynek a mozgási energiáját átadja, így az repül tovább.

Épületrobbantásnál repsz által okozott kár műszeres mérésére nincs szükség, hiszen a robbantás után az rögtön megfigyelhető, a kárt okozó repszdarab kézzel megfogható. Hibalehetőségek: túltöltés, kis előtét, fűrási pontatlanság, fojtás anyagának és méretének nem

⁴ BOHUS–HORVÁTH–PAPP 1983; KARDOS 2016; DARUKA 2011.

megfelelő kiválasztása, a roncsolandó szerkezet túl magasan helyezkedik el, fémszerkezetek esetében nem kumulatív töltet használata, nagy fajlagos gáztérfogatú robbanóanyag használata. A korábban ismertetett repeszvédelmi elveknek megfelelően a repeszhatást csökkenteni tudjuk úgy, hogy a fúrasi zónát a talajhoz a lehető legközelebb helyezzük el, figyelve arra, hogy a kivetési tölsér kifejlődéséhez szükséges tér rendelkezésre álljon. Robbantásos bontás során a veszélyes mértékű repeszhatás elkerülése érdekében olyan töltettömegekkel kell dolgozni, hogy csupán annyi energia szabaduljon fel, hogy az adott épületszerkezet roncsolása, majd kivetése bekövetkezzen, de a repeszt az előre kiépített repeszvédelem megfogja, azt ne rombolja le. A nemkívánatos repeszhatás ellen kétféleképpen lehet védekezni. Vagy a robbantandó épületnél kell a védelmet úgy kialakítani, hogy az elszabaduló repeszek a kijelölt biztonsági távolságon túl ne juthassanak, vagy a védendő tárgyat kell takarással védeni. Ha nagyobb felületet kell védelemmel ellátni, abban az esetben annak a költsége magasabb lesz, éppen ezért a robbantandó építményben található épületelemeket szokás letakarni, védelemmel ellátni. A repeszekkel munkát végeztetünk, a repesz mozgási energiáját átalakítjuk: nagy szilárdságú, merev anyagok (palló, OSB-lap) áttörésére, laza szerkezetű anyagok (homokzsák) tömörítésére, rugalmas anyagok (geotextília, gumiabroncs) megnyújtására. Abban az esetben működik jól a kiépített repeszvédelem, ha a felgyorsult repesz a védelembe behatolva nem jut ki, vagy továbbjutás esetén a mozgási energiáját veszélytelen mértékig lecsökkenti.⁵

Szeizmikus hatás

A szeizmikus hatás a robbantás helyétől kellő távolságra létrejövő rugalmas hullámok (amely hullámok rezgési sebessége kisebb, mint a kőzet kritikus rezgési sebessége). Ez a hatás a robbanóanyag általános munkájának a része. Kialakulásában felelős a robbanáskor felszabaduló nyomás, amely a detonációs sebesség négyzetével arányos. Így elmondható, hogy amennyiben a robbantás során stabil, nagy erejű detonációt hoznak létre, akkor jelentős nyomás lép fel a robbantólyuk falán, aminek következtében a szeizmikus hatás nagy lesz. Természetesen ez a folyamat kőzetjövészti robbantáskor jelentkezik, hiszen a robbantólyukak a kőzetben vannak kialakítva. Épület-, valamint kéményrobbantáskor nem elsősorban a robbantás által létrehozott szeizmikus hullámok a veszélyesek, hanem a leeső tömeg által kiváltott rezgések. A rezgések környezetre gyakorolt hatása nagymértékben függ: a terjedési sebességtől, amplitúdótól, frekvenciától, illetve a hatóidőtől, a védendő épület tulajdonságaitól (épület anyaga, alapozás minősége, épület önrezgésszáma, geometriai jellemzők).⁶

Téglaágyári kémény robbantásos bontása adott példán bemutatva

A munkát Kisdorog Község Önkormányzatának polgármestere rendelte meg, hiszen a kémény az önkormányzat területén volt megtalálható. A szomszédos telkek magántulajdont képeztek,

⁵ BOHUS–HORVÁTH–PAPP 1983; KARDOS 2016; BENEDEK et al. 1989; DARUKA 2011.

⁶ BOHUS–HORVÁTH–PAPP 1983; KARDOS 2016; BENEDEK et al. 1989; ÁRBSZ 2022.

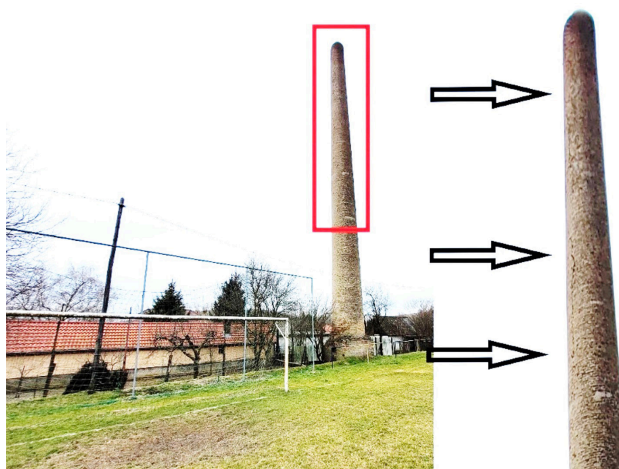
a kémény közvetlen környezetében épületek, illetve lakóingatlanok voltak megtalálhatók: a legközelebbi ingatlan, egy gazdasági épület, 7,36 m-re volt (1. ábra).



1. ábra: A kémény közvetlen környezete

Forrás: a szerző felvétele

A 2023-as esztendő nagy viharokkal indult, sokszor viharos erejű széllel. A kémény tetejéről meglazult téglá- és törmelékdarabok kezdtek hullani, veszélyeztetve a közelben fekvő ingatlanok, valamint a szomszédban található focipályán tartózkodó sportolók testi épségét. További kockázatot jelentett, hogy a kémény felső szakaszán függőleges repedések is megfigyelhetők voltak, amelyek a 2. ábrán látszódnak.



2. ábra: Repedések a kéményen

Forrás: a szerző felvétele

A lakók a polgármesterhez azzal a kérelemmel fordultak, hogy az önkormányzati tulajdonban lévő kéményt le kell bontani. Polgármester úr megkeresésére válaszolva, 2023. február 28-án tartottunk helyszíni bejárást, ahol megtekintettük a kéményt és annak környezetét. A későbbi tervezési folyamatokhoz szükséges méreteket felvettük: magasság, kerület, falvastagság. A kémény magassága ~24,0 m, kerülete a tervezett robbantási zónában 8,8 m, és 0,6 m falvastagságú kis méretű téglával falazott, amely szűkülő keresztmetszetű. A kémény belső béleléssel nem rendelkezett.

Robbantás tervezése

A munka a robbantás megtervezésével indul. Az első feladat, hogy elkészítsük a robbantásról szóló műszaki leírást, amely tartalmazza, hogy mekkora mennyiségű robbanóanyagot kívánunk felrobbantani, milyen irányba döntjük a kéményt, mekkora repesz- és szeizmikus hatásra kell számítani, illetve hogy ha valamely jogszabályi előírás alól szeretnénk felmentést (könnyítést) kérni, annak a megfelelően műszakilag alátámasztott indoklását.

Közműegyeztetés

A közműegyeztetés nagyon fontos; munkám során előfordult olyan eset, amikor a megrendelő egy épületet robbantással szeretett volna lebontani, viszont a közműegyeztetés során kiderült, hogy a robbantás szeizmikus biztonsági távolságán belül 1960-ban fektetett, stratégiaileg kiemelt jelentőségű szállító ivóvízvezeték húzódott, amely vezeték közcélú és a város ivóvízellátásában stratégiai szerepet játszik – a szolgáltató ennek tükrében nem járult hozzá az épület robbantásos bontásához.

Robbantásos épületbontásnál az engedélyeztetési eljárás megindításához szükséges dokumentumok, amelyeket a megrendelőtől tudunk beszerezni:

- hiteles térképmásolat az érintett ingatlanról, amelyen látható annak 150–200 m-es környezete;
- hiteles, friss tulajdoni lap;
- meghatalmazás a tulajdonostól a robbantásos bontáshoz;
- amennyiben rendelkezésre áll az épülethez kapcsolódó bármilyen terv, amelyből értékes információkhoz juthatunk.

A tulajdoni lapnak fontos szerepe van, hiszen ez alapján tudunk meggyőződni arról, hogy a bontandó építmény valójában kinek a tulajdonában áll.

A kémény döntése során a leesés pillanatában rezgések keletkeznek, ezek károsíthatják a közműveket. Általában a leeső tömeg okozta szeizmikus rezgési sebesség (egyenértékű tömeg, Q_e) nagyobb, mint az egy fokozatban felrobbanó töltet okozta szeizmikus hatás, így a továbbiakban ezzel a mennyiséggel kell számolni. Beépített környezetben közművek találhatóak a felszínen, illetve alatta, amelyekre hatással van a robbantás, akár a szeizmikus rezgések keltette negatív hatás, rosszabb esetben egy elszabaduló repesz okozta kár. A bányafelügyelet részére mellékelendő fontos dokumentum az e-közmű által hitelesített közműnyilatkozat,

amely tartalmazza az érintett közműkezelők nyilatkozatát, legyen az feltételekkel való megadás, vagy feltétel nélküli hozzájárulás.

A közműegyeztetés két lépcsőből áll. Az első, hogy tervezéstámogatást nyújtunk be az e-közmű területén, hogy a megfelelő díj megfizetése után hozzájussunk az általunk kijelölt poligon területén elhelyezkedő közművek vonalvezetéséhez. Amennyiben megvan a közművek elhelyezkedése, akkor egy hites bányamérő segítségével el tudjuk készíteni a robbantási tervtérképet, amely tartalmazza a robbantás és leérkezés helyét. A következő dolgokat szükséges még feltüntetni a tervtérképen: repeszhatás elleni biztonsági távolság, szeizmikus biztonsági távolság, robbantó állomás, őrhelyek, közművektől való távolság, érintett ingatlanoktól való távolság, térképészeti alap jellemzők: É-i irány, vetület, magassági rendszer, méretarány, tulajdonos neve, munkát végző neve, robbantásvezető neve és aláírása, hites bányamérő neve és aláírása, dátum. Az elkészített robbantási tervtérképet, műszaki leírást mellékelve tudjuk az e-közmű területén kérvényezni a közműegyeztetést, amely során a kijelölt területen belül lévő szolgáltatók értesítést kapnak, és nekik erre jogszabályban meghatározott időn belül válaszolniuk kell.⁷

A robbanóanyag-felhasználási engedély, előkészítési feladatok

A hiteles közműnyilatkozattal a birtokomban a bányafelügyelet részére be lehetett nyújtani a robbanóanyag-felhasználási engedély kérelmét. A bányafelügyelet részére az alábbi dokumentumokat, kérelmeket küldtük el: robbanóanyag-felhasználási engedély kérelem amely tartalmazta a felmentési kérelmet a repesztávolság csökkentésére; műszaki leírás; jogosultság igazolása (robbantásvezetői igazolvány); szolgáltatók hozzájáruló nyilatkozatai (e-közmű-nyilatkozat); Tolna Vármegyei Kormányhivatal hozzájáruló nyilatkozata (földmérési pont megszüntetése); tulajdoni lap; megbízás; tervezői nyilatkozat; hatósági erkölcsi bizonyítvány; robbantási tervtérkép. A bányafelügyelet részére elküldendő engedély tartalmi követelményeit a 28/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet a polgári felhasználású robbanóanyagok forgalmazásáról és felügyeletéről szóló jogszabály 2. melléklet 4. pontja tartalmazza. A robbanóanyag-felhasználási engedély kérelem igazgatási díját a 9/2022. (I. 28.) SZTFH rendelet 1. melléklet 4. pontjában (Polgári robbantási, robbanóanyag-forgalmazási tevékenység engedélyezésének díjai, egyes robbanóanyagok és tárgyak, illetve egyes anyagok besorolásának jóváhagyása) megtalálható táblázatból kell kikeresni a ránk vonatkozó kódnak megfelelően. Az épületrobbantások az „Egyedi robbanóanyag felhasználási engedély” kategóriába tartoznak. A jogszabály megkülönböztet: külterületre, illetve belterületre szóló engedélyt. Ebben a tulajdoni lap van segítségünkre, azon szerepel, hogy az adott helyrajzi szám hol található. A robbantás helyszíne Kisdorog belterület 350 hrsz. A táblázatból a D0160 kódszámú eljárási díjat (55 000 Ft) kell megfizetni a megadott bankszámlaszámra, közleményként fel kell tüntetni a kódszámot. Az ügymenet meggyorsítását szolgálja, ha a kérelmet úgy adjuk be, hogy a díj megfizetéséről szóló bizonylatot mellékeljük, hiszen a hatóság csak azután kezd neki az eljárásnak, miután meggyőződött az eljárási díj kiegyenlítéséről.⁸

⁷ KARDOS 2025; DARUKA 2011.

⁸ KARDOS 2025.

A robbantás kivitelezése

Birtokunkban volt az összes szükséges engedély, az előírt bejelentések megtörténtek. A robbantás 2023. május 24-ére volt kitűzve 12:00 és 15:00 között.

A robbantás napjának reggelén a munka a robbanóanyag-raktárban kezdődött a gyutacsok, kapcsolók és a robbanóanyag kivételezésével. A 28/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet előírása alapján a robbantásra vételezett robbanóanyag elektronikus beolvasását, a létrehozott fájl feltöltését a felhőbe elvégeztük. Az elektronikus nyomon követés mellett a papíralapú könyvelés továbbra is kötelező. A felhasználásra kivételezett robbanóanyagot a raktári könyvből lekönyvelte a robbantómester. A robbanóanyag helyszínre szállítása saját ADR gépkocsival történt. Felhasználásra kivételezett robbanóanyagok:

- 7,7 kg Emulinit 2,
- 2 db villamos gyutacs 0 ms,
- 40 db Nonel gyutacs – Bihnel MS 500 ms, 9 m,
- Nonel kapcsolók: 29 db Bihnel SL 17 ms, 1 db Bihnel SL 25 ms.

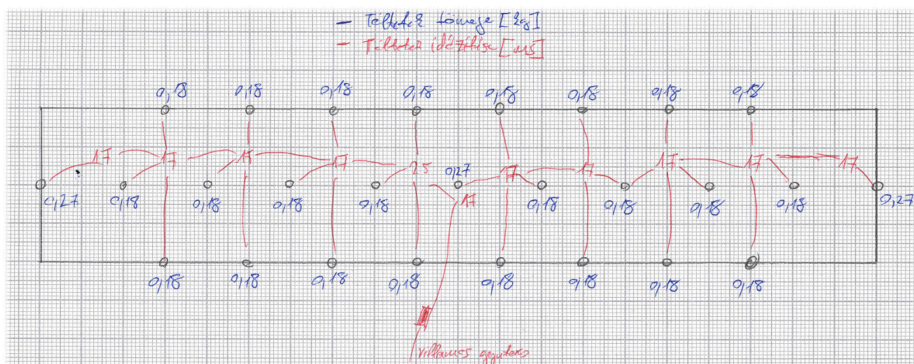
Az itt felsorolt robbanóanyagokat és gyutacsokat teljes egészében nem használtuk fel, azokat a robbantás után visszaszállítottuk a robbanóanyag-raktárba. A robbantási sáv középvonala döntés irányába került. A lyuktávolság 0,45 m, sortávolság 0,4 m. Kijelöltünk és lefűrtünk 27 db lyukat. A lyukak hosszúsága 0,40 m, átmérőjük 40 mm volt. Az alkalmazott töltény átmérője 32 mm, így az ÁRBSZ Építmények bontása robbantással, 57. pontban foglaltaknak megfelelően. A jogszabály kimondja, hogy a megtölteni kívánt robbantólyuk (töltési tér) átmérőjének legalább 4 mm-el nagyobbak kell lennie a robbantás során használt robbanóanyag átmérőjénél. A lyukak lemélyítését a felügyeletem és irányításom mellett végezték. A fúrás megkezdése előtt el kellett távolítani a kémény környezetéből a növényzetet, illetve az egyik ingatlan kerítését, amely a kéménynek csatlakozott. A kémény a terepszinttől a füstnyílás felett 4 téglasor magasságig négyzet alakú volt, körülbelül 20 sornyi téglá, ez után vált kör keresztmetszetűvé. Annak érdekében, hogy a robbantási sávot lejjebb tudjuk helyezni (minimalizálva az esetlegesen kijutó repeszeket), a négyzet szelvényt csökkenteni kellett, így 5 sornyi téglát el kellett távolítani, egészen a kör keresztmetszetig (3. ábra).



3. ábra: Téglák eltávolítva a robbantási sávnál

Forrás: a szerző felvétele

Kijelöltünk, majd lefúrtunk három sort. A középső sort a kémény kerületének feléig, az alsó és felső sort pedig a kerületének a kétharmadáig fúrtuk le. A lyukak mélységét folyamatosan ellenőriztem, hogy a tervnek megfelelő legyen minden. A töltés során átlagosan 0,18 kg robbanóanyagot használtunk, ez alól kivétel volt az indítólyuk, illetve a középső sor két szélén elhelyezkedő lyuk, amelyekbe egyenként 0,27 kg robbanóanyag került, így az összesen felhasznált robbanóanyag tömege 5,13 kg.



4. ábra: A töltetek időzítése és tömege

Forrás: a szerző szerkesztése

A lyukak időzítésére Nonel kapcsolókat használtunk, lyukanként időzítve. Az időzítés, illetve a betöltött töltetmennyiségek a 4. ábrán láthatók. A töltetek indítása lyuktalpról (fordított iniciálási mód) történt. A lyuktelepítés tényleges elrendezése az 5. ábrán figyelhető meg.



5. ábra: A betöltött, hálózatba kötött lyukak

Forrás: a szerző felvétele

A betöltött, lefojtott, hálózatba kötött lyukakat repeszvédelemmel láttuk el. A repeszvédelem rétegrendje a következő volt: légrés, 200 g/m² testsűrűségű, 2 m szélességű geotextília, drótháló, geotextília, drótháló. A robbantási zónával ellentétes oldalon lakóházak voltak, így a robbantási zóna túlsó felére egy plusz réteg 500 g/m² testsűrűségű geotextiliát helyeztünk el (6. ábra).



6. ábra: A megépített repeszvédelem

Forrás: a szerző felvétele

A robbantásra kész területet legutoljára a robbantómester hagyta el. Az ürítést 12:00-kor kezdtük meg. A töltés közben is sok helyi lakos érkezett a robbantást megnézni, így rájuk is figyelni kellett, hogy a biztonsági távolságon belülre ne jöjjenek be. A szomszédos ingatlanok tulajdonosait előzetesen tájékoztattam, hogyan viselkedjenek a robbantás alatt, így az ő ingatlanuk elhagyása gond nélkül megtörtént. A biztonsági távolság határára őrköt állítottunk fel, oda, ahonnan szándékosan vagy akaratlanul is be tudna jutni nemkívánatos személy. Miután az őrköt egyeztettem, a robbantóállomáson felállítottuk a rezgésmérő készüléket, majd az első jelet leadtam. A lakosságot hangosbemondón tájékoztattam, hogy milyen sorrendben fog történni a robbantás. Felhívtam a figyelmüket, hogy a kémény eldőlése után a robbantásvezető még a helyszínre megy megbizonyosodni arról, hogy minden gyutacs-kapcsoló-töltet felrobbant-e. A robbantás 2023. május 24-én 12 óra 55 perckor megtörtént (7. ábra). Miután szemrevételeztem, és megállapítottam, hogy minden töltet felrobbant, leadtam az utolsó – robbantás vége – jelzést, így a robbantásos munka terepi része befejeződött.⁹



7. ábra: A kémény dőlés közben – ahogy három részre törik
Forrás: a szerző felvétele

Az elvégzett robbantás értékelése, következtetések

Az évek óta együtt dolgozó robbantómestereknek, továbbá a szakszerű előkészítésnek köszönhetően a lyukak kijelölése, lefűrése, megtöltése és védelem kiépítése gond nélkül megtörtént,

⁹ KARDOS 2025.

a szükséges jelzések leadását követően a Kisdorog, 350 hrsz.-ú ingatlanon a volt téglagyári kéményt robbantással 2023. május 24-én, 12 óra 55 perckor lebontottuk. A robbantás rendben megtörtént, a kémény a kijelölt irányba dőlt, dőlés közben három részre törött. Személyi vagy anyagi sérülés, kár nem történt. A robbantás során ténylegesen felhasznált robbanóanyag-mennyiséget az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: *Robbanóanyag nyilvántartása*

Név	Vásárlás	Visszavétel	Felhasználás
Emulinit 2	7,7 kg	2,57 kg	5,13 kg
Villamos gyutacs	2 db	1 db	1 db
Nonel gyutacs	40 db	13 db	27 db
Nonel kapcsoló	30 db	19 db	11 db

Forrás: a szerző szerkesztése

A por elülte után a robbantás végét jelző jelzést nem adtuk le, hiszen ilyenkor a robbantómeszternek és a robbantásvezetőnek a helyszínt meg kell vizsgálnia, hogy minden robbantólyuk felrobbant-e, ott nem található-e megállt töltet, a kémény jó irányba dőlt-e, a robbantás során esetlegesen képződő repeszek nem okoztak-e kárt. A robbantás utáni felvételen (8. ábra) látszik, hogy az elhelyezett geotextília sértetlen maradt, az ingatlanok irányába repesz a robbantási zónát nem hagyta el.¹⁰



8. ábra: *Repszvédelem a robbantási sávval ellentétes oldalon*

Forrás: a szerző felvétele

¹⁰ KARDOS 2025.

A bemutatott robbantás újszerűségét a belterületi környezetben alkalmazott, többrétegű repeszvédelmi rendszer, valamint a repeszbiztonsági távolság csökkentésére irányuló, hatóságilag engedélyezett műszaki megoldások együttes alkalmazása adja. A módszer megfelelő előkészítés és hatósági egyeztetés mellett más, hasonló adottságú létesítmények esetében is alkalmazható.

A robbantás utáni befejező munkák

A robbantás után megmaradó kéménycsonk, illetve törmelékhalmoz eltakarítása, elszállítása nem a mi feladatunk volt, így a megbízás további terepi munkát nem igényelt. A megmaradt robbanóanyagot a robbanóanyag-raktárba visszazállítottuk, a visszazállított mennyiséget az 1. táblázat tartalmazza.

A 28/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet 5 § (4) bekezdés alapján a robbantásvezető az egyedi robbantási munka elvégzését követő három napon belül köteles a bányafelügyelet részére jelentést küldeni a robbantásos munkával kapcsolatban, amelynek tartalmaznia kell: a robbantási munka helyét, célját, a felhasznált robbanóanyag megnevezését és mennyiségét, valamint a robbantásvezető adatait (név, lakcím, robbantásvezetői engedély száma).

A jegyzőkönyvet a robbantást követő napon a bányafelügyelet részére megküldtük. A helyszínen a bányafelügyelet helyszíni ellenőrzést tartott, a következőket ellenőrizte: a robbantás bejelentésének tényét igazolnom kellett, tehát hogy az engedélyben előírt szervezetek részére időben el lettek-e küldve a bejelentések, továbbá a felhasznált robbanóanyag-gyutacs-kapcsoló mennyiségét jegyzőkönyvben rögzítették, valamint hogy a kémény a megfelelő irányba dőlt, dőlés közben három részre törött.¹¹

Felhasznált irodalom

27/2022 (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról (ÁRBSZ). [Hatályos: 2022. 02. 01. – 2024. 09. 16.]

BENEDEK Dénes et al. (1989): *Robbantómesterek Kézikönyve II.* Komárom: OMBKE.

BOHUS Géza – HORVÁTH László – PAPP József (1983): *Ipari robbantástechnika.* Budapest: Műszaki.

DARUKA Norbert (2011): Veszélyes épületszerkezetek robbantásos technológiával történő eltávolításának követelményei, módszerei, biztonsági rendszabályai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 21(1–4), 95–108. Online: <https://bit.ly/3P5hduo>

KARDOS Gergely (2016): *Magas kémények robbantásos bontása, a szigetvári téglagyári kémény példáján.* Diplomamunka. Miskolc: Miskolci Egyetem.

KARDOS Gergely (2025): *Kémények robbantásos bontása beépített környezetben.* Szakdolgozat. Budapest: Óbudai Egyetem.

¹¹ KARDOS 2025.

Krisztián Végh¹ 

Issues of Countering Unmanned Aircraft Vehicles Concerning Deployed Forces

The rapid proliferation and increasing accessibility of unmanned aerial vehicles (UAVs) have significantly transformed the threat environment of deployed military forces. Military camps, as predominantly static and spatially extensive installations, have become particularly vulnerable to UAV-based reconnaissance and attack capabilities. This paper argues that the drone threat affecting military camps cannot be considered homogeneous, as it is fundamentally shaped by the differing functions, military value, and vulnerability of internal functional zones. Building on the NATO Deployed Force Infrastructure concept, the study examines military camps as complex systems composed of service and accommodation zones. Different types of UAV threats are capable of exerting negative effects on areas designated for the accommodation and support of deployed forces in distinct ways; therefore, a zone-based theoretical framework for C-UAS2 detection and mitigation requirements is necessary.

Keywords: military camp, drone threat, C-UAS, infrastructure

Introduction

The technological advancement of UAVs and their widespread accessibility have fundamentally transformed the character of modern warfare. The employment of UAVs is no longer the exclusive privilege of state actors possessing high technological capabilities; owing to their low cost, ease of operation and rapid adaptability, they have also become accessible to nonstate actors. As a result, the threat posed by drones has emerged as one of the defining challenges of force protection, including in the case of deployed military forces.

A defining characteristic of military camps is that they are typically static or only limitedly relocatable installations, operating within the same geographical area for extended periods. This inherent static nature provides the adversary with opportunities for gradual reconnaissance, identification of operational patterns, and the preparation of targeted attacks.

¹ PhD student, Ludovika University of Public Service, Doctoral School of Military Engineering, e-mail: vegh.krisztian1@gmail.com

² C-UAS: Counter-Unmanned Aerial Systems.

The employment of drones in this environment is particularly effective, as they are capable of conducting persistent surveillance, delivering precision strikes, and generating psychological as well as information effects.

A significant portion of NATO regulations or recommendations³ on C-UAS currently available supports efforts to counter the drone threat in the context of FP⁴ primarily through the formulation of general recommendations. However, military camps do not constitute homogeneous point targets. In accordance with relevant NATO doctrine, and consistent with technical and professional considerations, military camps comprise areas with different functions, which possess varying military value, differing levels of vulnerability and distinct threat profiles. The impact of an UAV attack against an energy generation or infocommunications facility fundamentally differs from an attack against a residential or recreational zone, in physical, operational and psychological terms.

This study is based on the assumption that effective counter-drone protection of military camps can only be achieved if both the threat and the defensive measures are interpreted in a functionally differentiated manner. To this end, drawing on the concept of Deployed Forces Infrastructure, the study examines military camps as complex systems that can be subdivided into service and accommodation zones. The objective of the study is to develop a theoretical framework that links the functional characteristics of these zones with the forms of threats posed by drones and, on this basis, defines zone-specific requirements for drone detection and counter-UAS measures. The essence of the study lies in its approach of not examining the drone threat in isolation, but rather interpreting it in alignment with the internal structure of the military camp, thereby supporting the planning of layered, priority-driven, and operationally relevant force protection solutions.

It should be emphasised that the drone threat is not merely a technical or tactical issue, but increasingly a system-level challenge affecting the resilience, sustainability and operational tempo of deployed forces. Consequently, counter-drone protection must be interpreted not only as an air defence task, but as an integral component of force protection and operational planning.

Drones as sources of threat

The combat employment of drones has become one of the most dynamically evolving domains of warfare over recent decades. The pace of this development has been driven not primarily by state-sponsored development programmes, but rather by battlefield innovation, improvisation, and the rapid adaptation of commercially available technologies.⁵ As highlighted by previous studies, drones have by now emerged in the operational environment not merely as auxiliary assets, but as independent military capabilities.

³ NATO Standard ATP-117 Countering Class I Unmanned Aircraft Systems (UAS) Doctrine, Edition A.

⁴ FP: Force (and asset) Protection.

⁵ VÉGH 2024.

One of the most significant characteristics of drone development is the rapid expansion of functional diversity. Initially, the employment of drones was primarily limited to reconnaissance and surveillance tasks, in which the role of the “flying sensor” was dominant. The capability for real-time imagery transmission has fundamentally altered tactical-level situational awareness, complicating the covert concentration of forces, the achievement of surprise, and the concealment of movements.⁶⁷ This capability, due to its particularly low cost and ease of operation, has also rapidly become widespread among nonstate actors.

The next stage of development was marked by the emergence of strike capabilities, which are predominantly associated with the use of COTS⁷ drones as improvised weapons. During the activities of the Islamic State, the employment of aerially delivered improvised explosive devices became widely known. These initially appeared in the form of simple dropped grenades and later evolved into increasingly sophisticated explosive charges.⁸ The procedures developed through this learning process demonstrated that even small explosive charges are capable of producing significant tactical and psychological effects, particularly against concentrated personnel or unfortified infrastructure.

FPV⁹-based OWA¹⁰ drones have emerged, representing an extremely challenging threat to defend against due to their high speed, excellent manoeuvrability and low detectability. These systems can essentially be interpreted as simplified, improvised variants of loitering munitions, combining certain characteristics of conventional weapon systems with the advantages of COTS technology.

During the Palestinian–Israeli conflict, the employment of drones already appeared as an obvious solution, although it did not, in essence, represent a new qualitative shift. Among the systems employed by Hamas and other Palestinian militias, drones equipped with anti-armour warheads also emerged, which – by exploiting top-attack profiles – were capable of circumventing traditional armoured protection measures.

Another important characteristic of this evolution is the system-level employment of drones. A drone is not merely a standalone asset, but rather a component of a broader system that includes the operator, the data link, the sensors, command, control and data-processing elements. This enables the use of drones not only for ISR¹¹ tasks and strike missions, but also for electronic warfare, deception, relay and target designation roles; furthermore, they may also serve as platforms for infantry or anti-armour weapons. These systems clearly illustrate that drones can be employed effectively not only against personnel, but also against high-value technical assets, while the required technological background has largely remained relatively accessible. During the Russo–Ukrainian War, the tactical role of drones rose to a new level. One of the most important lessons of the conflict is that the mass, routine and system-level employment of drones has become a defining feature of contemporary warfare.

⁶ PETTYJOHN 2024.

⁷ COTS: commercial-off-the-shelf.

⁸ DARUKA–SZALKAI 2022.

⁹ FPV: First Person View.

¹⁰ OWA: One-Way-Attack.

¹¹ ISR: Intelligence, Surveillance, Reconnaissance.

As demonstrated by the tables, the initial capabilities of drones have undergone remarkable development. On the one hand, advancements are clearly observable in terms of range and operating altitude. On the other hand, their originally limited ISR and short-range mission sets have been expanded to include the capability to support artillery fires through target designation and target correction. Strike missions conducted by OWA drones now pose a threat to critical infrastructure¹² at strategic depth, while their employment has also been extended to include EW¹³ mission sets.

Table 1: The most typical drones employed on the Russian side

Type	Range (km)	Maximum flight altitude (m)	Areas of employment	NATO category
Orion (Inokhodets)	1,400 km	7,500	ISR, precise strike platform	Class-III MALE
Shahed-136 / Geran-1	1,500–2,000	4,000	OWA, deep strike	Class-II
Forpost-R	400	6,000–7,000	ISR, deep strike	Class-II
Korsar	250	2,000	EW, ISR, deep strike	Class-II
Orlan-10	120	5,000	ISR, target designation, artillery support	Class-I Small
Orlan-30	300	6,000	ISR, target designation, artillery support	Class-I Small
Leer-3	120	5,000	EW, jamming comms	Class-I Small
Eleron-10	50	3,500–4,000	ISR, target designation, artillery support	Class-I Small
Supercam S300/S350	50–100	1200	ISR, target designation, artillery support	Class-I Small
ZALA 421-16E5G	150	3,500–4,000	ISR, target designation, artillery support	Class-I Small
Takhion	40	4,000	ISR, target designation, artillery support, EW	Class-I Small
Granat-4	55	2,000	ISR, target designation, artillery support, EW	Class-I Small
Gerbera	300–600	3,000	ISR, OWA, Decoy	Class-I Small
ZALA 421-16E	75–100	3,600	ISR, target designation, artillery support	Class-I Mini

¹² Kovács 2024.

¹³ EW: electronic warfare.

Type	Range (km)	Maximum flight altitude (m)	Areas of employment	NATO category
ZALA 421-16E2	30	3,600	Close ISR	Class-I Mini
ZALA 421-22	5-10	1,000	Close ISR	Class-I Mini
Privet-82	30	N.d.	LM ¹⁴ – smaller targets	Class-I Mini
KUB-BLA (KYB)	50	3,000	LM – smaller targets	Class-I Mini
ZALA Lancet-1/3	40-50	1,000-1,500	LM – smaller targets, radar, artillery	Class-I Mini

Source: compiled by the author based on online sources and manufacturer data derived from open-source information

The capabilities of the drones employed by Ukraine – particularly from the perspective of their operational use – are largely similar to those of the opposing side. In their case as well, the pace of development is clearly perceptible. In addition to the aspects discussed above, particular attention should be paid to the LM systems of various ranges present on both sides, as well as to drones optimised for deep strike missions. Depending on the type, these systems possess autonomous target acquisition, identification and (limited) decision-making capabilities.¹⁵ It is notable that the development of all these capabilities required no more than two decades.

Table 2: The most typical drones employed on the Ukrainian side

Type	Range (km)	Maximum flight altitude (m)	Areas of employment	NATO category
Bayraktar TB2	4,000	7,000	ISR, precise strike platform	Class-III MALE
PD-1	700	3,000	ISR, target tracking	Class-I Small
R18 (Aerorozvidka)	4-8	300-500	Strike	Class-I Small
Mugin-5	800	3,000-4,000	OWA, deep strike	Class-I Small
Shark	80-180	3,000	EW, ISR	Class-I Small
RAM II	30	3,000	LM – antitank, fortifications	Class-I Small

¹⁴ LM: Loitering Munition.

¹⁵ VÉGH-DARUKA 2025.

Type	Range (km)	Maximum flight altitude (m)	Areas of employment	NATO category
UJ-22	800	6,000	ISR, OWA, deep strike	Class-I Small
Bober	1,000	5,000	OWA, deep strike	Class-I Small
Morok	800	4,000–5,000	OWA, deep strike	Class-I Small
Leleka-100	50–100	1,500	ISR, target designation, artillery support	Class-I Mini
Furia	50–100	2,500	ISR, target designation, artillery support	Class-I Mini
Spectator-M1	150	3,600	ISR, target designation, artillery support	Class-I Mini
Punisher	45	400	ISR, target designation, artillery support	Class-I Mini
Warmate	30	3,000	LM– anti personnel, antitank	Class-I Mini
Switchblade 600	40	4,500	LM– antitank	Class-I Mini
Flyeye	30	3,000	Close ISR	Class-I Mini
Mini shark	45	7,000	Close ISR	Class I Mini
Switchblade 300	30	4,500	LM– anti personnel, antitank	Class-I Micro

Source: compiled by the author based on online sources and manufacturer data derived from open-source information

I believe that the development of drones is not linear, but adaptive and highly responsive to battlefield experience. Both the Palestinian–Israeli conflict and the Russo–Ukrainian War demonstrate that, due to their low cost and mass employment, drones can become a particularly dangerous threat from the perspective of deployed forces and military camps. This clearly justifies the application of zone-specific, functionally differentiated counter-drone protection approaches.

From the perspective of force protection, UAV threats can be grouped into reconnaissance-oriented, strike-oriented and hybrid (multi-role) categories. Each category generates different risk profiles in terms of detectability, warning time, potential damage and psychological effect, which must be reflected in zone-specific defensive requirements.

The role and general characteristics of military camps

Military camps provide the fundamental physical and organisational framework for the operation of deployed forces. Their primary purpose is to create, in a concentrated manner, the conditions necessary for the accommodation, command and control, logistical support, and sustainment of military forces within a given operational area.¹⁶

A military camp should therefore not be interpreted merely as a place of accommodation, but rather as a complex facility that simultaneously supports combat, support and service activities. The purpose of military camps is essentially twofold. On the one hand, they must ensure the living and working conditions of personnel, including rest, medical support and community functions. On the other hand, they must ensure the operation of infrastructure that supports the execution of operational tasks, such as command and control systems, logistics storage facilities, energy and water supply, and basic security functions.

Therefore, the fundamental task of military camps is to support the achievement of operational objectives, and their planning and deployment depend on:¹⁷

- the duration of the operation
- the nature and intensity of threat sources
- the size, organisation and mission of the deployed forces
- host nation support (in the case of expeditionary operations)
- geographical factors (geological, climatic, meteorological, etc.)
- the composition of forces stationed in the camp (national, multinational, host nation)
- and numerous other factors (political, health and epidemiological conditions, the quality of home nation support, etc.)

In NATO doctrine, the protection of military camps is closely linked to the concept of mission assurance, whereby infrastructure resilience and force survivability are treated as prerequisites for sustained operational effectiveness.

From a spatial perspective, military camps cannot be regarded as point targets. They are typically large, functionally segmented areas, whose footprint may range from a few hectares to several square kilometres, depending on the size of the deployed forces, the operational environment and the intended duration of the camp. Within camps, zones of different purposes are present, each characterised by distinct infrastructure requirements, activity patterns and military value. This internal segmentation is of decisive importance from the perspectives of vulnerability and defence.

¹⁶ NATO Standard ATP-3.12.1.4 Deployed Forces Infrastructure.

¹⁷ BAKOS 2021 (translated by the author).

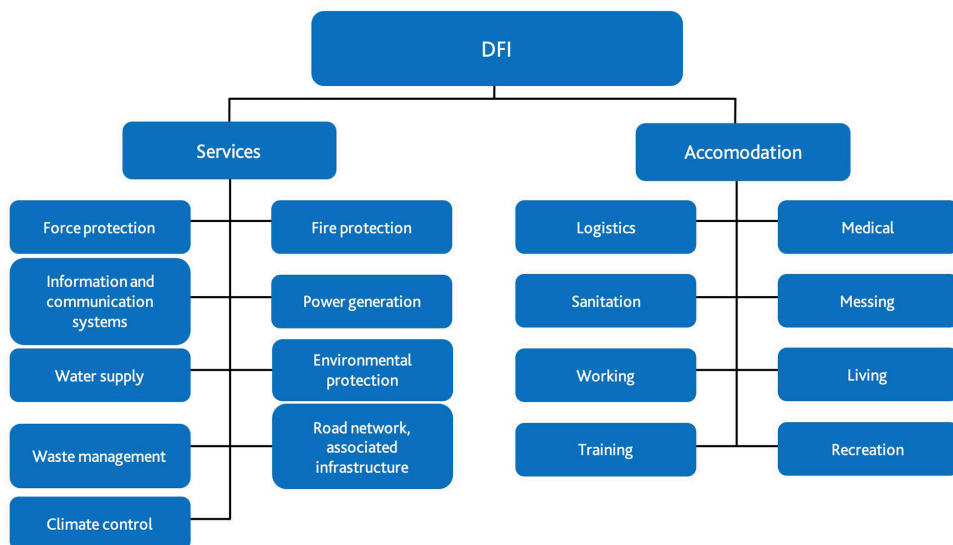


Figure 1: Deployed Forces Infrastructure

Source: compiled by the author based on NATO Standard ATP-3.12.1.4

From a temporal perspective, military camps typically operate at the same location over extended periods. This relative static nature provides advantages for friendly forces in terms of sustainment and organisational efficiency; however, it simultaneously increases detectability and the risk of targeted attacks. Routine movements, temporal patterns, and infrastructure usage practices that develop during camp operations may, over time, become predictable to a hostile observer.

Another characteristic of military camps is their strong dependence on interconnected systems. The failure of certain subsystems, such as energy supply, communications, or water supply (particularly in arid environments) may have a disproportionate impact on the overall operational capability of the camp. Consequently, a camp should be understood not merely as a physical object, but as a network of functional elements in close mutual interaction.

Overall, military camps constitute complex, large-area installations operating for defined periods of time and do not form a homogeneous target system. These characteristics justify examining threats to camps – particularly the employment of unmanned aerial vehicles – through a functionally differentiated approach and tailoring defensive measures to the differing roles and vulnerabilities of internal zones.

Conceptual structure of counter-drone protection for deployed forces

Smaller and lighter drones are particularly exposed to meteorological effects and, due to their structural design, are inherently fragile; however, these characteristics also create

opportunities for counter-drone defence. An integrated and layered counter-drone system must therefore be designed with these factors in mind. The conceptual structure is based on an approach that identifies those UAS components whose attack or disruption can effectively contribute to counter-drone protection. These components include the operator/GCS,¹⁸ the data link and the platform itself.

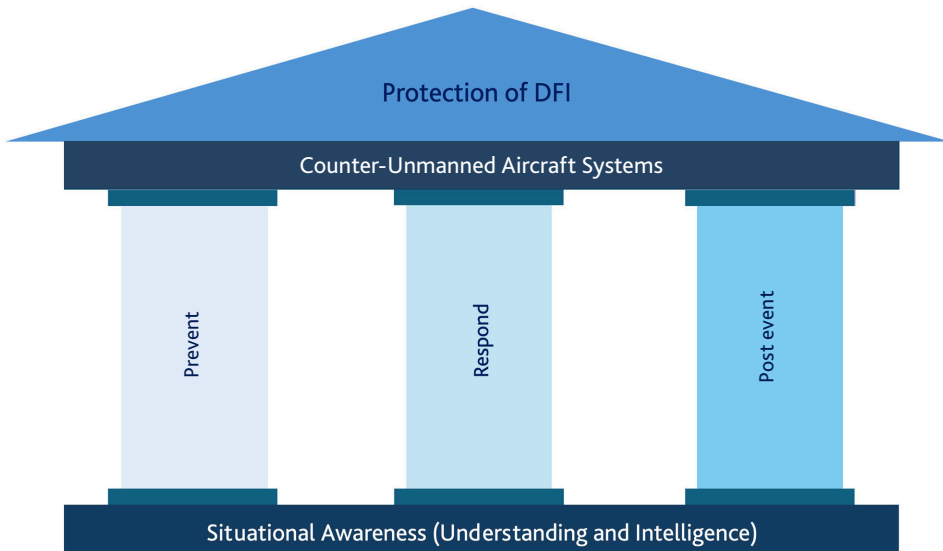


Figure 2: Conceptual structure of counter-drone defence

Source: compiled by the author based on NATO Standard ATP-117

Within the toolset of counter-drone defence, the first segment supports detection tasks. Through these sensors, the defence “perceives” the presence of drones, their movement, direction, as well as their altitude and speed. Such sensors may operate on RF,¹⁹ EO,²⁰ IR,²¹ ACC,²² or radar principles, either as standalone systems or in combined configurations. Visual detection solutions may also be employed, which are indispensable under battlefield conditions; however, taking into account potentially adverse weather conditions, the detection range achieved by visual means often does not exceed 300–500 metres, providing only a very limited response time.

¹⁸ GCS: Ground Control Station.

¹⁹ RF: Radio Frequency.

²⁰ EO: Electro-Optical.

²¹ IR: Infrared.

²² ACC: Acoustic.

The next defensive segment is drone identification. This task set enables the differentiation of friendly drones from hostile ones through the application of technical solutions and procedures. The technical core of this function may be provided by an identification friend or foe-type system, that is, equipping friendly drones with transponders that allow them to be recognised by friendly system elements.

Within the neutralisation segment, a distinction must be made between non-kinetic and kinetic effectors. Non-kinetic means primarily fall into the category of jamming systems. These are electromagnetic or other advanced-technology devices employed with the purpose of disrupting, blocking, or taking over control between the drone and the operator/GCS. Such systems may be stationary (permanently installed), deployable, mobile, or handheld.

The purpose of kinetic means is the physical destruction of hostile drones or the infliction of damage sufficient to render them inoperable. These may include, among others, conventional air defence assets, net-launching devices, interceptor drones, small arms and directed-energy weapons.

From the perspective of counter-drone zones, maintaining the “greatest possible distance” and thus, achieving the most optimal defensive solution means keeping the threat posed by drones away from the airspace of a given area. Accordingly, I argue that the conceptual structure of counter-drone zones should be developed from the outside inward, beginning with the prevention or denial of hostile or malicious drone employment.

Among the means applicable to this layer is the existence of legal regulations that prohibit the use of drones either locally or regionally. While this approach may not appear straightforward during the conduct of expeditionary operations, it can nevertheless be managed in cooperation with local authorities within the framework of host nation support. Through such measures, unintended or non-hostile intrusions into the airspace of the deployed infrastructure may be excluded, thereby potentially avoiding the initiation of defensive fires.

The toolbox of preventive measures may also include – within a permissive environment – the option of conducting preemptive strikes against the operator/GCS. However, this already falls within the domain of weapons employment and, more specifically, the ROE.²³

If the means represented by this first group prove inadequate, the optimal objective becomes the neutralisation or forced landing of drones already airborne. A fundamental prerequisite for this is the availability, deployment and C2²⁴ integration of the previously described sensor systems, as well as their linkage to appropriate effector systems. The selection and deployment of these sensors must ensure that the time available between the detection, tracking, identification of incoming drones and the decision-making and execution of effects is sufficiently long. This is, of course, a theoretical but necessary objective, which ultimately depends on the capabilities of the available sensor systems.

The generation of effects is, by nature, the result of a decision – either machine-based or human – and, similarly to sensors, the associated means are integrated into C2 systems. Their effectiveness depends on the range (engagement distance) of the effectors, the established

²³ ROE: Rules of Engagement.

²⁴ C2: Command and Control.

decision-making mechanisms, and the level of automation and autonomy of the defensive systems. As a matter of principle – at least at the conceptual level – the employment of non-kinetic effectors should be planned first, particularly over urban, densely populated, or built-up areas, in order to avoid collateral damage. Under optimal conditions, with suitable weather and the availability of technical capabilities, the drone threat may be eliminated or significantly reduced at distances of up to several tens of kilometres through the use of non-kinetic systems.

In cases of ineffectiveness – for example, against drones controlled via optical fibre – the role of kinetic effectors becomes increasingly important, as they represent one of the final “lines of defence”.

The effectiveness of counter-drone measures is also critically dependent on decision-making timelines, delegation of authority and rules of engagement. Delays or ambiguities in authorisation may significantly reduce the practical utility of even highly capable technical systems.

All of the above outlines an optimal scenario in which available resources permit the full implementation of these measures. Experience, however, indicates that this is rarely the case. Accordingly, preparing for – and accounting for – the possibility that established defensive systems may not be capable of achieving 100 percent effectiveness in drone detection, identification, or neutralisation, the construction of a “last line of defence” becomes necessary in order to protect forces and assets. This task group essentially encompasses the full spectrum of passive defensive measures. Such measures include fortification and hardening. The targets requiring protection in this manner consist of point targets or more extensive facilities that form part of the deployed forces’ infrastructure and which – taking into account the objectives of the operation – must be protected under all circumstances.

These may include:

- accommodation and rest areas
- work areas and command posts
- infocommunications centres
- areas providing life-support services (with particular emphasis on drinking water, food supply, climate control and energy supply)
- logistics storage areas (with particular emphasis on ammunition, fuel and weapons material)
- training areas

All of the above measures must be comprehensively complemented by the exploitation of camouflage and deception measures, as well as by the implementation of additional security procedures.

Summary

This study examined the complex nature of the drone threat facing deployed military forces and analysed the conceptual and practical frameworks of potential defensive responses. It can be stated that the rapid technological development and mass employment of UAVs have

fundamentally transformed the security environment of military camps, particularly due to their static nature, large spatial footprint and long-term presence.

In my assessment, the drone threat affecting military camps cannot be considered homogeneous, as it is fundamentally shaped by the differing functions, military value and vulnerability of the internal functional zones. Drawing on the NATO Deployed Forces Infrastructure concept, I propose interpreting military camps as complex systems that can be subdivided into infrastructure units and zones providing essential services. In my evaluation, among infrastructures serving personnel accommodation, work areas and infocommunications nodes constitute particularly sensitive targets, as they simultaneously perform human, command-and-control, and information-related functions. Consequently, the drone threat in these areas manifests not only in kinetic forms, but also through information and electronic operations. The fact that drones have become capable of performing all these functions is reflected in the data presented in the tables containing the most characteristic drones employed during the Russo–Ukrainian conflict.

In my view, effective counter-drone defence cannot be interpreted solely as a technical issue. The foundation of defence must be provided by intelligence and reconnaissance, which enable the continuous assessment of existing and anticipated drone threats. Without detailed knowledge of drone types, ranges, control methods and employment procedures, counter-drone systems inevitably become reactive and, over time, ineffective. Accordingly, I propose that the development of counter-drone defence should always be carried out in parallel with the specific threat, continuously adapting to its evolution.

Future research should focus on validating the proposed zone-based counter-drone framework through scenario-based analysis and simulation, as well as on examining its applicability in multinational and host-nation-supported operational environments.

In summary, effective counter-drone protection of deployed forces can only be ensured through a threat-driven, zone-specific and adaptive approach. The integration of technical means, procedures, and passive defensive measures, combined with the continuous incorporation of intelligence and reconnaissance information, can jointly establish a sustainable and flexibly developable counter-drone defence for military camps.

References

- BAKOS, Tamás (2021): A katonai táborok fizikai védelme [Physical Protection of Military Camps]. *Hadtudomány*, 31(E-szám), 186–193. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2021.31.E.186>
- DARUKA, Norbert – SZALKAI, László (2022): The Dangers of Unmanned Aircraft Systems. In DARUKA, Norbert (ed.): *Fúrás-Robbantástechnika Nemzetközi Szimpózium Különkiadás 2022* [International Symposium on Drilling and Blasting Technology 2022]. Budapest: Magyar Robbantástechnikai Egyesület, 247–257. Online: https://mare.hu/sites/default/files/furas-robbantastechnika_nemzetkozi_szimpozium_2022_kulonkiadas_mare_lektoralt_pdf.pdf
- EMBER, István – KOVÁCS, Zoltán (2022): Mini drónok lehetséges alkalmazása tűzszerész műveletekben. *Haditechnika*, 56(2), 18–23. Online: https://real.mtak.hu/175546/1/HT_2022-2_cikk_04.pdf
- KOVÁCS, Ferenc (2024): A kritikus infrastruktúra stratégiai szerepe az orosz–ukrán háborúban [The Strategic Role of Critical Infrastructure in the Russo–Ukrainian War]. *Hadtudomány*, 34(3), 29–39. Online: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2024.34.3.29>

- KOVÁCS, Zoltán – EMBER, István (2021): Aknafelderítés légi eszközökkel [Landmine Detection with Aerial Vehicles]. *Műszaki Katonai Közlöny*, 31(4), 5–20. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2021.4.1>
- KOVÁCS, Zoltán – EMBER, István (2022): Landmine Detection with Drones. *Revista Academiei Forțelor Terestre / Land Forces Academy Review*, 27(1), 84–92. Online: <https://doi.org/10.2478/raft-2022-0012>
- NATO C-IED COE S265/2023 Report: Use of Explosive-laden Drones and Other Improvised Explosive Devices by Palestinian Militias in the Attacks against Israel from the Gaza Strip.
- NATO Standard ATP-117 Countering Class I Unmanned Aircraft Systems (UAS) Doctrine, Edition A. NATO Standard ATP-3.12.1.4 Deployed Forces Infrastructure.
- PETTYJOHN, Stacie (2024): Evolution Not Revolution. Drone Warfare in Russia's 2022 Invasion of Ukraine. *CNAS*, 8 February 2024. Online: <https://www.cnas.org/publications/reports/evolution-not-revolution>
- SZALKAY, Dániel – DARUKA, Norbert – KOVÁCS, Zoltán – EMBER, István (2025): Drónok alkalmazási lehetőségei a hazai folyamőr feladatokban. *Haditechnika*, 59(3), 56–61. Online: <https://kiadvany.magyarhonvedseg.hu/index.php/HT/issue/view/201>
- VÉGH, Krisztián (2024): A repülő IED, mint harctéri innováció [Flying IEDs as Tactical Innovations]. In DARUKA, Norbert – EMBER, István – KOVÁCS, Zoltán T. (eds.): *III. Fúrás-robbantástechnika nemzetközi szimpózium különkiadás 2024* [III International Symposium on Drilling and Blasting Technology 2024]. Budapest: Magyar Robbantástechnikai Egyesület, 80–93. Online: https://drive.google.com/file/d/1fpsAv_ELU1ynR3bE7rPoklhIUVDuRTL/view?pli=1
- VÉGH, Krisztián – DARUKA, Norbert (2025): The Challenge of Technology-Enabled Unmanned Aircraft Systems. *Honvédségi Szemle*, 153(Special Issue 1), 80–91. Online: <https://doi.org/10.35926/HDR.2025.1.7>

István Ember¹ 

Possible Applications of Photopolymerisation Additive Manufacturing Processes in the Armed Forces²

The spread of additive manufacturing is no longer a possibility today, as the technology is already present in almost every field. There are countless practical examples of military applications, even from active conflict zones. Manufacturing practice requires skilled professionals at both the technician and designer levels. However, military applications require more than just one or two technical solutions, as each one offers exploitable opportunities. Components manufactured from photopolymers are one such example, as they can be used to make special-quality products for combat soldiers, but manufacturing is only possible away from the fighting, deep within the defence perimeter.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, military industry, defence industry

Introduction

Military research is becoming increasingly important these days, with disruptive technologies playing an increasingly significant role, although many are not happy about this. Additive manufacturing did not start transforming markets recently, but it is still undergoing aggressive development today. New technical solutions and patents are constantly emerging, while composites and special metals such as titanium³ or even hydrogels⁴ have become almost common to use in additive processes. It can offer us amazing advantages in the defence sector. It can also address issues that pose challenges to both the civilian and military sectors,

¹ Assistant Professor, Ludovika University of Public Service, MSOT Combat Support Department, e-mail: ember.istvan@uni-nke.hu

² This paper was supported by the János Bolyai Research Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences.

³ HLINKA et al. 2023.

⁴ VÉG 2023: 86.

such as climate change and other related environmental problems.⁵ A significant portion of targeted military-related news revolves around the application of artificial intelligence,⁶ which is particularly important, but we must not forget the active areas where 3D printing can provide real and proven support. These include producing operational and combat drones,⁷ the manufacture of components for explosive devices (e.g. aerial bombs)⁸ related to training and preparation (ranging from the technical units that locate and neutralise mines⁹ to the training of future officers), educational materials¹⁰ and spare parts necessary for the maintenance of various technical equipment.

Although the technology has already proven its technical feasibility, this alone is insufficient for effective military application. Skilled engineers are needed who are capable of using special software to create generative designs¹¹ in order to optimise tools. The goal may be durability, but it may also be to simplify manufacturing processes and make them more efficient. Technology and a skilled design team are key to creating the right digital warehouse, which is the basis for self-sufficiency, but also to creating the right 3D printer park.

In this study, I set out to summarise the background of two photopolymer resin-based additive technologies and their military applications.

The aim of this study is to provide a structured overview of two widely used photopolymer-based additive manufacturing technologies – SLA and DLP – and to analyse their potential applicability, advantages, and limitations in military and defence industry contexts, with particular emphasis on logistics support, rapid prototyping and operational sustainability.

SLA technology

Stereolithography apparatus (hereinafter: SLA) is an additive manufacturing technology that uses liquid photopolymer resin that solidifies layer by layer. Solidification is performed by ultraviolet (hereinafter: UV) light, thereby forming three-dimensional objects in the build space. SLA is a widely used, relatively inexpensive version of photopolymerisation additive manufacturing, which primarily enables the production of high-resolution parts and objects with smooth surfaces.¹²

The spatial hardening of photopolymer raw materials using UV rays and its description dates back to the early 1980s. Hideo Kodama described the method by which spatial models can be created from photopolymer layers that harden under UV light. However, the patent for the technology was not registered because it did not receive support, but regardless of

⁵ PADÁNYI 2024; DÉNES et al. 2024.

⁶ NÉGYESI–FAZEKAS 2022; FAZEKAS 2023.

⁷ DARUKA 2014a.

⁸ DARUKA 2014b.

⁹ HORVÁTH–SZATAI 2020a; HORVÁTH–SZATAI 2020b.

¹⁰ DARUKA et al. 2024; VÉG 2024.

¹¹ HEGEDŰS et al. 2024; MARKOVITS et al. 2023.

¹² PAGAC et al. 2021; GÁL–NÉMETH 2019.

this, he can be considered the inventor of the process. The first patent for the photopolymerisation process was registered in 1986 by Charles W. Hull, who created SLA technology as we know it today.¹³

The materials used in SLA are photopolymers, in which photo-initiators create free radicals under the influence of UV light, which catalyse the monomers and initiate cross-linking, thereby creating a solid polymer from liquid resin. This photopolymerisation is an irreversible chemical reaction. Light can only penetrate a few millimetres into the resin, which is particularly advantageous in SLA technology because very thin layers are built up on top of each other.¹⁴

An SLA printer (Figure 1) always has a tank (also known as a build chamber) containing a liquid photopolymer. A build platform is immersed in this material and UV light illuminates the points where the resin is to be solidified according to the given cross-sectional layer. After the layer has hardened, the platform moves by a preset amount, which is also the layer thickness. The process is repeated layer by layer until the entire object is complete. The hardened resin cannot be converted back into liquid; the solidification is an irreversible thermochemical process.¹⁵

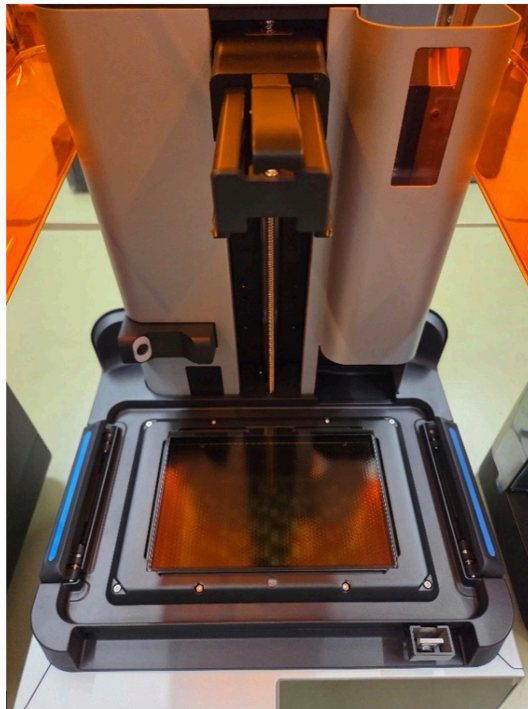


Figure 1: Formlabs Form 4 3D printer interior space

Source: edited by the author

¹³ PAGAC et al. 2021.

¹⁴ MUKHTARKHANOV et al. 2020.

¹⁵ PAGAC et al. 2021.

SLA technology allows the use of multiple types of photopolymer resins (only one at a time for a single object), which provide different mechanical and physical properties to the finished product. Basic resins are mainly suitable for rapid prototyping, while more durable, technical resins can be stronger and have increased heat resistance. In addition, there are biocompatible materials suitable for medical use, and even transparent or castable versions are available.¹⁶

There are several alternatives to the SLA process in the field of photopolymerisation additive manufacturing. Digital light processing (hereinafter: DLP) can be considered the classic solution, while continuous digital light processing (hereinafter: CDLP) and continuous liquid interface production (hereinafter: CLIP) are more advanced methods that require oxygen and light-emitting diodes (hereinafter: LED) for production. These variants therefore differ mainly in terms of the light source, its control and the production speed.¹⁷

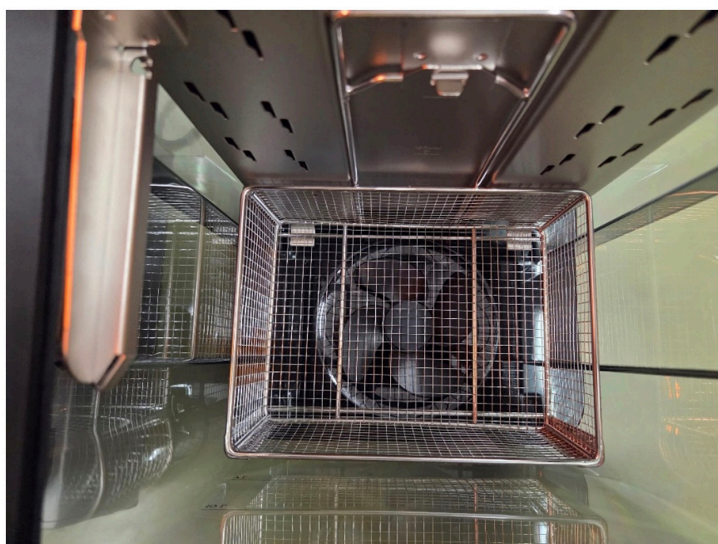


Figure 2: The interior of the Formlabs Form 4 3D printer washing station
Source: edited by the author

One of the most common applications can be found in the field of industrial prototyping. In this field, high resolution, detailed design and smooth surfaces are often essential. For example, concept models of aircraft and cars, objects tested for fit and dimensional accuracy, and visual presentation tools for developed devices can also be created using this method during iterations leading to the final product. The technology is particularly valuable and widespread in the medical and dental fields, where it can be used to create precise anatomical models, design templates for surgical procedures, and custom tools and prostheses. The use of biocompatible resins allows the creation of

¹⁶ Engineering Product Design 2024.

¹⁷ PAGAC et al. 2021.

devices that can come into direct contact with body tissues, thereby aiding healing and improving patients' quality of life.¹⁸

The main advantages of SLA are therefore its outstanding resolution, smooth surface, detailed finish, and ability to reproduce complex geometric details. At the same time, the technology has its limitations, because although photopolymer resins with increasingly diverse material properties are available, the mechanical characteristics of the materials are still significantly limited and require post-processing.¹⁹ This usually involves two steps to achieve the final quality of the object's surface. First, the remaining raw material must be removed from the surface, usually in an isopropyl alcohol bath (Figure 2), followed by final solidification of the surface using UV light (Figure 3).

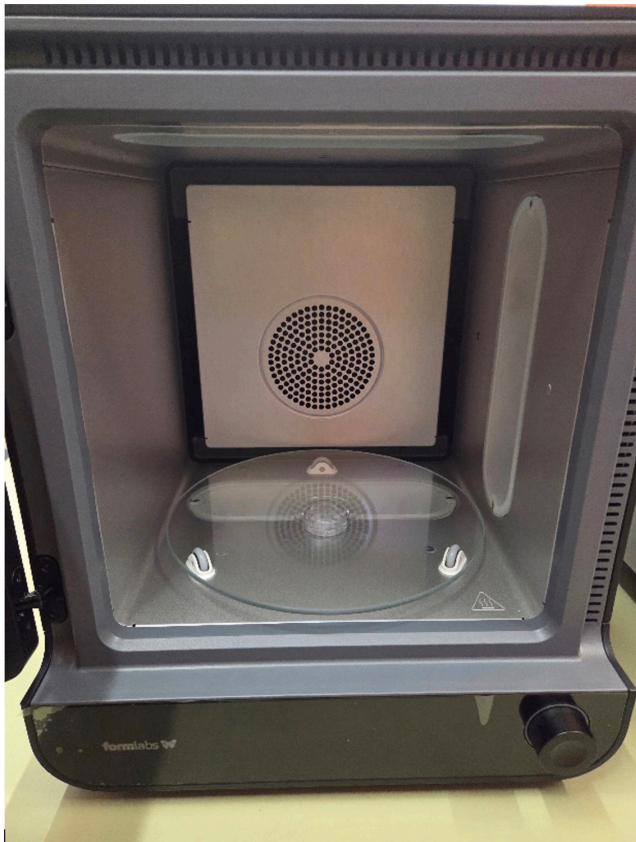


Figure 3: The interior of Formlabs Form 4 3D printer UV post-processing unit

Source: edited by the author

¹⁸ Engineering Product Design 2024.

¹⁹ Rapid Factory s. a.

DLP technology

DLP 3D printing belongs to the family of photopolymerisation additive manufacturing processes; it uses UV light to cure photoreactive resin layer by layer, creating three-dimensional objects with high precision and smooth surfaces. The DLP process is based on simultaneous illumination of the entire cross-section of the layer, which provides significantly faster build speeds compared to traditional point-based light technologies.²⁰

DLP technology was made possible by the digital micromirror device (hereinafter: DMD) developed by Texas Instruments in 1987, even though this development was originally used in digital projection systems. Ten years later, the projector technology was transferred to additive manufacturing, making it an alternative solution for photopolymer-based 3D printing.²¹ The basis of operation is therefore a DMD consisting of more than a million units, which can be rotated to guide the light beams illuminating the resin into the correct position. The quality of the surface and internal structure of the manufactured objects is determined by the resolution of the device, which in this case is technically the distance of a few microns between the mirrors. What makes it special is that, due to the absence of high temperatures, pressure and forces during manufacturing, it may even be suitable for printing tissues and organs.²²

In terms of raw materials, we can talk about the photopolymer resins described in the case of SLA, which harden under the influence of UV light. UV exposure causes cross-links to form in the raw material, turning the liquid phase into a solid object. The resins used in this case are typically acrylate- and methacrylate-based monomers and oligomers, which cross-link under the simultaneous exposure of light projected by the projector onto every point of the cross-section, forming a slice of the solid body.²³

The outstanding accuracy and surface quality of the finished objects make the process particularly suitable for dental and medical modelling, such as surgical instruments, dental models and implants. The short production time and the ability to create unique objects significantly support its use in the healthcare sector.²⁴ The production of industrial prototypes described in the case of SLA has also become widespread through the use of the DLP process, but it also plays a significant role in the industry in the production of small series. Here, too, precision, smooth and even surfaces, and relatively fast production are fundamental requirements, and DLP is able to meet these requirements.

The main advantages of DLP technology include high resolution, a relatively wide range of raw materials, fast production due to simultaneous layer exposure, a smooth surface, and the ability to produce high-precision (small and medium-sized) parts. It does have its limitations, however, as it is only suitable for manufacturing high-strength or heat-resistant

²⁰ SWETHA et al. 2024.

²¹ DIGA 2025.

²² ZHANG et al. 2020.

²³ SWETHA et al. 2024.

²⁴ CHEN-WEI 2025.

products within certain limits, and due to its resolution, the surface smoothness of large parts is reduced, requiring post-processing.²⁵

Comparison of technologies

Both SLA and DLP are additive manufacturing processes based on liquid photopolymer resin, but they differ significantly in their method of illumination. In SLA manufacturing, a UV laser draws points to be solidified in each layer on the surface of the resin liquid, while DLP uses a digital light projector to simultaneously project and solidify entire layers in the resin. This difference has a decisive impact on printing speed, accuracy and surface quality.²⁶

One of the advantages of DLP is time efficiency, as the entire cross-sectional layer solidifies with simultaneous exposure. This means that larger objects or multiple objects can be produced much faster. Its speed is particularly advantageous when many identical parts need to be produced. In the case of SLA, the UV light moves from point to point, which means that it takes much longer to illuminate a layer, which is particularly noticeable in the increased production time for complex shapes with a large cross-section. Both technologies are capable of high-resolution production, but there are noticeable differences in surface quality and detail. The SLA laser has a small focal point, which can result in smoother surfaces and softer curves. This is particularly advantageous for objects without curved edges. Due to the pixel structure of the projected layers, certain curves may be slightly stepped in DLP, which can only be eliminated by a higher-resolution projector. Another indisputable advantage of SLA systems is their generally larger build volume. Despite the large volume, the level of detail is not reduced because the focus of the UV beam does not depend on the projected image. In contrast, with DLP, the number of pixels limits the quality of use of the build area. A larger projection area results in a larger pixel size, making a reduction in resolution inevitable.²⁷

Both technologies use photopolymer resins, but these are not necessarily compatible with each other. In the DLP process, the intensity and spectrum of the projected light may differ from that used in the SLA process, which is why it is necessary to use specific raw materials. This also determines that the mechanical characteristics may differ for parts manufactured using different technologies.²⁸

One of the key advantages of SLA technology is its excellent surface quality, meticulous detail and high precision, which is particularly important in healthcare applications. In most cases, SLA systems have a larger build volume, which can also be advantageous during prototyping. The strongest advantage of DLP is speed and efficient production. An entire layer can be exposed in a matter of seconds, supporting the production of larger quantities of parts. In addition, the projector is made up of fewer mechanical parts, which can be reflected in the price and maintenance requirements of the device.²⁹

²⁵ JANBAIN 2025.

²⁶ ELO 2025.

²⁷ MCCLEMENTS 2022.

²⁸ FLYNT 2019.

²⁹ MCCLEMENTS 2022.

In general, we can say that SLA is the better choice when surface quality and precision are the most important requirements, for example in the case of complex prototypes or demonstration models. DLP is a much better choice when production speed and efficiency are the decisive factors. When manufacturing small parts or larger series, the outstanding cycle time of the equipment can be a definite advantage.³⁰

From a military perspective, the choice between SLA and DLP technologies should be driven by mission-specific requirements. While SLA systems offer superior surface quality and larger build volumes suitable for complex prototype development, DLP systems provide higher productivity and faster turnaround times, which may be advantageous in scenarios requiring rapid replacement of standardised components.

Possibilities for military and defence industry applications

Unlike civilian or purely industrial applications, military use of additive manufacturing technologies is strongly influenced by operational constraints such as mobility, environmental conditions, supply chain vulnerability and security requirements. Therefore, the applicability of photopolymer-based technologies must be evaluated not only on the basis of material properties and production accuracy, but also with regard to their logistical footprint, maintenance needs, and integration into existing military support systems.

Additive manufacturing has become a key element of defence technologies (although not all countries' armed forces are developing at the same pace in this area), as it can significantly reduce the time required for research and development and increase design freedom. In addition, it can reduce the procurement and supply burdens associated with logistics tasks. This manufacturing technology, including the processes detailed above, enables the production of optimised, customised parts without the burdens of traditional manufacturing processes. Of course, there are limitations, but by leveraging its advantages, the military can rely on an important form of self-sufficiency.³¹ SLA and DLP technologies using photopolymers – as fundamental and universal tools for additive manufacturing – can serve as an excellent basis for rapid prototyping and the production of objects with unique geometries.³²

In the field of military logistics, the flexibility of supply chains and the possibility of on-site³³ spare parts replacement are of paramount importance. SLA and DLP-based 3D printers are suitable for local manufacturing, which can significantly reduce the complexity of procurement and replenishment. Other technologies can also provide this in general, but with different advantages and disadvantages.³⁴

It should be noted that although SLA and DLP technologies enable decentralised production, they are not optimised for frontline or combat-zone manufacturing. Their effective use

³⁰ ELO 2025.

³¹ ATALIE et al. 2024: 502–506.

³² FICZERE 2022: 73–74.

³³ In this context, "on-site" refers to secured rear-area facilities such as permanent bases or protected logistics hubs, rather than frontline or combat-zone environments.

³⁴ Raise3D 2025.

is rather limited to secured rear areas, bases, or containerised workshops operating under controlled environmental conditions.

As mentioned above, several types of resin can be used as raw materials. Some of these have particularly interesting and innovative properties for military use and are available on the market as high-strength and heat-resistant raw materials. This is particularly important in the defence industry and military applications, as objects and tools with outstanding material properties are sometimes necessary for combat. It also enables the manufacture of components that previously could only be made from metals. Although these materials do not yet match the mechanical performance of metals, special compounds are already suitable for higher strength and industrial applications, which also affects military support and logistics.

Summary

The strategic relevance of photopolymer-based additive manufacturing lies primarily in its contribution to logistics resilience and reduced dependency on extended supply chains. When combined with a well-maintained digital inventory and trained personnel, these technologies can enhance operational flexibility and support sustained military operations.

Both SLA and DLP technologies enable high-quality photopolymer 3D printing, although this obviously depends heavily on the capabilities and quality of the device in question. The technologies work differently, so compromises may be necessary when choosing between them. SLA uses point illumination to provide a smoother, more detailed surface and a relatively larger production space, while DLP projects light onto an entire layer, offering faster production but poorer surface quality for larger objects.

Based on the above, both technologies may be necessary for defence industry and military applications. These devices do not enable frontline or combat-zone component manufacturing, as they are not optimised for such conditions; however, they may be effectively employed at secured rear-area bases or containerised logistics facilities operating under controlled environmental conditions. Such devices can reduce logistical burdens and supply chain dependencies to an astonishing degree, which can be a strategic advantage during an active conflict if their operation and maintenance are well organised and the organisation has a digital warehouse of sufficient quality. The latter is essential for a nation to be fully prepared to carry out its military operations today.

References

- 3Druk (2024): *Gyors prototípus SLA (sztereolitográfia) 3D nyomtatással*. Online: <https://3druck.com/hu/ipar/gyors-prototipus-sla-sztereolitografiaval-3d-nyomtatás-41131246/>
- ATALIE, Desalegn – GUO, Ze-Shi – BERIHUN, Dereje – TADESSE, Molla – MA, Peng-Cheng (2024): Role of Additive Manufacturing in Defense Technologies: Emerging Trends and Future Scope. In RANGAPPA, Sanjay M. – AYYAPPAN, Vinod – SIENGCHIN, Suchart (eds.): *Additive Manufacturing Materials and Technology*. Amsterdam–London: Elsevier, 501–521. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18462-8.00020-9>

- CHEN, Yangqing – WEI, Junchao (2025): Application of 3D Printing Technology in Dentistry: A Review. *Polymers*, 17(7). Online: <https://doi.org/10.3390/polym17070886>
- DARUKA, Norbert (2014a): Oktokopter. A légiszállítás modernizációja, vagy a robbanószerkezetek célbajuttatásának újabb lehetősége. *Repüléstudományi Közlemények*, 26(2), 247–256. Online: https://epa.oszk.hu/02600/02694/00065/pdf/EPA02694_rtk_2014_2_247-256.pdf
- DARUKA, Norbert (2014b): Robbanótestek I. Amit a bombákról tudni érdemes. *Műszaki Katonai Közlöny*, 24(4), 68–82. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2014_4_5_Robbanotestek%20I.%20-%20Amit%20a%20bombakrol%20tudni_1.pdf
- DARUKA, Norbert – DÉNES, Kálmán – EMBER, István – KOVÁCS, Zoltán T. – VÉG, Róbert (2024): A 3D-nyomatási 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>
- DÉNES, Kálmán – KOVÁCS, Ferenc – TÓTH, Rudolf – KOVÁCS, Zoltán (2024): Sikeres lehet-e az Európai Unió klímapolitikája? *Hadtudomány*, 34(E-szám), 221–235. Online: <https://doi.org/10.17047/Hadtud.2024.34.E.221>
- DIGA, Michal Shapira (2025): *Everything You Need to Know about DLP 3D Printing*. Online: <https://www.stratasys.com/en/resources/blog/digital-light-processing-dlp-3d-printing-explained/>
- Elo (2025): *3D nyomtatás: A technológia működése és alkalmazási területei*. Online: <https://elo.hu/3d-nyomatatas-a-technologia-mukodese-es-alkalmazasi-teruletei/>
- Engineering Product Design (2024): *Vat Photopolymerization*. Online: <https://engineeringproduct-design.com/knowledge-base/vat-photopolymerization/>
- FAZEKAS, Ferenc (2023): Mission Command and Artificial Intelligence. *Land Forces Academy Review*, 28(2), 69–79. Online: <https://doi.org/10.2478/raft-2023-0010>
- FICZERE, Péter (2022): Additive Manufacturing in the Military and Defence Industry. *Design of Machines and Structures*, 12(2), 73–77. Online: <https://doi.org/10.32972/dms.2022.016>
- FLYNT, Joseph (2019): *SLA vs. DLP: Which One Is Better?* Online: <https://3dinsider.com/sla-vs-dlp/>
- GÁL, Bence – NÉMETH, András (2019): Additív gyártástechnológiák katonai alkalmazásának vizsgálata, különös tekintettel a katonai elektronika területére. *Hadmérnök*, 14(1), 231–249. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.19>
- GÁVAY, György (2024): Honvédségi járművek kezelőszerveinek pótlása, módosítása 3D-nyomatási technológia alkalmazásával. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(3), 25–38. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.3.3>
- HLINKA, József – ERŐSS, László D. – FENDRIK, Ármin – BÁN, Krisztián (2023): Changes in Mechanical Properties Due to Heat Treatment on Additive Manufactured Ti-64Al-4V. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 25(1), B1–B6. Online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.001>
- HEGEDŰS, Ernő – GÁVAY, György – SEBŐK, István – TENCZEL, Martin B. (2024): Topológiai optimalizálás, generatív tervezés és a 3D-nyomatás: Az additív gyártástechnológia ipari alkalmazhatóságának vizsgálata. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(2), 141–154. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.2.10>
- HORVÁTH, Tibor – SZATAI, Zsolt J. (2020a): A History of Detection of Explosive Devices 1. (700–1950). *Land Forces Academy Review*, 25(3), 189–200. Online: <https://doi.org/10.2478/raft-2020-0023>
- HORVÁTH, Tibor – SZATAI, Zsolt J. (2020b): A History of Detection of Explosive Devices 2. (1951 to the Present). *Land Forces Academy Review*, 25(4), 290–301. Online: <https://doi.org/10.2478/raft-2020-0035>
- JANBAIN, Mohamad (2025): *DLP technológia: lehetőségek és kihívások az additív gyártásban*. Online: <https://3druck.com/hu/ipar/dlp-technologia-lehetosegei-es-kihivasai-az-additiv-gyartasban-25143063/>
- MARKOVITS, Tamás – ERŐSS, László D. – FENDRIK, Ármin (2023): Analysing the Generative Design of Payload Part for the 3D Metal Printing. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, 25(1), B45–B51. Online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.010>

- MCCLEMENTS, Dean (2022): *SLA vs. DLP: Differences and Comparison*. Online: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/sla-vs-dlp-3d-printing/>
- MUKHTARKHANOV, Muslim – PERVEEN, Asma – TALAMONA, Didier (2020): Application of Stereolithography Based 3D Printing Technology in Investment Casting. *Micromachines*, 11(10). Online: <https://doi.org/10.3390/mi11100946>
- NÉGYESI, Imre – FAZEKAS, Ferenc (2022): A mesterséges intelligencia integrálásának lehetőségei a vezetési pontok feladatrendszerébe. *Hadtudományi Szemle*, 15(3), 145–159. Online: <https://doi.org/10.32563/hsz.2022.3.9>
- PADÁNYI, József (2024): *The Effects of Climate Change on the Military. Risks, Challenges and Answers*. Budapest: Ludovika University Press. Online: <https://doi.org/10.36250/01185>
- PAGAC, Marek et al. (2021): A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, 13(4). Online: <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Raise3D (2025): *Military 3D Printing: How is Additive Manufacturing Changing the Defense Industry*. Online: <https://www.raise3d.com/blog/military-defense-3d-printing/>
- Rapid Factory (s. a.): *SLA nyomtatás – Sztereolitográfia*. Online: <https://www.rapidfactory.hu/szolgaltatasok/sla-nyomtatás>
- SWETHA, S. et al. (2024): Review on Digital Light Processing (DLP) and Effect of Printing Parameters on Quality of Print. *Interactions*, 245. Online: <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02018-5>
- VÉG, Róbert L. (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 L. (2024): Forgó dugattyús befecskendezőszivattyúk a harc- és gépjárműtechnikában: Befecskendező szivattyú tehermentesítő szelep oktatási célú modell kialakítása 3D-nyomtatási technológiával. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(Ksz.), 115–128. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.kszi.10>
- ZHANG, Jiumeng – HU, Qipeng – WANG, Shuai – TAO, Jie – GOU, Maling (2020): Digital Light Processing Based Three-dimensional Printing for Medical Applications. *International Journal of Bioprinting*, 6(1). Online: <https://doi.org/10.18063/ijb.v6i1.242>

Mentolai Sebastian¹ 

Robbanóanyag-analitikai vizsgálati módszerek alkalmazása a robbanóanyagokkal elkövetett bűncselekmények felderítésében

The Use of Explosives Analysis Methods in the Detection of Crimes Committed with Explosives

Cikkem tárgyát a robbanóanyagok analitikai vizsgálata képezi. A kérdés – amelyre írásomban választ keresek –, hogy milyen módszerekkel lehet a legpontosabban detektálni/analizálni robbanóanyagokat. Az utóbbi évtizedekben a tudomány gyors fejlődésével és a terrorcselekmények elkövetésének növekvő számával már rendelkezésre állnak olyan modern, nagy hatékonyságú módszerek és eljárások, amelyekkel a robbanóanyagból nyert minta alapján azonosításuk megoldhatóvá válik. Továbbá olyan analitikai vizsgálati módszereket kívánok bemutatni, amelyekkel a robbanóanyaggal érintkezett felületeken, a robbanóanyagnyomok azonosítása, a rejtett robbanóanyagok jelenléte kimutatható. Ma már teljesen hétköznapi eljárásnak számít az olyan mérőberendezések használata a szerves vegyületek azonosítása terén, mint a kromatográfia. Az ilyen mérőberendezéseket kémiai vegyületek elválasztására fejlesztették ki, de egy vizsgálható komponensre specifikus detektálási rendszerrel kiegészítve hatékony azonosítási módszer jöhet létre velük.

Kulcsszavak: robbanóanyagok felderítése/detektálása, robbanóanyagok analitikai vizsgálatainak módszerei, eszközei, spektrométer, kromatográfia

The subject of my article is the analytical examination of explosives. The question – which I am trying to answer in my article – is what the most accurate methods are to detect/analyse explosives. Over the last decades, with the rapid development of science and the increasing

¹ Robbantástechnikai szakember, vegyész, e-mail: sebastianmentolai@protonmail.com

number of terrorist attacks, modern, highly efficient methods and procedures are now available to identify them from a sample of explosive material. Furthermore, I want to introduce analytical testing methods which can be used to identify traces of explosives on surfaces that have come into contact with explosives and to detect the presence of hidden explosives. Today, the use of analytical techniques such as chromatography to identify organic compounds is considered a routine procedure. Such measuring instruments were basically developed for the separation of chemical compounds, but when combined with a detection system specific to the component being analysed, they can serve as an effective method of identification.

Keywords: *explosives detection, methods and instruments for analytical testing of explosives, spectrometer, chromatography*

Bevezetés

A robbanóanyaggal elkövetett bűncselekmények, különösen a robbantásos merényletek, a modern terrorizmus gyakori eszközei közé tartoznak. A robbanóanyagok könnyű hozzáférhetősége és nagy pusztító ereje miatt a terroristák gyakran választják ezt az eszközt, mivel képesek vele jelentős anyagi károkat okozni és félelmet kelteni a társadalomban. A robbantásos merényletek különösen hatékonyak lehetnek, ezekkel nagyobb tömegeket tudnak célba venni, és a médián keresztül világszerte félelmet generálhatnak. Ezek az „akciók” gyakran szimbolikusak, mivel sok esetben politikai vagy társadalmi jelentőségű helyeket, személyeket céloznak. A terroristák gyakran rejtett robbanóeszközöket (improvizált robbanószerkezet, IED) használnak, amelyek civil környezetben különösen hatékonyak.² A modern terrorizmus fő céljai közé sorolható a társadalmi rend destabilizálása, politikai követelések kikényszerítése és a kormányzati rendszerek megbénítása. A robbantásos merényletek hirtelen és szélsőséges módon demonstrálják az elkövetők erejét és hatalmát. A politikai motivációjú terrorizmus esetében a robbanóanyagok alkalmazása gyakran arra irányul, hogy félelmet keltsen a lakosságban és nyomást gyakoroljon a politikai vezetőkre. Az elmúlt évtizedekben a robbantásos merényletek számos országban váltak a terrorizmus fő módszereivé, legyen szó akár Közel-Keletről, Európáról vagy Észak-Amerikáról. A nemzetközi terrorszervezetek, mint az al-Káida vagy az Iszlám Állam, rendszeresen alkalmazzák ezt a módszert. Az ilyen jellegű támadások globális mérete és hatása miatt a nemzetközi közösségek és a kormányok számára komoly kihívást jelent a megelőzésük és elhárításuk. A robbanóanyagokkal elkövetett merényletek súlyos következményekkel járnak a társadalomra nézve. Nemcsak az emberi életeket veszélyeztetik, hanem a közbiztonságba vetett bizalmat is aláássák. A gyakori merényletek destabilizálhatják a közrendet, gazdasági visszaesést idézhetnek elő, és növelhetik a társadalmi feszültségeket. A robbantások pszichológiai hatása is rendkívül erős, a támadások kiszámíthatatlansága állandó félelemben tartja a lakosságot.³

Nemcsak a terrorizmus, hanem a szervezett bűnözés is egyre gyakrabban alkalmaz robbanóanyagokat céljai elérése érdekében. Az alvilági csoportok számára a robbantásos

² KOVÁCS 2012; DARUKA 2012: 33.

³ DARUKA 2013a; DARUKA 2013b.

merényletek hatékony módszert kínálnak rivális szervezetek vagy állami hatóságok megfélemlítésére. A robbanószerek használata ezekben a körökben a gazdasági érdekek védelmére, illetve az illegális üzletek, például a kábítószer-kereskedelem és az embercsempészet biztosítására szolgálhat. Ezzel a módszerrel erőteljes üzenetet küldenek, hogy képesek akár szélsőségesen erőszakos eszközökkel is megvédeni pozícióikat.

A robbantásos merényletek elleni küzdelem egyik kulcsa a nemzetközi együttműködés. A robbanóanyagokkal kapcsolatos bűncselekmények megelőzése és felderítése érdekében a kormányok és nemzetközi szervezetek különféle jogi, technológiai és hírszerzési eszközöket alkalmaznak. A hátrvédelem erősítése, a robbanóanyagok nyomon követése és a terrorista hálózatok felderítése mind fontos lépések ebben a harcban. A hatóságoknak nehézséget okoz az ilyen típusú támadások megelőzése, mivel a robbanóanyagok előállításához és felhasználásához szükséges anyagok és technológiák viszonylag könnyen beszerezhetők. A robbantásos bűncselekmények számának növekedése újfajta kihívások elé állította a bűnüldöző szerveket, akiknek gyorsan és hatékonyan kell reagálniuk a fenyegetésekre. Az ilyen bűncselekmények felderítése gyakran bonyolult és technikailag összetett, mivel a robbanószerek használatával elkövetett bűncselekmények után maradt robbanóanyagnyomok aprók (még mérőműszerekkel is igen nehezen detektálhatók), könnyen eltűnhetnek, vagy nehezen értelmezhetők. A bűnüldöző szerveknek ezért egyre inkább szükségük van a legmodernebb technológiákra, például robbanóanyag-analitikai módszerekre, hogy pontosan azonosítani tudják a felhasznált anyagokat, a robbanás mechanizmusát, és összekapcsolhassák azokat bűnözői csoportokkal vagy korábbi bűncselekményekkel. A robbantásos merényletek megelőzéséhez szigorú jogszabályok és kontrollmechanizmusok szükségesek a robbanóanyagok gyártása, tárolása és szállítása terén. Az illegális robbanóanyag-kereskedelem elleni fellépés, valamint a lehetséges terrorista vagy bűnözői csoportok megfigyelése kulcsfontosságú a megelőző intézkedések sikeressége szempontjából. Számos nemzetközi fórum, köztük az Egyesült Nemzetek Szervezete (ENSZ), a Nemzetközi Bűnügyi Rendőrség Szervezete (Interpol) és az Európai Unió (EU) is kiemelt figyelmet fordít a robbantásos merényletek elleni küzdelemre, különösen a terrorizmus és a szervezett bűnözés visszaszorításával kapcsolatban. Egyezményeik támogatják a közös hírszerzési és bűnüldözési együttműködést, valamint ösztönzik a robbanóanyagokkal kapcsolatos jogszabályok harmonizálását. Az ilyen együttműködések során megosztott információk és technológiák segítenek abban, hogy a bűnüldöző szervek gyorsabban és hatékonyabban reagáljanak a robbantásos fenyegetésekre. Ezek a bűncselekmények nagyon súlyos büntetőjogi következményekkel járnak, mivel veszélyeztetik a közbiztonságot, az emberéleteket, és jelentős anyagi károkat okozhatnak. Magyarországon a Büntető törvénykönyv (Btk.) részletesen szabályozza a robbanóanyagokkal kapcsolatos bűncselekmények büntetését, ami magában foglalhatja a hosszú távú börtönbüntetést, valamint a robbanóanyagokkal kapcsolatos eszközök elkobzását. Az ilyen bűncselekmények felderítése és megelőzése érdekében a hatóságok figyelmet fordítanak a robbanóanyagok előállításához szükséges alapanyagok ellenőrzésére, és szigorúan felügyelik azok beszerzését és felhasználását. Az igazságügyi szakértők, mint például tűzszerészek vagy vegyészek, munkája kulcsfontosságú a bűncselekmények kivizsgálásában. Ők a helyszínen talált bizonyítékokat és nyomokat elemzik annak érdekében, hogy rekonstruálják az elkövetés eszközét és módját. Például egy robbanószervezet esetén a tűzszerész szakértő elemzi a szerkezet alkatrészeit, a felhasznált anyagokat (például elektronikus vezérlőmechanizmus) és a robbanás körülményeit.

Robbanóanyagokkal kapcsolatos ügyekben az igazságügyi vegyész szakértő feladatai különösen fontosak, mivel ezek az anyagok speciális kezelést és elemzést igényelnek. Ilyen esetekben a szakértő feladatai az alábbiakra terjedhetnek ki:

- robbanóanyagok azonosítása – a helyszínen vagy a bűncselekménnyel kapcsolatosan talált robbanóanyagok (például dinamit, TNT,⁴ ANDO⁵) típusának meghatározása, valamint összetételük vizsgálata;
- szakvélemény készítése – a vegyész szakértő elkészíti szakvéleményét, és szakértőként hallgatják meg a bíróságon, ahol ismerteti a robbanóanyagokkal kapcsolatos megállapításait, hogy segítsen az igazság szolgálatában.

A robbanóanyagokra irányuló kémiai vizsgálatok fontosak lehetnek terrorcselekmények, balesetek vagy más bűncselekmények során, amelyek összefüggésbe hozhatók a robbanóanyagokkal. Ma ezt a feladatot – Magyarországon – 1994 óta elsődlegesen a Nemzetbiztonsági Szakszolgálat Szakértői Intézete látja el.

Robbanóanyagok kémiai csoportosítása analitikai szempontból

A téma feldolgozásához elengedhetetlenül szükséges a különböző tulajdonságú robbanóanyagok osztályozása. Természetesen erre többféle módszertan létezik (halmazállapotuk, összetételük és felhasználási területük alapján), de most számunkra a legfontosabb a kémiai összetételük alapján történő csoportosítás, mert ez az információ határozza meg, hogy milyen vizsgálatot használjunk a kimutatásukra.

Hogy egy robbanóanyag egynemű (alap) vagy összetett (keverék), az csupán azt határozza meg, hogy egy vagy több vegyületből áll. Célszerű az egynemű (alap) robbanóanyagokat szerves és szervetlen vegyületekre felosztani (1. táblázat), már csak abból a szempontból is, hogy a vizsgálatok során melyik analitikai módszert használjuk.

1. táblázat: A robbanóanyagok kémiai összetétel szerinti csoportosítása

Egynemű (alap) robbanóanyagok	
Szervetlen vegyületek	Szerves vegyületek
Salétromsav sói	Nitrovegyületek
Azidok	Nitrát-észterek
Fulminátok	Nitraminok
Klorátok	Peroxidok
Perklorátok	Szerves sók

Forrás: LAPAT 2002: 16.

⁴ Trinitrotoluol.

⁵ Ammónium-nitrát és gázolaj keverék.

Fontos megjegyezni, hogy a keverékeken belül is megkülönböztetünk olyan keverékeket, amelyek összetevői önmagukban nem, csak megfelelő módon és mennyiségben elegyítve válnak robbanóképessé. A keverékben fellelhető egyes összetevők csupán a fizikai megjelenésükért – ilyenek például a robbanóanyag formázhatóvá tételéért felelős plaszticizáló anyagok –, más alkotóelemek a robbanási tulajdonságokért felelnek. Ezeknek az adalékanyagoknak az arányai nagyon fontosak egy keverékben, meghatározzák a robbanóanyag munkavégző képességét. Adalékanyagok például a fémporok, amelyek a robbanóanyaghoz adagolva – de csak egy bizonyos mértékig, ugyanis egy határon túl már csökkentik a robbanóanyag hatékonyságát – magasabb robbanási hőmérsékletet biztosítanak, amely megnöveli a keletkező gázok hőmérsékletét és a robbanóanyag romboló hatását.

A fejezetben leírtakból jól látszik, hogy ha robbanóanyag-analízist akarunk végezni, akkor a vegyületeknek igen széles körét kell megvizsgálni, és ezekre megfelelő vizsgálati módszereket kell kidolgozni, valamint alkalmazni. A tudomány fejlődésével már rendelkezésre állnak olyan mérőberendezések, amelyekkel a beazonosítás megoldható.

Robbanóanyagok detektálásának elvei és módszerei

Az előző fejezetben tárgyalt robbanóanyagok fontosabb robbanási tulajdonságainak jellemzésére és mérésére különleges fizikai és kémiai módszereket fejlesztettek ki. Ezekkel többek között mérhető a detonációsebesség, a robbanási és detonációs nyomások és a hőmérséklet, illetve meghatározhatók az érzékenységi adatok, valamint a brizancia. A különböző robbanóanyagokkal elkövetett bűncselekmények nyomozásakor az analitikai kémia alapvető a robbanóanyagok azonosításában. Az igazságügyi vegyész szakértők különböző módszereket alkalmaznak annak megállapítására, hogy egy adott környezetben található-e robbanóanyag vagy annak bármely összetevője.

A robbanóanyagok analitikai vizsgálati módszerei klasszikus kémiai és műszeres mérési eljárásokat foglalnak magukban, amelyek lehetővé teszik a korábban ismeretlen összetételű anyagok robbanóanyagként való kimutatását, azonosítását és mennyiségi meghatározását.⁶

Amíg a detektálás általában azt jelenti, hogy egy vizsgált anyag a robbanóanyag melyik kémiai csoportjába tartozik (például nitrovegyület), addig az azonosítás a robbanóanyag kémiai szerkezetének a meghatározását jelenti.

A robbanóanyagokkal kapcsolatos bűncselekmények nyomozásában a hatóság munkáját az igazságügyi vegyész szakértő által végzett analitikai mérésekre alapozott szakvélemény támogatja.⁷

Az analitikai vizsgálatok célja a robbanóanyag kimutatása különböző robbantásos eseményeknél, robbanóanyaggal érintkezett felületeken robbanóanyagnyomok azonosítása és rejtett robbanóanyagok (például repülőtéren ellenőrzések során) jelenlétének kimutatása. Az esetek többségében az ismeretlen anyagok kémiai szerkezetének meghatározása általában minőségi (kvalitatív), és csak részben van szükség mennyiségi (kvantitatív) elemzésére.

⁶ LAPAT 2002: 24.

⁷ LAPAT 2002: 25.

A laboratóriumi gyakorlat során az analitikai kémiában széles körben használt módszereket alkalmaznak, mint például a kromatográfiát és a spektrometriát. Ugyanakkor léteznek olyan speciális berendezések és eljárások, amelyeket kifejezetten robbanóanyagok vizsgálatára fejlesztettek ki. Külön kategóriát alkotnak a nem laboratóriumi környezetben, például repülőtereken, határátkelőhelyeken és terepen használt robbanóanyag-detektorok. Ezek a nagy laboratóriumi műszerek, mint a gázkromatográfok és ionmobilitás-spektrométerek, hordozható, kicsinyített változatai. Az előzőek alapján célszerű a vizsgálati módszereket és eszközöket a laboratóriumi és nem laboratóriumi környezetben való alkalmazásuk szerint áttekinteni.

Robbanóanyagok laboratóriumi analitikai, vizsgálati módszerei

A kémia analitikában használatos műszerek és eljárások igen tág köre alkalmazható a robbanóanyagok azonosítására.⁸

- klasszikus analitikai módszerek, amelyek színreakciókon alapulnak;
- spektrofotometriás módszerek, ezek közül is az infravörös spektroszkópia (IR), azon belül is a Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR), tömegspektrometria (MS) és ritkább esetben az ultraibolya (UV) és látható (VIS) spektroszkópia, mágneses magrezonancia (NMR) és a lumineszcencia spektroszkópia;
- kromatográfiai módszerek, elsősorban vékonyréteg-kromatográfia (TLC), gázkromatográfia (GC), nagyhatékonyságú folyadékkromatográfia (HPLC), ionkromatográfia (IC);
- továbbá a fent említett technológiák összekapcsolása, főként gázkromatográf-tömegspektrometria (GC-MS) és a nagyhatékonyságú folyadékkromatográfia-tömegspektrometria (HPLC-MS).

Az ismeretlen robbanóanyagok vegyületeinek azonosítása, akárcsak az analitikai kémiában általában, a lehető legszélesebb körű módszerek alkalmazásával nyert kromatogramok és spektrumok standardokkal való összehasonlító elemzésén és értékelésén alapul.⁹

A robbanóanyag-analízis során elsősorban a robbantásos bűncselekmények helyszínén fellelhető, fel nem robbant robbanóanyag-maradványok azonosításának van nagy jelentősége. Ugyanakkor a visszamaradt maradványok nagy nehézségek elé állítják a szakértőket; a vizsgált anyagmennyiségek igen kis koncentrációban vannak jelen, ám jóval nagyobb koncentrációban a szennyező anyagok (például olaj, por stb.). Elengedhetetlen, hogy a laboratóriumi méréseket alapos minta-előkészítési folyamat előzze meg. Ebben a folyamatban mechanikai tisztítási eljárások, valamint oldószeres és szilárd fázisú extrakció (SPE) vagy szilárd fázisú mikroextrakció (SPME) zajlanak.

⁸ YINON–ZITRIN 1993.

⁹ LAPAT 2002: 26.

Robbanóanyagok rejtett, külső helyszíni kimutatásának eszközei, módszerei

A külső helyszíneken – vagyis ahol nincs lehetőség laboratóriumi körülmények kialakítására – a robbanóanyagok detektálása fontos, érzékeny, speciális eszközöket igénylő feladat. Egy robbanás bekövetkezésekor a helyszínen el nem robbant robbanóanyagok elhelyezkedése mobil detektorok segítségével felderíthető. Az ilyen detektorok különböző működési elvekkel rendelkeznek. Az egyik ilyen eszköz képes észlelni a levegőben lévő, illetve a tárgyakra vagy személyekre (bőrre, ruházatra) tapadt részecskéket. A működése során a berendezés először felmelegíti a beszívott levegőmintát, majd UV-fény vagy sugárzóanyag segítségével gerjeszti a benne található molekulákat, amelyeket ezután elemeire bont. A kapott spektrumot összehasonlítja a belső adatbázisában tárolt, tiltott anyagok spektrumával. Ezáltal célirányosan összegyűjthetők azok az anyagmaradványok, amelyek elősegíthetik a laboratóriumi vizsgálatok eredményességét és a robbanóanyag kémiai szerkezetének meghatározását. Mára már számos típusú robbanóanyag-detektort fejlesztettek ki, amelyeket olyan területeken alkalmaznak, ahol jelentős esély van terrorcselekmények elkövetésére (például repülőterek, országhatárok, ipari létesítmények, kormányépületek).

A leírtak alapján látszik, hogy a cél a robbanóanyagok vagy nyomainak detektálása. Működésük alapján két fő típusuk van a detektoroknak: az egyik a robbanóanyag tömegét méri, a másik a robbanóanyagból kipárolgó részecskék detektálásán alapul.

Robbanóanyag tömegét érzékelő eszközök és módszerek

Az ebbe a csoportba tartozó robbanóanyag-detektorok ionizáló (röntgen, gamma, neutron) és nem ionizáló (mikrohullám) sugárzása és a vizsgált anyag atomjai között létrejött kölcsönhatás révén érzékelik a vizsgálandó robbanóanyagot. A törvénytelenül szállított robbanóanyagokat a „felhasználók” a legügyesebb módokon próbálják elrejtetni a hatóságok elől, ezért a sikeres vizsgálatoknak előfeltétele, hogy az elektromágneses sugárzás megfelelő mélységig hatoljon be a vizsgált tárgyba. Az ilyen típusú berendezések két alapvető fizikai jelenség alapján működnek:

- röntgensugárzás elnyelődése (abszorpció);
- a vizsgált vegyületet alkotó atomok (elsősorban nitrogén) atommagjainak és a gamma-sugárzásnak a kölcsönhatása.

Az első csoportba tartozó készülékek nem mások, mint a hagyományos röntgenkészülékek továbbfejlesztett változatai, amelyek azonos időben két- vagy többenergiás röntgensugárzást alkalmaznak. Ezáltal a nagyobb sűrűségű szerves vegyületek – mint például a robbanóanyagok – képe is látható válik, nemcsak a nagy elnyelőképességű fémeké. Azonban az utóbbi években az orvosi gyakorlatban használt komputertomográfias (CT) berendezések továbbfejlesztett változatai is hatékonyan alkalmazhatók a robbanóanyagok felismerésére.

A második csoportba tartozó készülékek a gamma-sugárzás magrezonancia elnyelődése alapján határozzák meg a nitrogén eloszlását az adott térben, ami akár robbanóanyag jelenlétére is utalhat.

Továbbá, a nem ionizáló sugárzást alkalmazó detektorok kifejlesztésére is nagy figyelmet fordítanak főleg egészségvédelmi okok miatt. Az egyik ilyen detektor a mágneses magrezonancia (NMR) spektrométer, ahol a mérés alapját a mikrohullámok és az atommag kölcsönhatásából adódó mérések adják.

A robbanóanyag kipárolgását érzékelő eszközök és módszerek

Ebbe a csoportba olyan készülékek tartoznak, amelyek a robbanóanyagból kipárolgó, légnemű vagy adott szilárd felületen megkötött részecskék kimutatására alkalmasak. Az ilyen berendezések az alábbi analitikai mérőműszerek módszerein alapszanak:

- gázkromatográfia (GC);
- ionmobilitás-spektrometria (IMS);
- az előző kettőnek az összekapcsolása.

Az ilyen készülékekkel szemben a következők az elvárások:

- az érzékenyséjük nagy legyen (a robbanóanyagok kis koncentrációban vannak jelen);
- gyors, hatékony detektálási idő (rövid idő alatt kell nagy mennyiségű csomagot átvizsgálni);
- szelektív legyen (más anyagok ne zavarják az észlelést).

„A gázkromatográfiás elválasztási folyamat viszonylag hosszú időt vesz igénybe, ezért ezen műszerek tervezésénél a rövid kolonnák, a nagy gázáram és a gyors felfűtési program alkalmazásával igyekeznek csökkenteni ezt az időt. Azonban ez a szelektivitás rovására megy. Ezekben a készülékekben szinte mindig elektronbefogásos detektort (ECD) és kemilumineszcens nitrogénszelektív detektort (CLND) használnak. Az utóbbi jelentős előnye, hogy kizárólag nitrogén tartalmú vegyületek, például a legtöbb robbanóanyag érzékelésére alkalmas, ami nagymértékben növeli a berendezések szelektivitását és érzékenységét.”¹⁰

A nagy érzékenység ugyanakkor lehet hátrány is, mint például az ionmobilitás-spektrometria elvén működő készülékek esetében. Ilyenkor az történik, hogy a nem robbanóanyag-vegyületeket tévesen robbanóanyagnak érzékeli a műszer (például a kozmetikumok egy részében lévő ámbra), mert a kis méretű áramlási cső nem teszi lehetővé a hatékony elválasztást a robbanóanyag és a hasonló kémiai szerkezettel rendelkező nem robbanóanyag-vegyület között. Ezért ma már az ionmobilitás-spektrométer detektorként szerepel a gázkromatográf után, ami az elválasztásért felelős.

Robbanóanyagnyomok kimutatása a helyszínen

A robbantás utáni anyagmaradványok vizsgálata sokkal nagyobb kihívást jelent, mint a robbanóanyagok közvetlen elemzése. Ennek több oka is van. A robbanás során az eredeti

¹⁰ LAPAT 2002: 31.

robbanóanyag „átalakul”, és csak bomlástermékek és nyomnyi mennyiségű eredetben szóródott robbanóanyag marad vissza, amelyeket sokkal nehezebb azonosítani. A helyszínen lévő egyéb anyagok (például építőanyagok, por, fémek) keveredhetnek a robbanóanyag-maradványokkal, ami tovább bonyolítja az elemzést. A nyomnyi mennyiségben jelen lévő robbanóanyag-összetevők megfelelő kivonása és koncentrációja elengedhetetlen a pontos analízishez. A helyszíni szemle és mintavétel különösen fontos, hiszen a bizonyítékok gyorsan megsemmisülhetnek vagy elveszhetnek. Ezért az igazságügyi vegyész szakértőnek nemcsak laboratóriumi, hanem helyszíni tapasztalatokkal is rendelkeznie kell.

Az alkalmazott robbanóanyag pusztító hatásának behatárolása

Egy robbantásos bűncselekmény során az egyik legnehezebb és egyben legfontosabb feladat az alkalmazott robbanóanyag típusának a behatárolása az analitikai vizsgálatok előtt. Ez az információ rendkívül értékes lehet a helyszíni vizsgálatok résztvevői számára, mivel jelentős szerepet játszhat a vizsgálatok irányának meghatározásában, és fontos alapot nyújthat a hatóságok nyomozati munkájához.

Ha a helyszínen nem található szabad szemmel is jól látható robbanóanyag-maradvány vagy egyéb úton felismerhető nyom, akkor az elsődleges behatárolás a robbanás környezetre gyakorolt hatásának figyelembevételével történik. Ezeknek a megfigyeléseknek elsősorban a nyomásváltozást, a hőmérséklet és a fragmentáció által okozott változásokat kell figyelembe vennie. Ebből az információból a robbanóanyag még nem azonosítható, viszont már el lehet dönteni, hogy detonáló vagy detonációra nem képes (például lőpor) robbanóanyagról van-e szó.

A detonációra nem képes robbanóanyagokra a gyors égés a jellemző (deflagráció). Deflagráció során a kémiai reakció frontja a fel nem robbant anyagban a hangsebességnél kisebb sebességgel halad és pulzálva terjed. Az elkövetők a nagyobb robbanóhatás eléréséért az ilyen típusú robbanóanyagokat általában lezárt térben (például csőbomba) alkalmazzák.

A detonációra képes robbanóanyagok során bekövetkezett robbanás jóval „látványosabb” hatásokat produkál. Az anyagban a reakciózóna által gerjesztett ütőhullám hangsebességgel halad. A környezetre jelentős nyomásváltozás hat, amely igen rövid ideig tart, és rendkívül magas értéket képvisel.

Robbanóanyag meghatározása helyszíni vizsgálatok során

Ma már számos lehetőség van arra, hogy a robbantás helyszínén műszeres analitikai vizsgálatokat végezzünk. Rendelkezésre állnak olyan hordozható robbanóanyag-detektorok, amelyeket a robbanóanyagból, illetve a robbanás után a nyomokban visszamaradt maradékból kipárolgó, gőz halmazállapotú vagy szilárd felületen adszorbeált részecskék kimutatására fejlesztettek ki. Az esetek többségében ilyen készülékeket a repülőtereken alkalmaznak, ahol nagyszámú személy és csomag átvizsgálására van szükség rövid idő alatt, de igen jól alkalmazhatók a robbantásos bűncselekmények helyszínein is.

A másik helyszínen is alkalmazható és a robbanóanyag jelenlétét jelezni képes analitikai módszer a színreakciós tesztkészletek hordozható változata (például ELITE termékcsalád).

A robbanóanyagok analitikai vizsgálatainak módszerei, eszközei

A robbanóanyagok elemzése során elkerülhetetlen, hogy a vizsgálati (főleg a helyszíni) minták ne legyenek szennyezettek. A gyakorlatban a mintavételezés során a robbanóanyagok és egyéb szennyezők keverékével kell dolgozni, ezért a komponensek szétválasztása létfontosságú.

Minta-előkészítés

A minta-előkészítés különösen fontos a robbantásos merényletek után vizsgált anyagmaradványok feldolgozásában. A szakértői munka során a mintavételezés és a különböző analitikai eljárások, legyen az műszeres vagy nem műszeres, kulcsszerepet játszanak.

A minta-előkészítési eljárások céljai a következők:

- a robbanás helyszínéről összegyűjtött mintákból a lehető legnagyobb mennyiségű fel nem robbant robbanóanyag-maradvány kinyerése, akár a minták anyagából, akár azok felületéről;
- a keletkezett oldat koncentrációja és dúsítása;
- a kinyert robbanóanyag tisztítása.

A tisztítási módokra most nem térek ki, inkább áttérek a robbanóanyag vizsgálatának eszközeire, módszereire.



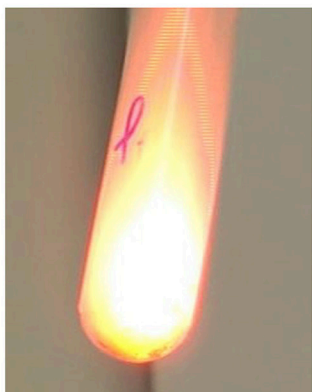
1. ábra: Egy anyag égéspróbája

Forrás: LAKITS 2023: 39.

Fizikai vizsgálatok

Számos lehetőség áll rendelkezésünkre egy anyag fizikai paramétereinek jellemzésére. Ilyenek például a szín, szag, halmazállapot, kristályszerkezet, éghetőség és oldhatóság vizsgálata. Ha szerencsénk van, és elegendő robbanóanyag-minta áll a rendelkezésünkre, akkor ezeket a fizikai méréseket gyorsan és egyszerűen elvégezhetjük. Ez a megközelítés lehetővé teszi az irreleváns anyagok kiszűrését. Jól példázza ezt az égéspróba: az anyagot lángba tartjuk, és ha nem tapasztalunk rajta látható változást, akkor biztosak lehetünk abban, hogy az nem robbanóanyag vagy pirotechnikai anyag. Az égéspróba során a minta egy kis részét vegyszeres kanálra (vagy spatulára) helyezük, majd gázlángba tartjuk. Ezzel megállapítjuk, hogy az anyag éghető-e, illetve információt kaphatunk az égésének a sebességéről (lassan, lánggal elég; szikrázva gyors égése következik be; adott esetben a másodperc töredéke alatt ellobban) (1. ábra).

A kémcsőben végzett hevítés szorosan kapcsolódik az égéspróához; nemcsak az anyag éghetőségéről ad tájékoztatást, hanem további hasznos információkat is nyújt számunkra. A vizsgálati módszer során a minta egy kis részét kémcsőbe helyezük, majd gázláng fölött óvatosan hevíteni kezdjük, miközben figyelemmel kísérjük a változásokat. Tiszta robbanóanyag esetén a minta legjobb esetben is csupán megolvad, majd ellobban (2. ábra).



2. ábra: Elpuffanás kémcsőben
Forrás: LAKITS 2023: 40.



3. ábra: Kén jelenlétének kimutatása hevítéssel
Forrás: LAKITS 2023: 40.

A fokozatos hevítés következtében a feketelőporban található kén gőz halmazállapotban elpárolog, majd a kémcső hűvösebb részén kondenzálódik, ami a kémcső falának elszárgulását eredményezi (3. ábra).

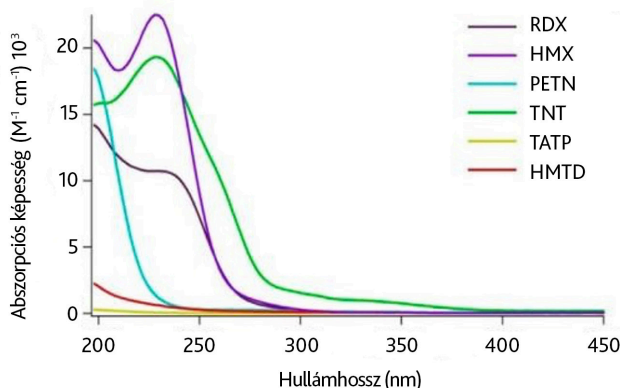
Kolorimetrikus vizsgálatok

A kolorimetria a kémiai elemzésben alkalmazott szín-összehasonlító eljárás. E módszer célja, hogy azonosítson egy összetett vegyületet vagy vegyületcsoportot. A folyamat lényege, hogy amikor egy adott vegyület vagy vegyületcsoport reagál a megfelelő reagenssel, a keletkező szín

alapján következtethetünk a vegyületre vagy vegyületcsoportra. Ez a technika lehetővé teszi a robbanóanyagok gyors helyszíni észlelését. További előnye, hogy olcsó és könnyen kezelhető. Azonban az egyik legnagyobb hátránya, hogy a robbanóanyagok azonosításának pontossága alacsony. Más szóval, nem lehet elég nagy biztonsággal meghatározni a robbanóanyagokat, más laboratóriumi módszerek alkalmazása is szükséges. A vizsgálat során azt is figyelembe kell venni, hogy a nem robbanóanyagok is képesek ugyanazt a szintet produkálni azonos kísérletek során, mint a robbanóanyagok. Viszont kiválóan alkalmas előszűrésre a műszeres vizsgálatok előtt.

Spektroszkópiai vizsgálatok

Az elektromágneses sugárzásból az ember érzékszerveivel csak nagyon szűk tartományt érzékel. A látható fény két szélén elhelyezkedő – infravörös és ultraibolya – tartomány nagyon jól használhatók analitikai elemzésekre. A spektrum, más néven színekép, az analitikai jel (intenzitás vagy abszorbancia) hullámhossz, frekvencia vagy hullámszám szerinti ábrázolása. Ez a spektroszkópiai információ tömör megjelenítését jelenti, ami lehetővé teszi a minta minőségi jellemzését. Számos anyag képes UV-fényt elnyelni (4. ábra), a fizikai és kémiai tulajdonságaiknak megfelelően. Ezek az anyagok megfelelő eszközökkel vizualizálhatók, de az így nyert információk korlátozottak.



4. ábra: UV-VIS-elenyelési spektrum

Forrás: COOPER–GRANT–ZHANG 2013: 2.

Az infravörös színekép, bár tartalmaz kvantitatív analitikai információkat, elsősorban kvalitatív célokat szolgál. Ezt a módszert a szerves és többatomos szervesetlen molekulák azonosítására, jelenlétük kimutatására, valamint különböző, esetleg új vegyületek szerkezetének meghatározására használják. Míg az UV és az IR a sugárzott spektrum bizonyos részeinek elnyelésével teszi lehetővé a vizsgálatot, a Raman-spektroszkópia a fényszóródás elvén működik. A Raman-spektrometria kiegészíti az infravörös spektrométert. Mindhárom vizsgálati

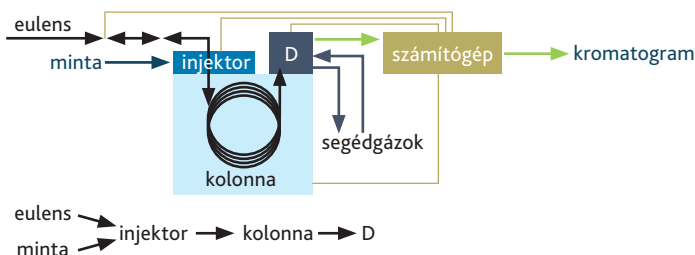
módszer alapján egyértelmű, hogy ezek az analitikai elemzések elsősorban egy komponenst tartalmazó minták vizsgálatára alkalmasak. A több komponenst tartalmazó minták elnyelési hatásai összeadódnak, ami zavarhatja a méréseket és megnehezíti az azonosítást.

Kromatográfias vizsgálatok

Az analitikai mérési módszerek nagyon ritkán szelektívek egy-egy minta adott komponensére. Ezért a mérést megelőzően mindig szükség van a zavaró komponensek eltávolítására. Az elválasztás alatt mindig térbeli elkülönítést értünk. A térben elkülönült alkotóelemek koncentrációját (mennyiségét) valamilyen szelektív detektorral mérjük. Természetesen az elválasztás nem mindig tökéletes, bizonyos anyagok a mérendő anyag mellett maradhatnak. A komponensek sebességkülönbségén alapszik a térbeli elkülönülésük. A kromatográfia a többfokozatú, nagyhatékonyságú elválasztási módszerek gyűjtőneve, a közös alapjuk, hogy az elválasztandó komponensek egy álló fázis és azon egy irányba átáramló mozgófázis (*eluens*) között oszlik meg. A kromatográfias módszerek többféleképpen csoportosíthatók.

Gázkromatográfia

A gázkromatográfia (5. ábra) a termikusan stabil, de illékony szerves és szervesetlen vegyületek elválasztására szolgáló eljárás. A gázkromatográfiába (GC) a mintát beinjektálják és elpárologtatják, majd az oszlop elején lekondenzál az anyag és a kolonnater hőprogramja szerint kerül ismét gázfázisba. A mozgófázis (*eluens*) egy áramló inert gáz, amely nem lép reakcióba sem a mintával, sem az állófázissal. Szerepe csupán annyi, hogy „átszállítsa” az oszlopon az alkotóelemeket. Az állófázis feladata, hogy a megfelelő alkotóelemeket (beoldódással, megkötődéssel, ioncserével stb.) visszatartsa, és megfelelő időt töltsenek el valamilyen módon a kolonnán. Ezáltal az állófázissal kölcsönhatásba nem lépő alkotóelemek gyorsan végighaladnak a kolonnán, míg azok az alkotóelemek, amelyek időlegesen megkötődnek az állófázison, lemaradnak. Így térben és időben megtörténik az elválasztódás. Ennek megfelelően különböző időpontban érik el a detektort is. Ezt nevezzük retenciósi időnek a kromatográfiai vizsgálatokban.



5. ábra: A gázkromatográfias készülékek általános felépítése

Megjegyzés: A kolonna termosztálva van. D: detektor

Forrás: POKOL 2011: 323.

A kapilláris technika előnyei lehetővé tették a robbanóanyagok gázkromatográfiás elválasztásának szinte teljes megoldását.¹¹ Azonban a robbantások utáni anyagmaradványok vizsgálatából szerzett tapasztalatok azt jelzik, hogy szükség van a mérési módszer érzékenységének és szelektivitásának fokozására. Ennek egyik lehetséges módja az új típusú detektorok alkalmazása. A gázkromatográfiában a lángionizációs detektor (FID) mellett széles körben alkalmazzák az elektronbefogásos detektort (ECD) is.¹² Ez a detektor bizonyos vegyülettípusokra, például a nitrovegyületekre, szelektíven és kiemelkedően érzékenyen reagál.¹³ Éppen ezért a nitrovegyületek érzékeny detektálásának képessége miatt gyakran használják robbanóanyagok elemzésére is.

Elektroforézis

A kromatográfiához hasonló módon működő másik elválasztási módszer az elektroforézis. Az elválasztás hasonlóan megy itt is végbe mind az oszlopon (kapilláris), mind a rétegben (gél-elektroforézis). A két eljárás közt a különbség az állófázisban és az áramlást biztosító erőkben van. A gázkromatográfiánál az áramlás a nyomáskülönbségen alapszik, míg az elektroforézisnél az áramlást az elektromos tér biztosítja. Az elválasztást követően számos lehetőség van a komponensek detektálására. A detektálás történhet tömegspektrométerrel vagy spektroszkópiával (UV, IR). A vizes oldatok elektroforézises vizsgálatai során meghatározhatjuk a vizes oldatban található anionok és kationok típusát. Ezek az információk lehetővé teszik a szerves robbanóanyagok összetételének megismerését. Az eredmény a hitelesített anyagminták (nagy tisztaságú, ismert összetételű minták) és a vizsgált minták azonos vizsgálati körülmények között mért retenciósi idejeinek összehasonlításából származik.

Vékonyréteg-kromatográfia

A kromatográfiás módszerek közül ez a legegyszerűbb változat, de a megfelelő minta-előkészítés után gyors és hatékony elemzést tesz lehetővé. Az elválasztás egy meghatározott méretű lapon (lehet műanyag, üveg) történik, amely szilikagél- vagy alumínium-oxid adszorbenssel van bevonva. A mérés menete során a minta oldatából cseppeket helyezünk az alapvonalra (kiindulási pont, amely a lemez alján megegyező távolságra van a lap aljától). A futtató kádba megfelelő mennyiségű oldószert (*eluens*, azaz a mozgófázis) helyezünk. Majd – vertikális típusú futtatás esetén – függőlegesen a kádba helyezzük a lapot és lefedjük. Az oldószert a mintában lévő anyagokat (foltokban) az alapvonalhoz viszonyítva különböző távolságokba juttatja el. A mozgófázis frontja az alapvonalától mért távolságainak és a foltok távolságainak aránya az adott vegyületre jellemző, amely egyben az azonosítás alapja is. A lemezen kialakult foltok különböző eljárásokkal tehetővé láthatóvá. A mi esetünkben (robbanóanyagok) az egyik módszer a színreakció, amelyet a vékonyréteg-lemezen végzünk el.

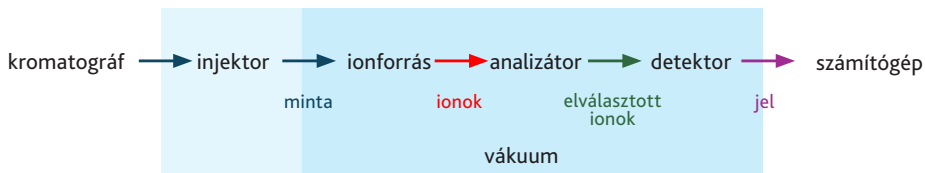
¹¹ GRANT 1995.

¹² TORKOS et al. 1995.

¹³ KOLLA 1994: 309–318.

Tömegspektrometriai vizsgálatok

A tömegspektrometria (MS) (6. ábra) alkalmas szerves és szervetlen anyagok kvalitatív (minőségi) és kvantitatív (mennyiségi) vizsgálatára egyaránt. Az analitikai műszerek között az egyik legszélesebb körben alkalmazott és legjobb érzékenységgel rendelkező eljárás, ugyanakkor specifikus is. Fontos megjegyezni, hogy a felhasználásának van egy korlátja, méghozzá az, hogy kizárólag gáz halmazállapotú vegyületek mérésére használható, vagyis a szilárd állapotú mintákat is el kell „párolgatni”.



6. ábra: A tömegspektrométer blokkdiagramja (Az injektor nem mindig van vákuum alatt)

Forrás: POKOL 2011: 289.

A tömegspektrometriás detektálás során a minőségi azonosítást a retenciós idő egyezésén túl adatbázissal való összehasonlítással végzik. Más kromatográfiához kapcsolódó detektálási módszerek esetében, ha nincs elérhető adatbázis, a retenciós idő lesz a döntő tényező. Mindazonáltal minden említett vizsgálati módszer esetében célszerű – és akkreditált rendszerben kötelező – hitelesített anyagminták referenciaként való alkalmazása, mivel ez növeli az azonosítás megbízhatóságát.

Összegzés

A tanulmány célja az volt, hogy összefoglaljam a robbanóanyagok detektálására jelenleg széles körben alkalmazott módszereket. Rámutattam, hogy a kémiai analitikában elterjedt vizsgálati eljárások kiválóan alkalmazhatók a bűnös szándékú, robbanóanyagokkal elkövetett bűncselekmények felderítésében.

Természetesen a cikkem címének részletes tárgyalása nem lehetett átfogó, mivel gyakorlatilag bármely analitikai eljárás önállóan is jelentős tudományos ismereteket foglal magában. Szándékosan elkerültem a képleteket és számítási levezetéseket, mivel a téma keretein belül és annak szélesebb összefüggéseiben szerettem volna bemutatni a releváns meghatározásokat.

A robbantási terrorcselekményektől való általános félelem arra készíti az érintett országokat, hogy komolyan foglalkozzanak a robbanóanyagok észlelésével. Az ilyen bűncselekmények utólagos következményei még nagyobb aggodalmat váltanak ki a polgárokból, ami akár meg is nehezítheti számukra a mindennapi, szabad életvitelüket.

A modern, nagy hatékonyságú detektáló eszközök jelentős anyagi ráfordítást igényelnek, azonban az érintett hatóságok számára elengedhetetlen, hogy ezeket a beruházásokat megvalósítsák, és folyamatosan fejlesszék a meglévő eszközeiket.

Úgy vélem, hogy a jövőbeli kutatások fő irányvonala továbbra is a lehető legkisebb robbanóanyag-mennyiség észlelése, valamint ennek minél gyorsabb végrehajtása lesz, akár laboratóriumi környezetben kívül is.

Felhasznált irodalom

- COOPER, K. Jason – GRANT, D. Christian – ZING, Z. Jin (2013): Experimental and TD-DFT Study of Optical Absorption of Six Explosives Molecules: RDX, HMX, PETN, TNT, TATP and HMTD. *The Journal of Physical Chemistry*, 117(29), 6043–6051. Online: <https://doi.org/10.1021/jp312492v>
- DARUKA Norbert (2012): Terroristák és taktikák, avagy védekezz, ha tudsz. *Repüléstudományi Közlemények*, 24(2), 33–41. Online: https://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/02_Daruka_Norbert.pdf
- DARUKA, Norbert (2013a): Bombers, Wires and Explosives Part II. – Death Arrives with Us. *Műszaki Katonai Közlöny*, 23(2), 64–72. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2401/1671>
- DARUKA, Norbert (2013b): Bombers, Wires and Explosives Part I. – Death within a Reach. *Műszaki Katonai Közlöny*, 23(2), 73–80. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/2403>
- GRANT, David Walter (1995): *Capillary Gas Chromatography*. London: John Wiley and Sons.
- KOLLA, Peter (1994): Gas Chromatography, Liquid Chromatography and Ion Chromatography Adopted to the Trace Analysis of Explosives. *Journal of Chromatography*, 674, 309–318. Online: [https://www.sci-hub.box/10.1016/0021-9673\(94\)85236-7](https://www.sci-hub.box/10.1016/0021-9673(94)85236-7)
- KOVÁCS Zoltán (2012): Az improvizált robbanóeszközök főbb típusai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 22(2), 37–52. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2012_2_03%20IED-k-%20f%C5%91bb%20t%C3%ADpusai%20-%20Kov%C3%A1cs%20Z.pdf
- LAKITS Gábor György (2023): *Robbanóanyag-analitikai vizsgálati módszerek alkalmazása a robbanóanyagokkal elkövetett bűncselekmények felderítésében*. Szakdolgozat. Budapest: Óbudai Egyetem.
- LAPAT Attila (2002): *Robbanóanyag-analitikai vizsgálati módszerek alkalmazása az igazságügyi szakértői munkában, szerepük a robbanóanyaggal elkövetett bűncselekmények felderítésében*. PhD-disszertáció. Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem. Online: <https://doksi.net/hu/get.php?lid=16160>
- POKOL György (2011): *Analitikai kémia*. Budapest: BME.
- TORKOS Kornél et al. (1995): *Robbanóanyag-maradványok meghatározása talajból*. Előadás. Építéstudományi Egyesület Robbantástechnikai Szakosztály 6. Nemzetközi Robbantástechnikai Kollokvium, Budapest.
- YINON, Jehuda – ZITRIN, Shmuel (1993): *Modern Methods and Application in Analysis of Explosives*. Chichester: John Wiley and Sons.

Pap Andrea,¹  Vég Róbert László² 

Térszemlélet fejlesztése a katonai logisztikában 3D-nyomtatás és számítógéppel támogatott műszaki modellezés (CAD) által – 2. rész

Developing Spatial Awareness in Military Logistics through 3D Printing and Computer-Aided Design (CAD) – Part 2

A cikksorozat első része tárgyalta a térlátás és a térszemlélet fogalmait, egyes szakmák és a katonai logisztika térszemléletének fontosságát, valamint mérési lehetőségeit. A második rész a térszemlélet fejlődésének összetett tényezőit és fejlesztési lehetőségeit vizsgálja különböző életkori szinteken, hangsúlyozva a környezeti, családi, oktatási, játék- és tapasztalati tényezők szerepét. A térszemlélet spontán alakulását életkori szakaszokra bontva mutatja be. A különféle játékok, digitális alkalmazások, valamint kézműves tevékenységek mind hozzájárulnak a vizuális és térbeli képességek fejlesztéséhez, serkentve a kreativitást, problémamegoldó és logikus gondolkodást. A sport és a kézművesség szintén jelentős szerepet játszik a térbeli orientáció, motoros készségek és szociális képességek fejlesztésében. E képességek növelése érdekében kiemelten fontos az oktatási módszerek innovációja, a digitális technológiák alkalmazása és az oktatók felkészítése. A cikk hangsúlyozza, hogy a térszemlélet fejlesztése alapvető a matematikai, természettudományos, művészeti és mindennapi problémák hatékony megértéséhez, valamint a személyes és társas készségek elvárt alakulásához. A folyamatos fejlődés érdekében elengedhetetlen a korszerű oktatási stratégiák bevezetése és a különböző szintű, életkori sajátosságokat figyelembe vevő módszerek alkalmazása, hogy a jövő generációi sikeresen navigáljanak a komplex térbeli világban.

Kulcsszavak: térlátás, térszemlélet, 3D-nyomtatás, digitális modellezés

¹ Intézetvezető egyetemi docens, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Logisztikai Intézet, e-mail: pap.andrea@uni-nke.hu

² Egyetemi docens, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Haditechnikai Tanszék, e-mail: vegh.robort@uni-nke.hu

The first part of the series discussed the concepts of spatial vision and spatial awareness, the importance of spatial awareness in certain professions and military logistics, and the possibilities for measuring it. The second part of the series examines the complex factors influencing the development of spatial perception and the possibilities for its improvement at different ages, emphasising the role of environmental, family, educational, play, and experiential factors. It presents the spontaneous development of spatial perception broken down into age groups. Various games, digital applications, and craft activities all contribute to the development of visual and spatial skills, stimulating creativity, problem solving, and logical thinking. Sports and crafts also play a significant role in developing spatial orientation, motor skills, and social skills. In order to improve students' skills, it is particularly important to innovate teaching methods, apply digital technologies, and train teachers. The article emphasises that developing spatial awareness is essential for effectively understanding problems in mathematics, science, the arts, and everyday life, as well as for the expected development of personal and social skills. In order to ensure continuous development, it is essential to introduce modern educational strategies and apply methods that take into account different levels and age-specific characteristics so that future generations can successfully navigate the complex spatial world.

Keywords: spatial awareness, spatial perspective, 3D printing, digital modeling

Bevezetés

A térsemlélet fejlődése számos tényező együttes hatásának eredménye, amelyek közé tartozik a környezet, a családi háttér, az iskolázottság, a játék és a megélt tapasztalatok. A környezeti ingerek, mint például a fizikai aktivitás és a különböző játékok jelentős mértékben befolyásolják a térsemlélet fejlődését, így változatos tapasztalatok nyerhetők, amelyek hozzájárulnak a kognitív képességek és a térbeli orientáció javításához. A térsemlélet spontán fejlődése életkorral, játékokkal és oktatási módszerekkel zajlik, de fejleszthető képesség. A csecsemőkortól kezdve a gyerekek fokozatosan sajátítják el a térbeli viszonyokat, majd az óvodás, iskolás- és serdülőkorban egyre összetettebb feladatokat végeznek, amelyek a logikus gondolkodást és a problémamegoldást is erősítik. A különböző játékok, tevékenységek és modern technológiák hatékonyan támogatják a térbeli tudatosság fejlődését, ami alapvető szerepet játszik a mindennapi életben és a tanulásban egyaránt.

A térsemlélet spontán fejlődésének szakaszai

A térsemlélet fejleszthető; hatékonysága az életkor, a nemek, az intelligencia függvényében változó. A térsemlélet fejlesztésével együtt a memória, a logikus gondolkodás és az általános tanulási képesség is fejlődik. Csecsemőkorban a térsemlélet fejlődése a világ észlelésének legprimitívebb szintjén kezdődik, az újszülöttek a környezetükből érkező ingerekre reagálnak, de még nem képesek komplex térbeli viszonyok értelmezésére. Viszont már a csecsemők is képesek a térbeli kapcsolatok alapjainak megértésére, például a tárgyak láthatósága és elérhetősége közötti kapcsolat észlelésére.

A korai gyermekkorban, ahogy a gyerekek elkezdnek járni és felfedezni a világot, a térszemléletük is egyre komplexebbé válik. Ebben a szakaszban már képesek a tárgyak helyzetének és távolságának viszonyítására. A játék során sokszor különböző formákkal és méretekkel kísérleteznek, és kezdenek felfogni olyan alapvető fogalmakat, mint a „mellett”, „alatt”, „felül” és „túl”. A mászás, futás és egyéb mozgások segítik a térbeli orientáció fejlődését.

Óvodás- és kisiskoláskorban a gyerekek a kreatív tevékenységek segítségével tovább finomítják térszemléleti képességeiket. Ebben a szakaszban már képesek lesznek a formák, méretek és színek felismerésére és az ezek közötti kapcsolatok megértésére. Egyre jobban át tudják gondolni a térrel kapcsolatos problémákat, elképzelni, hogyan lehet egy tárgyat egy másik helyre mozgatni, illetve, hogyan lehet valamit megépíteni. A konstrukciós játékok, például a blokkokkal való építés nagymértékben elősegíti a térbeli gondolkodás fejlődését.

Iskoláskorban a gyerekek már képesek absztraktabb gondolkodásra és a térbeli kapcsolatok komplexebb értelmezésére. A matematikai ismeretek (különösen a geometriai fogalmak) és a térbeli problémák megoldása során a gyerekek fejlődése tovább fokozódik. Az iskolai tantárgyak, mint a matematika és a földrajz, célzottan segítik a térszemlélet komplex fejlődését, mivel itt szakszerűbb terminológiát és módszereket ismernek meg.

Serdülőkorban a fiatalok képesek bonyolultabb térbeli problémák megoldására, és a geometriai formák, méretek és távolságok összefüggéseit már más tudományágakban (például fizika) is alkalmazzák. A kreatív gondolkodás és a problémamegoldás során képesek észlelni a térbeli viszonyok sokféleségét, és abban a kontextusban is gondolkodni, hogy azok hogyan változnak.

Felnőttkorban a térszemlélet a mindennapi élet és a szakmai tevékenységek során válik hasznossá. A felnőttek általában már képesek összehangoltan alkalmazni a térbeli gondolkodást a különféle tevékenységeknél. Mivel a szakmai környezet, a technológia és a tudományos gondolkodás megköveteli a fejlett térbeli szemléletet, a felnőttek életvitelére is hat a térszemlélet fejlődése.³

Játékok spontán térszemlélet-fejlesztő hatása

Gyerekkorban legtöbbször tapasztalatok útján, többnyire játékokkal fejlesztik, játékokon keresztül fejlődik a térszemlélet. A játékiparban a térérzékelési képességeket fejlesztő építő-, konstruáló, logikai játékok sokszínűségével találkozhatunk. A hagyományos építőjátékoknak három fő típusát lehet megkülönböztetni: elsősorban szimbólumok, betűk megjelenítése építőelemen (elősegíthetik a fogalmi és képi gondolkodás összehangolását); másodsorban egyszerű, geometrikus formák; harmadikként pedig modellek és építészeti struktúrák (a lépések érzékelését pontosíthatják).

Minden összerakható és szétszedhető játék fejleszti a térszemléletet, viszont hatékonyságuk játékonként változó, valamint az elemekből kirakható modellek száma erősen korlátozott. A térszemléletet jól fejlesztik a formaillesztő játékok, modellező készletek, az építőkockák, a LEGO, Java építőkészletek, Tüske, fémépítők, a Babylon és a Geomag játékok. Az építőkockák

³ SZAKÁL 2021: 144–145; BABÁLY–BUDAI–KÁRPÁTI 2013: 7–9.

többnyire csak egymásra helyezhető, más rögzítési lehetőség nincs közöttük, így a megépíthető modellek száma erősen korlátozott, szemben a LEGO-val, ahol sokkal több a lehetőség. Viszont az építőköcskák többnyire jobban fejlesztik a térszemléletet, mert használatuk során alaposabb formaelemzést kell végezni; a LEGO játékban nagyon sok speciális elem (figurák, tárgyak) már készen van, legfeljebb néhány darabból kell összeállítani őket. Ezek az építőjátékok szórakoztató feladatokon keresztül, nemcsak lefoglalják a gyerekeket, hanem fejlesztik különböző készségeiket is (például szociális készségek, motorikus képességek). Játékos módon lehet eljutni a természettudományos megközelítésig és gondolkodásmódig. Az építés és modellezés során a gyerekek olyan alkotó tevékenységet végeznek, amelynek lényege a tapasztalati tanulás, amelyhez ötletre és kreativitásra van szükségük. A térszemlélet fejlesztése érdekében fontos, hogy a gyerekek megfoghassák és elforgathassák az építőelemeket, amelyek majd a létrehozandó szerkezetek alkotóelemeivé válnak. A megépített modell átalakítása szükségessé válhat, a méretek, formák igazításához a megfelelő térszemlélet megléte kell.⁴

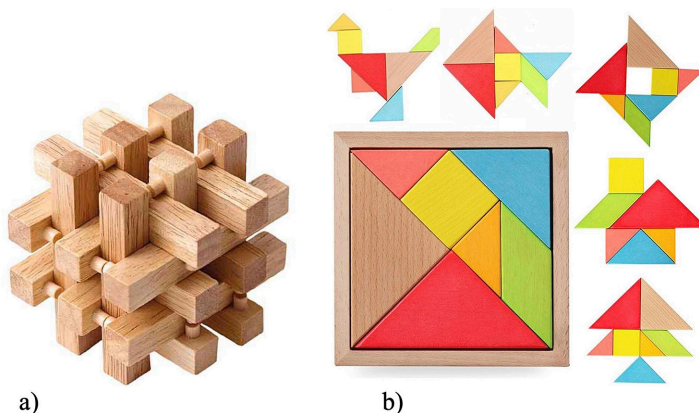
A Geomag építőjáték működésének lényege a mágnesesség, amely lehetőséget ad a geometriai modellezésre. A játék két alapvető modellből áll, egyrészt a geometriai pontot modellező acélgolyókból, valamint az egyenest modellező műanyag rudakból, amelyek végén erős mágnes található. A Geomag jól alkalmazható a térszemlélet fejlesztésére, mivel a golyókból és rudakból nagyon sok különböző alakzat és forma állítható elő.

A logikai játékok, mint például a térbeli logikai összerakójáték, a Rubik-kocka, az ördöglatkat vagy a különböző puzzle-k segítik a térbeli gondolkodás és a problémamegoldó képesség fejlődését. A játék során az egyéneknek el kell képzelniük, hogy a különböző elemek hogyan illeszkednek egymáshoz a térben, ami segíti a térbeli viszonyok, formák és méretek megértését. Stratégiáikat kell kidolgozniuk a feladatok megoldására, ami fejleszti a logikai gondolkodást és a kreatív problémamegoldó képességet. A logikai játékok gyakran igényelnek precíz mozdulatokat és manipulációt, ami javítja a finommotoros készségeket és a kéz-szem koordinációt. A Rubik-kockánál a problémák lépésről lépésre megoldása rendszerezett gondolkodásra ösztönöz. A kocka kirakásához a játékosnak memorizálnia kell a különböző lépéseket és algoritmusokat, ami erősíti a rövid és hosszú távú memóriát. A játék során el kell képzelni, hogy a különböző lépések hogyan hatnak a kocka helyzetére, és adott fordítás után hogyan változik a felület elrendezése.

A térbeli összerakójátékokkal térbeli konstrukciót kell létrehozni, de időnként a szétszedés is ugyanolyan nehéz folyamat lehet (1.a ábra). Hátrányként lehet megemlíteni, hogy amennyiben rájövünk a megoldásra, a további játék már nem annyira szórakoztató, új játékot kell beszerezni, ami új kihívást jelent a játékosnak. A Tangram, ami nem annyira ismert a hétköznapokban (kínai puzzle), támogatja a gyerekek térben való gondolkodását, a létrehozott alakzatokkal fejleszthetik térbeli tudatosságukat, továbbá felhasználható matematikai fogalmak bemutatására, segíti a megfigyelést, kreativitást és logikus gondolkodást. A Tangram hét db geometriai alakzattal áll, öt háromszögből, egy négyzetből és egy paralelogrammából, amely együttesen egyetlen négyzettel állítható össze (1.b ábra). A részek összeillesztésével számos különféle alakzat és forma képezhető. Használatával a gyerekek felváltva dolgoznak síkban és

⁴ BETÁK-SZABÓ 2020.

térben úgy, hogy először forgatják a Tangramot térben, majd a meglévő darabokból kirakják az eredményt (formát) a síkban. Matematika órai alkalmazása segíti a formák megnevezését és a térbeli tudatosság fejlesztését, valamint a geometriai kapcsolatok könnyebb megértését.⁵



1. ábra: Térbeli összerakójáték és Tangram

Forrás: <https://www.jucariishop.ro/cu%C5%9Fca-juc%C4%83rie-logic%C4%83-din-lemn.html>; <https://www.amazon.in/Simple-Days-Wooden-Tangram-Intelligent/dp/B07R4DJ5G7>

A fentebb említett fejlesztő játékok természetesen pénzbe kerülnek, időnként meglehetősen sokba, viszont minimális ráfordítással is lehet jelentős fejlesztést elérni, például szívószállal és hurkapálcikával, valamint az origamival. A szívószál szinte minden háztartásban megtalálható, és a hurkapálcika is könnyen elérhető, főleg, hogy általános iskolában, az alsó tagozatban használják tanórákon is. Ezekkel könnyen lehet modellezni geometriai testeket, egymásba illeszthetők és újra felhasználhatók, mégsem használják széles körben, mert viszonylag ingerszegény a kivitele, és manapság a gyerekek szeretik a szép, esztétikus és látványos dolgokat, így ezek az eszközök nem vehetik fel a versenyt például a Geomaggal. A másik olcsó, óvodáskortól egészen felnőttkorig használható megoldás az origami, amelynek leírásai mindenki számára elérhetőek könyvek formájában vagy az internetről, különböző nehézségi fokozatban – bárki számára sikerélményt tud nyújtani. Megvan a lehetőség arra, hogy egyre nehezebb és bonyolultabb figurákat állítsunk elő, és csak egy kis papírlapra van szükségünk. Az origamizás a térbeli képességek fejlesztése mellett javítja a kézügyességet, a matematikai készségeket, a szem-kéz koordinációt, és teret enged a kreativitásnak.⁶

A Pop-up is egy kevésbé ismert technika, itt papír és olló segítségével állítunk elő térbeli formákat (2. ábra). Élő könyvek is nevezik ezeket a műveket: a könyv lapjait kihajtva előugrik egy kép. Lehetővé teszi a párhuzamos síkok mozgását, forgatását és az alakváltozást.

⁵ NAGY LEHOCZKY 2023; JI et al. 2022.

⁶ KRISZTIÁN 2016; NAGY LEHOCZKY – SZABÓ 2022.

A Pop-up képek előállításához képzelet szükséges, ahol a tervezési és a megvalósítási szakasz összekapcsolódik az eredmény megfelelő előrejelzésével. A végeredmény megfigyelésével láthatóvá válik, hogyan alakul a síkgeometriából a térbeli átmenet.



2. ábra: Pop-up képek

Forrás: <https://minimadthings.com/products/pop-up-cards-printable-activity-bundle?variant=43138488598705>

A táblás és a stratégiai játékok, valamint a sakk a térsemlélet fejlesztésén kívül még egyéb mentális képességeket is fejlesztenek, mint például a kombinációs képesség. A játékosnak folyamatosan figyelnie kell a táblán levő figurák elhelyezkedését, és meg kell értenie, hogy azok hogyan hatnak egymásra, ez segít a térbeli formák észlelésében és azok dinamikájának megértésében. A táblás játékoknál a játékosnak előre kell gondolkodnia, és meg kell terveznie a lépéseit, amely tervezési folyamat ösztönzi őt, hogy vizualizálja a jövőbeli helyzeteket és azok következményeit. A játékok során gyakran merülnek fel megoldandó problémák. A térsemlélet fejlesztéséhez elengedhetetlen, hogy a játékos képes legyen a különböző megoldási lehetőségeket megfigyelni és értékelni. Fontos szerepet játszik a mintázatok felismerése és azok kihasználása, meg kell tanulni, hogyan lehet felismerni a különböző helyzeteket és azokra hogyan kell reagálni. A játékok gyakran igénylik a precíz mozgásokat és a figyelem tartós fenntartását, amelyek mind hatással vannak a koordinációra és a térbeli észlelés fejlesztésére. Mivel a táblás játékok többnyire társas, csoportos formában zajlanak, ez elősegíti a hatékony kommunikációt és a csapatmunkát. A játékosoknak meg kell érteniük egymás lépéseit és szándékait, ami szintén hozzájárul a térsemléletük fejlődéséhez.

Egyes számítógépes játékok, videójátékok használata is segíti a téri képességek fejlődését (térészlelés, rövid távú vizuális memória, figyelem stb.), viszont a játék típusától és használatának idejétől is erősen függ a hatékonysága. Sok játék 3D-s modelleket és térbeli környezeteket használ, amelyek segítik a játékosokat, hogy jobban megértsék a térbeli viszonyokat (távolságokat, irányokat, elhelyezkedéseket). A mászkálós, gyűjtögetős játékok esetén fel kell fedezni a helyszíneket, meg kell jegyezni a pontos útvonalakat, és mentálisan kell a térképet konstruálni, miközben gyorsan és pontosan kell navigálni a pályán, hogy visszataláljanak egy adott pontra, vagy elérjenek a célba. A térbeli problémák megoldása, mint például a térképek olvasása vagy az útvonaltervezés segíthet a stratégiai gondolkodás fejlesztésében. A logikai

játékok (például puzzle) a formák és a térbeli viszonyok manipulálására építenek, ami elősegíti a forma- és térbeli logika fejlődését. Az építkezős játékok (például Minecraft) lehetővé teszik a játékosok számára, hogy saját struktúrákat és világokat alkossanak, ami javítja a térbeli tervezési képességeiket. A többjátékos környezetekben a játékosoknak figyelembe kell venniük mások pozícióját és mozgását, ami fejleszti a társas térsemléletet és a csoportos stratégiák kidolgozását. A számítógépes játékok nemcsak szórakoztatók, de hasznos eszközök is a térsemlélet fejlesztésére, mivel ösztönzik a kreatív gondolkodást, a problémamegoldást és a vizuális észlelést.

A távirányítású játékok (RF autó-, helikoptermodellek) használata során a játékosoknak meg kell érteniük a háromdimenziós teret, megtanulják hogyan kell navigálni a térben, figyelembe véve a magasságot, a távolságot és az irányokat. A távirányító használata megköveteli a szem-kéz koordinációt, ami szintén hozzájárul a térsemlélet fejlődéséhez. Pontosán kell irányítani a modellt, ami sokszor kihívások elé állítja a játékost, ezért a probléma megoldásához térbeli gondolkodásra van szükség. Például egy akadálypályán való navigálás során figyelembe kell venni a környezetet és a jármű mozgását is, ezáltal fejlődik a térbeli tudatosság. Speciális modell a repülő, mivel amikor az a levegőben a hossz tengelye körül elfordul, akkor az addigi fent és lent megváltozik, a távirányító ellenkezőleg fog működni, ami nagy fokú figyelmet igényel.

A puzzle és a térbeli puzzle népszerű játék mind gyermekek, mind felnőttek körében. A puzzle-k kirakása során a játékosoknak meg kell érteniük, hogyan viszonyulnak egymáshoz a különböző formák, ezek kirakása gyakran kihívást jelent, és a megoldáshoz kreatív gondolkodásra és logikai lépések sorozatára van szükség, ami fejleszti a problémamegoldó készségeket. A játék során precízen kell mozgatni a darabokat, ami javítja a szem-kéz koordinációt és segíti a térbeli manipulációs készségek fejlesztését. Emlékezni kell a korábban elhelyezett darabokra, valamint a lehetséges helyekre is (térbeli emlékezet fejlesztése). A puzzle-k kirakása során el kell képzelni, hogyan fog kinézni a végső forma, vagy hogy miképpen illeszkednek a különböző darabok egymáshoz.

A Tetris és a 3D Tetris a puzzle-hoz hasonló fejlesztéseket segít elő, itt is különböző formákat kell egymáshoz illeszteni a játékosnak, ami segíti a térbeli orientációt és a háromdimenziós alakzatok vizualizációját. Meg kell érteni, hogyan illeszkednek a különböző formák egymásba, és hogyan lehet őket optimálisan elhelyezni, ami kihat a formafelismerés és arányérzék fejlesztésére is. A Tetris nemcsak a jó reflexekről szól, hanem a hosszú távú stratégiai tervezésről is, előre el kell képzelni, hogy a különböző blokkokat miként kell elhelyezni a legnagyobb hatékonyság érdekében. A játékosnak gyorsan kell reagálnia, és pontosan kell irányítania a blokkok mozgását, ami javítja a finommotoros készségeket. Emlékezni kell arra, hogy hol helyezkednek el a már elhelyezett blokkok, és hogyan fognak a következő blokkok illeszkedni, ami erősíti a térbeli emlékezetet.

A kereskedelemben még számos egyéb ismert és kevésbé ismert játék megtalálható, amelyek szintén hatással vannak a térsemlélet fejlesztésére.

A kézműves foglalkozások és a sportolás térszemlélet-fejlesztő hatása

A kézműves foglalkozások lehetőséget adnak iskolai keretek között a diákok fejlesztésére, a barkácsolás pedig az otthoni szabadidőben végzett tevékenység keretében nyújtja ugyanezeket a feltételeket. A különböző anyagokkal történő alkotás alatt a résztvevők megtanulják, hogy a változó anyagok, súlyok és formák hogyan befolyásolják a végterméket; hogy más-más formákat hoznak létre, és ez segít megérteni a térbeli viszonyokat, miközben a formák tervezésekor figyelembe kell venni a méreteket, az arányokat, valamint a térbeli elrendezést is. A barkácsolás és a kézműves foglalkozások során gyakran kell kreatívan megoldani a felmerülő problémákat, amely folyamat fejleszti a kritikai gondolkodást és a térbeli észlelést. A különböző munkafolyamatok alatt a résztvevőknek navigálniuk kell a térben, ami elősegíti a térbeli orientációs képességek fejlődését. A résztvevők a kezüket használják a különböző eszközök és anyagok manipulálására, ami a finommotoros készségek fejlődését eredményezi.

A barkácsolás elkezdésekor meg kell tervezni a projektet, ami magában foglalja a szükséges anyagok és eszközök kiválasztását. A folyamat segíti a résztvevőket abban, hogy előre lássák a végtermék kialakulását, és megértsék a különböző elemek közötti kapcsolatokat. A barkácsolás során gyakran szükség van helyszíni mérések elvégzésére. A pontos mérés képessége fontos a sikeres projektek végrehajtásához, és segíti a résztvevőket a térbeli érzékelésük fejlesztésében, továbbá az elemek összeszerelésekor meg kell érteni, hogyan illeszkednek egymáshoz az egyes részek.

A kézműves foglalkozások és a barkácsolás különösen fontos szerepet tölt be a gyerekek fejlődésében, mivel a kreatív tevékenységek segítenek a személyiségük és a készségeik fejlesztésében. A sikeres projektek befejezése során az önbizalom nő, ami pozitívan befolyásolja a kreativitást. A csoportos kézműves foglalkozásokon megtanulják, hogyan működjenek együtt másokkal, hogyan osszák meg ötleteiket és hogyan támogassák egymást. A folyamat koncentrációt igényel, ami segíti a figyelem fejlesztését. A kreatív tevékenységek lehetőséget adnak számukra, hogy kifejezzék érzelmeiket és gondolataikat, ami hozzájárul a szociális és érzelmi fejlődésükhöz. A kézműves foglalkozások és a barkácsolás hozzájárulnak a kreatív gondolkodás, a problémamegoldó képesség, a finommotorika és a térbeli orientáció fejlesztéséhez. Azáltal, hogy a résztvevők különböző anyagokkal és technikákkal dolgoznak, képesek lesznek jobban megérteni a térbeli viszonyokat és összefüggéseket, ami nélkülözhetetlen a mindennapi életben való boldogulásukhoz.⁷

A sportolás, különösen a labdajátékok, valamint a csapatjátékok térszemlélet-fejlesztő hatása sokrétű, amelyet befolyásol a fizikai aktivitás, a csapatmunka, a stratégiák megértése, az időbeli és térbeli orientáció. A sportolás során a test folyamatosan reagál a környezeti ingerekre, mint például a térbeli elhelyezkedés, a távolságok és az irányok, amely folyamatok hozzájárulnak a térbeli tudatosság növeléséhez. A sport során végzett különböző mozgások, mint például a futás, ugrás, dobás, elkapás fejlesztik a motorikus készségeket, amelyek által a sportoló személy jobban érzékeli és értelmezi a térbeli viszonyokat. A labda- és csapatjátékokhoz a koordináció és az egyensúly fejlesztése elengedhetetlen, a játékosnak folyamatosan

⁷ VELNER 2022; BETÁK-SZABÓ 2020.

figyelnie kell saját teste helyzetét, valamint figyelemmel kell lennie a csapattársainak és ellenfeleinek helyzetére is. A csapatjátékok esetében nemcsak a fizikai készségek fejlődnek, hanem a társas interakciók is. A játékosoknak folyamatosan kommunikálniuk kell egymással, stratégiákat kell kidolgozniuk, amelyek figyelembe veszik a térbeli viszonyokat, és együtt kell működniük a közös cél (a győzelem) elérése érdekében. Ezek együttesen fejlesztik a térsemléletet, mivel a játékosoknak folyamatosan figyelemmel kell kísérniük a csapatdinamikát és a játék helyzetét. A stratégiák megértése és alkalmazása során a játékosok fejlesztik a problémamegoldó képességüket és jobban megértik a térbeli relációkat.

A térbeli emlékek kialakítása fontos szerepet játszik, emlékezniük kell a korábbi játék-helyzetekre, hogy a jövőbeni döntéseik során tudják, hogyan kell reagálni. A térbeli memória fejlesztése hozzájárul a térsemlélet javításához. A különböző sportágak különböző mértékben fejlesztik a térsemléletet. Néhány sportág, mint például a kosárlabda, a futball vagy a kézilabda különösen nagy hangsúlyt fektet a térbeli orientációra és a csapatdinamikára. A sport nem csupán fizikai aktivitás, hanem komplex rendszer, amely a mentális és szociális készségek fejlesztésére is nagy hatással van. A labda- és csapatjátékok különösen alkalmasak a térsemlélet fejlesztésére, hiszen a játékosoknak folyamatosan reagálniuk kell a környezeti ingerekre, a csapattársakra és az ellenfelekre.

Jelenleg nincsenek megbízható kutatási eredmények, főként a kismértékű mintavétel miatt, arra vonatkozólag, hogy mely sportágak (milyen mozgásformák) segítik legjobban a téri képességek fejlődését. A kutatási eredmények szerint a vizuális-téri képességek fejlettsége nem mutat lényeges különbséget a rendszeresen sportolók és a sporttevékenységet nem folytatók között, ugyanakkor arra is akad példa, ahol a sportolók jelentős mértékben felülmúlják a nem sportolókat.⁸

A térsemlélet fejlesztésének szükségessége

Az iskoláskort elért gyerekek képessé válnak mentális műveletek elvégzésére. A műveleti gondolkodás lehetővé teszi, hogy cselekvéseket és tárgyakat rakjanak össze fejben, válaszszanak szét, rendezzenek sorba vagy alakítsanak át. A térsemlélet fejlesztése az oktatásban fontos, mivel a diákok számára lehetőséget biztosít, hogy jobban megértsék a körülöttük lévő világot, amelyben a globális összefüggések és a technológiai fejlődés folyamatosan új kihívások elé állítják őket. A térsemlélet fejlesztése segíti őket abban, hogy megértsék a térbeli információkat, észrevegyék a mintázatokat, valamint, hogy mások számára is érthetően kommunikálják a gondolataikat, továbbá hozzájárul a kreativitás növeléséhez, mivel új megoldásokat keresnek a felmerülő problémákra.

A tanárok szerepe kulcsfontosságú a térsemlélet fejlesztésében, ezért fontos, hogy megfelelő képzésben részesüljenek, és hatékonyan tudják integrálni a térsemléleti elemeket az oktatásba, valamint inspiráló, támogató környezetet kell kialakítaniuk, ahol a diákok bátran kifejtethetik gondolataikat. Az iskoláknak folyamatosan alkalmazkodniuk kell a változó körülményekhez, és innovatív módszereket kell keresniük a térsemlélet fejlesztésére.⁹

⁸ HEPPE et al. 2016; HABACHA–MOLINARO–DOSSEVILLE 2014.

⁹ SZAKÁL 2021: 144–150.

A konstruáló képességek fejlesztésének szükségességét a szakirodalom már óvodás korban hangsúlyozza, mivel az iskola előtti időszakban szerzett élmények és tapasztalatok hosszan tartó és széles körű hatással vannak a gyermekek későbbi fejlődésére.¹⁰

A térsemlélet nemcsak a geometriához és a matematikához kapcsolódik, hanem befolyásolja a problémamegoldó képességet, a kreativitást és a logikus gondolkodást, fejlesztése kulcsfontosságú az egyén kognitív fejlődésében, iskolai teljesítményében és a mindennapi életében. Azok, akik képesek a térbeli viszonyok helyes értelmezésére, jobban tudják elképzelni és megoldani a különböző problémákat, könnyebben átlátják a logikai összefüggéseket, és képesek az információkat rendszerezni. A térben való tájékozódás, a formák és a méretek manipulálása, valamint a különböző nézőpontok figyelembevétele segíti a fiatalokat abban, hogy kreatívan közelítsenek a feladatokhoz. Akik jól ismerik a térbeli viszonyokat, könnyebben értik meg a szimbolikus ábrázolásokat és a matematikai fogalmakat. Az iskolai sikerek nemcsak a tananyag elsajátításától függenek, hanem a tanulók kognitív képességeitől is.

Azok, akik képesek vizualizálni a geometriai alakzatokat és a térbeli viszonyokat, sokkal sikeresebbek a matematikai tantárgyakban, mint azok, akik nem rendelkeznek ezzel a készséggel. A térsemlélet kihat a természettudományos tárgyra is, többek között a fizika és a kémia igénylik a térbeli gondolkodást, mivel különböző jelenségek és reakciók megértéséhez szükséges a háromdimenziós térbeli modellek elképzelése. Akik képesek a formák és színek térbeli elrendezését jól átlátni, sikeresebbek lehetnek a művészeti területeken is.

A mindennapi élet során azok, akik jól értelmezik a térbeli viszonyokat, könnyebben navigálnak az élet kihívásaiban, biztonságosabban közlekednek és elkerülhetik a baleseteket. A térsemlélet segíti a szociális interakciókat is, mivel akik jól érzékelik a térbeli viszonyokat, könnyebben értik meg mások testbeszédét és nonverbális jeleit, ami hozzájárul a hatékony kommunikációhoz.

A térsemlélet fejlesztési lehetőségei általános és középiskolában

Az általános iskolában is alkalmazzák a korábban ismertetett játékokat, ezek mellett tanórán sokat gyurmáznak, agyagoznak, vagy pedig szívószál, hurkapálca felhasználásával építenek. A különféle színes papírokkal számos tevékenységet végrehajthatnak, például a vágás és tépés módszerével képeket készítenek, vagy pedig ezeket kombinálják a ragasztás és hajtogatás technikájával. Alsó tagozatban szívesen origamiznak, főként állatos figurákat készítenek, de geometriai testek is készíthetők a háló megrajzolása után, rögzítő fülekkel egymáshoz ragasztva, ami nagyon hasznos a különböző testek felszínének tanításához.

A gyakorlati tevékenységek során közvetlen tapasztalatot szereznek a térbeli formákról és azok tulajdonságairól. A tanórák alatti felfedező célú sétáknál (projekthetek és projektfeladatok) a diákok megismerkedhetnek különböző térbeli formákkal és azok elhelyezkedésével. Csoportokban végezhetnek építő feladatokat (egyszerű struktúrákat: házakat, hidakat) különböző anyagokból, amely tevékenység fejleszti a csapatmunkát, a problémamegoldó képességet, valamint a térbeli látásmódot.

¹⁰ BARNETT 2011.

A különböző tantárgyak keretén belül (nemcsak a matematika tárgy oktatása során) megvalósulhat a térszemlélet fejlesztése. A térbeli formák és a színek kombinálása kreatív gondolkodást igényel. A fizika és technika tantárgyaknál megismerkedhetnek az erőhatásokkal és azok térbeli következményeivel.

Már általános iskolában széleskörűen használják az oktatáshoz a digitális technológiát, az interaktív tanulási módszereket, amely során a diákok aktív részesei a tanulási folyamatnak. A digitalizáció korában a térszemlélet fejlesztése új dimenziókat nyit meg. A diákok számára elérhetővé válnak a fejlesztést szolgáló online platformok, amihez különböző szoftvereket használnak, lehetővé téve, hogy virtuálisan építsenek és modellezenek.

A Moodle keretrendszer lehetőséget biztosít a kompetenciafejlesztés fejezetekre osztott, strukturált felépítésére. A különféle segédprogramok telepítése révén a tanárok digitális alkalmazásokban elkészített feladatokat integrálhatnak a kurzusba, ezáltal gazdagítva a tanulási élményt. A Moodle (Modular Object Oriented Dynamic Learning Environment) egy nyílt forráskódú tanulásmenedzsment-rendszer (*learning management system*, LMS), amely garantálja a felhasználók azonosítását, a tanulási szokások nyomon követését, valamint a tananyaghoz való hozzáférés szabályozását. Az ingyenes és testreszabható platform lehetőségeket kínál a tananyagok elhelyezésére, kurzusok szervezésére, tesztek létrehozására, valamint együttműködési lehetőségek biztosítására egy virtuális tanulási környezet keretein belül. A kurzusok résztvevői fórumokon és e-mailen keresztül is kommunikálhatnak egymással.¹¹

A GeoGebra dinamikus matematikai szoftver, amely a geometria, algebra és analízis elemeit ötvözi. A program lehetővé teszi különféle matematikai objektumok létrehozását eszközök vagy parancsok segítségével. A GeoGebra egyik legfontosabb előnye, hogy vizualizálja a matematikai problémákat, amely segíti a térgeometriai feladatok megoldását. A felhasználók képesek megforgatni a felépített testeket és minden irányból megtekinteni azokat, miközben nyomon követhetik a test felszínének és térfogatának változásait. A munka befejeztével a GeoGebra interaktív weboldalakat (dinamikus munkalapokat) generálhat, továbbá a fájlok exportálhatók képként is. A felhasználók saját profilt hozhatnak létre, ahol gyűjthetik tananyagaikat, és megtekinthetik a mások által készített anyagokat, amelyeket importálhatnak saját fiókjukba.¹²

A LearningApps egy másik változatos interaktív feladatokat kínáló platform. A regisztráció lehetővé teszi az elkészült feladatok és tankockák bármikori elérését, valamint saját mappákba rendszerezését.

A legfrissebb kutatások alapján a képi gondolkodás fejlesztésének lehetősége az általános iskola felső tagozatában véget ér. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a tanulók ebben az időszakban csupán néhány geometriai feladatot oldanak meg, később olyan hátrányos helyzetbe kerülnek, amit nehéz, sőt sokszor lehetetlen behozni. Ha a felső tagozat során nem alakultak ki a megfelelő alapok, a diákok számára a középiskolai évek alatt már sokkal nehezebb lesz fejleszteni ezeket a fontos képességeket. Ezek a megállapítások szorosan összefonódnak a társadalmi és gazdasági környezet változásaival, amelyek új elvárásokat támasztanak a fiatalokkal

¹¹ BAKONYI et al. 2020: 5.

¹² SZABÓNÉ BALOGH 2022: 149.

szemben. A tudás megszerzésének helyszínei is átalakulóban vannak, hiszen a hagyományos tanítási módszerek mellett ma már számos új lehetőség áll rendelkezésünkre. A modern technológiák, mint az internet és a számítógépes multimédia, jelentős előnyöket kínálnak, és sokkal motiválóbba a tanulókra, mint a régi, nyomtatott tankönyvek és a papíralapú oktatás. Ezek a trendek azt mutatják, hogy a térgeometriai feladatok megoldása már nem elegendő csupán a rajzlap síkján. A mai diákoknak olyan környezetben kell tanulniuk, amely kihasználja a digitális eszközök adta lehetőségeket, hogy képesek legyenek lépést tartani a folyamatosan változó elvárásokkal és kihívásokkal. A tanulási folyamatnak tehát alkalmazkodnia kell a modern világ igényeihez, hogy a fiatalok sikeresen navigálhassanak a jövő kihívásaiban.¹³

A középiskolában a térszemlélet fejlesztése számos módon megvalósulhat, de a fejlesztés által elérhető javulás mértékét a téri képességek kezdeti szintje erőteljesen befolyásolja. Az alacsonyabb szinttel érkező diákok nagyobb fejlődést tudnak elérni az oktatás során.

A rajzoktatás mint kreatív és vizuális tanulási forma aktívan hozzájárul a térszemlélet fejlesztéséhez. A rajz nem csupán a művészi kifejezés egyik formája, hanem komplex tanulási folyamat, segítségével a diákok képesek vizuálisan leképezni a valóságot. A diákok megtanulják, hogyan figyeljenek meg részleteket, és hogyan értelmezzék a körülöttük levő világot. A rajzórán végzett gyakorlati feladatok, mint például tárgyak és épületek lerajzolása segítik a tanulókat abban, hogy észrevegyenek olyan részleteket, amelyeket korábban figyelmen kívül hagytak. Gyakran kell háromdimenziós objektumokat kétdimenziós felületen ábrázolniuk, a perspektíva, az arányok és az árnyékolás technikája fejleszti a térbeli gondolkodást, magában foglalja a formák és struktúrák térbeli elhelyezésének a megértését. A rajzolás során a tanulóknak gyakran kell kreatív megoldásokat találniuk különböző problémákra, folyamatosan alkalmazniuk kell a térbeli gondolkodást és a vizuális észlelést. Ez a kreatív problémamegoldás nemcsak a rajzoktatás keretein belül hasznos, hanem más tantárgyakban is, mivel képesek lesznek a megszerzett készségeket alkalmazni a tudományos és művészeti projektek során is. A matematikai fogalmak, mint a geometria és a szimmetria, a rajzolás során vizuálisan is megjeleníthetők.

A rajzoktatás hatékonysága nagymértékben függ az alkalmazott módszertől, mivel a rajzolás során a tanulóknak lehetőségük van arra, hogy megfigyeljék a körülöttük levő világot, majd ezt az észlelést grafikus formában rögzítsék. Az élő modellek, tájak vagy épületek rajzolása közben megtanulják, hogyan rögzítsék a térbeli viszonyokat és arányokat. A számítógépes rajzprogramok használata lehetőséget ad arra, hogy új dimenziókat fedezzenek fel a rajzolásban. A számítógépes rajz nemcsak a hagyományos rajztechnikák mellett kínál új lehetőségeket, hanem segíti a térbeli gondolkodás fejlődését is, mivel lehetővé teszi a háromdimenziós modellek és animációk készítését. A csoportos projektek, a közös rajzolás során különböző nézőpontokat és ötleteket oszthatnak meg egymással.

Természetesen a rajzoktatásnak számos előnye mellett nehézségei is akadnak, mint például az időhiány, az egyéni különbségek figyelembevétele vagy pedig a digitális eszközök elérhetősége. A középiskolai tanterv gyakran szoros, a rajzoktatásra szánt idő korlátozott lehet, ami megnehezíti a tanulók számára, hogy elegendő időt tudjanak rajzolással tölteni, legalábbis

¹³ PETRI 2022.

tanórai keretek között. Sokszor nem tudják befejezni az órán elkezdett rajzfeladatukat, amit aztán otthon, főként hétvégén próbálnak elkészíteni más tantárgyak tanulásának rovására. Sokszor összecsapják végül a rajzokat, mert nem tartják annyira fontosnak, felvállalva, hogy ezzel nem valósul meg az a fejlesztő tevékenység, amelynek éppen eszköze lenne a feladat. A tanulók különböző háttérrel és készségekkel rendelkeznek, ami megnehezíti a tanárok számára, hogy mindenki igényeit figyelembe vegyék. A rajzoktatás során fontos lenne a személyre szabott megközelítés, amely figyelembe veszi az egyéni erősségeket és gyengeségeket. Bár a számítógépes rajzprogramok és eszközök hasznosak lehetnek a térsemlélet fejlesztésében, nem minden tanuló rendelkezik megfelelő eszközzel, és ez az egyenlőtlenség problémát okozhat a rajzoktatás során.¹⁴

Matematikaórán a témakörök között megjelenik a térgeometria, kémiaórán az atommodellek, kristályszerkezetek, a fizikaórán a csillagászat, földrajzórán a térképolvasás – valamennyi alkalmas a térsemlélet fejlesztésére.

A digitális technológiák, mint a virtuális valóság (virtual reality, VR) és a kiterjesztett valóság (augmented reality, AR) használata új dimenziókat nyithat meg a térsemlélet fejlesztésében. Ezek az eszközök lehetővé teszik, hogy a tanulók interaktív módon tapasztalják meg a térbeli fogalmakat. A virtuális valóság technológiájával bejárhatják a különböző földrajzi helyszíneket, a kiterjesztett valóság segítségével a valós világban láthatják a térbeli információkat (például térképek vagy 3D-modellek).¹⁵

Összegzés

A cikk a térsemlélet fejlődésének komplex folyamatát és annak fejlesztési lehetőségeit tárgyalja az oktatás különböző szintjein a különféle játékok, tevékenységek és modern technológiák szerepét hangsúlyozva. A térsemlélet spontán módon, életkorral, tapasztalatokkal, játékokkal és oktatási módszerekkel alakul ki, de fejleszthető képesség is, amely szorosan összefügg a kognitív funkciók, például a memória és a problémamegoldás fejlődésével. A csecsemőkortól kezdve egyre összetettebb feladatokat végeznek a gyerekek, amelynek során megértik a térbeli viszonyokat, formákat és mozgásokat. A játékok, mint az építő-, logikai és konstrukciós játékok, különösen hatékonyak a térbeli tudatosság kialakításában. Ezek a tevékenységek fejlesztik a forma- és térbeli összefüggéseket, a vizuális emlékezetet, a kreativitást és a problémamegoldó képességet.

Az oktatási módszerek között kiemelkednek a digitális eszközök, mint a GeoGebra, a Moodle vagy a LearningApps, amelyek interaktív és vizuális tanulási lehetőségeket kínálnak, segítve a térbeli fogalmak megértését. Emellett az óvodás- és általános iskolás korosztályban az egyszerű, olcsó eszközökkel, például origamival, hurkapálcikákkal vagy papírműveletekkel is hatékonyan lehet fejleszteni a térsemléletet. A kézműves és sporttevékenységek, különösen a csapatjátékok, mint a futball vagy a kézilabda, szintén hozzájárulnak a térbeli orientáció,

¹⁴ TÓTH 2017.

¹⁵ SZABÓ-PŠENÁKOVÁ 2023.

a koordináció és a társas készségek fejlesztéséhez, mivel a folyamatos helyzetértékelés és stratégiaalkotás a térbeli tudatosságot erősíti.

A cikk hangsúlyozza, hogy a térszemlélet fejlesztése alapvető a problémamegoldó képesség, a kreativitás, az ismeretszerzés és az iskolai eredmények szempontjából. Az oktatási rendszerben fontos a tanárok megfelelő képzése és a változatos, innovatív módszerek alkalmazása, különösen a digitális technológiák, mint a virtuális és kiterjesztett valóság integrálásával. A tanulók vizuális és térbeli képességeinek fejlesztése már az általános iskolában elkezdődhet, és később középiskolában is folytatható különböző tantárgyak, például a matematika, fizika vagy földrajz keretében. A vizuális művészetek, mint a rajz és a grafikus ábrázolás, szintén támogatják a térbeli gondolkodás fejlődését, mivel segítik a formák, perspektívák és árnyékolás megértését.

Összességében a cikk kiemeli, hogy a térszemlélet fejlesztése sokrétű és minden életkorban fontos, hiszen döntő szerepet játszik a mindennapi életben, szakmai tevékenységekben és a kreatív problémamegoldásban. A modern oktatási eszközök és módszerek, valamint a játékokra és mozgásra alapozó tevékenységek integrálásával hatékonyan lehet elmélyíteni a térbeli tudást, amely hosszú távon hozzájárul a komplex kognitív és szociális képességek fejlődéséhez.

Felhasznált irodalom

- BABÁLY Bernadett – BUDAI László – KÁRPÁTI Andrea (2013): A térszemlélet fejlődésének vizsgálata statikus és mozgó ábrás tesztekkel. *Iskolakultúra*, 23(11), 6–19. Online: https://epa.oszk.hu/00000/00011/00179/pdf/EPA00011_iskolakultura_2013_11_006-019.pdf
- BAKONYI Viktória et al (2020): A távolléti oktatás tapasztalatai. In ZSAKÓ László – SZLÁVI Péter (szerk.): *InfoDidact'2020*. Budapest: Webdidaktika Alapítvány, 5–12. Online: <https://people.inf.elte.hu/szlavi/InfoDidact20/Infodidact2020.pdf>
- BARNETT, W. Steven (2011): Effectiveness of Early Educational Intervention. *Science*, 333(6045), 975–978. Online: <https://doi.org/10.1126/science.1204534>
- BETÁK Norbert – SZABÓ Tibor (2020): Térszemlélet-fejlesztést segítő foglalkozások Lego eszközök segítségével. *OxIPO*, 2(4), 71–81. Online: <https://doi.org/10.35405/OXIPO.2020.4.71>
- HABACHA, Hamdi – MOLINARO, Corinne – DOSSEVILLE, Fabrice (2014): Effects of Gender, Imagery Ability, and Sports Practice on the Performance of a Mental Rotation Task. *The American Journal of Psychology*, 127(3), 313–323. Online: <https://doi.org/10.5406/amerjpsyc.127.3.0313>
- HEPPE, Holger et al. (2016): The Relationship Between Expertise in Sports, Visuospatial, and Basic Cognitive Skills. *Frontiers in Psychology*, 7. Online: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00904>
- Ji, Anya et al. (2022): Abstract Visual Reasoning with Tangram Shapes. In *Proceedings of the 2022 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Abu Dabhi: Association for Computational Linguistics, 582–601. Online: <https://doi.org/10.18653/v1/2022.emnlp-main.38>
- KRISZTIÁN Ágota (2016): *Matematikai nehézséggel küzdő gyerekek fejlesztő módszerének kidolgozása és hatásvizsgálata*. PhD-disszertáció. Pécs: Pécsi Tudományegyetem Bölcsészettudományi Kar Pszichológia Doktori Iskola Alkalmazott Pszichológia Doktori Program. Online: <https://pea.lib.pte.hu/server/api/core/bitstreams/a4b70740-766f-4196-b218-17d041f4d5f8/content>
- NAGY LEHOCKY Zsuzsa (2023): Térszemlélet fejlesztés alapozása tangrammal. *OxIPO*, 5(3), 59–69. Online: <https://doi.org/10.35405/OXIPO.2023.3.59>
- NAGY LEHOCKY Zsuzsa – SZABÓ Tibor (2022): Térszemléletfejlesztés a matematika órakon 11–12 éves gyerekek körében. *Különleges Bánásmód*, 8(4), 77–83. Online: <https://doi.org/10.18458/KB.2022.4.77>

- PETRI Csilla (2022): A térlátás és térbeli tájékozódás kompetencia fejlesztésének lehetőségei digitális eszközökkel az általános iskola felső tagozatán. *Pannon Digitális Pedagógia (E-Tanulás–Távoktatás–Oktatás-informatika)*, 2(1), 27–42. Online: <https://doi.org/10.56665/PADIPE.2022.1.4>
- SZABÓ Tibor – PŠENÁKOVÁ Ildikó (2023): Térségi képességek fejlesztése kiterjesztett valóság segítségével. *OxIPO*, 5(1), 79–89. Online: <https://doi.org/10.35405/OXIPO.2023.1.79>
- SZABÓNÉ BALOGH Ágota (2022): A digitális kultúrára nevelés speciális pedagógiai eszközei. *Deliberationes*, 15(1), 149–163. Online: <https://doi.org/10.54230/Delib.2022.1.149>
- SZAKÁL Rebeka (2021): A térszemlélet fejlődése és fejlesztése alsó tagozaton. *Módszertani Közlemények*, 61(3), 144–155. Online: <https://ojs.bibl.u-szeged.hu/index.php/modszertani-kozlemenyek/article/view/43658>
- TÓTH Péter (2017): Középiskolai tanulók vizuális megismerőképességének fejlesztése I. In TÓTH Péter et al. (szerk.): *Pedagógiai kutatások a Kárpát-medencében II. Kárpát-medencei Oktatási Konferencia tanulmánykötet*. [H. n.], 1–20. Online: https://www.academia.edu/41411036/Pedag%C3%B3giai_kutat%C3%A1sok_a_K%C3%A1rp%C3%A1t-medenc%C3%A9ben
- VELNER András (2022): Tradíció és innováció a technika és tervezés tantárgy új tartalomszabályzóiban. In G. SZABÓ Sára – GOMBOS Péter (szerk.): *Módszertan és megújulás: Válogatás a MATE Neveléstudományi Intézete szakmódszertani tanulmányaiból*. Gödöllő: MATE Press, 77–85. Online: <https://press.mater.uni-mate.hu/id/eprint/104>

Nagy Zsolt,¹  Hokstok Kinga² 

Reziliencia és pszichoszociális kockázatok a hivatásos szolgálatban

Munkabiztonsági és műveleti összefüggések

Resilience and Psychosocial Risks in Professional Service Members

Occupational Safety and Operational Contexts

A hivatásos állomány, különösen a tűzoltók és katonák feladatellátása során a fizikai veszélyek mellett kiemelkedők a bevetésekkel összefüggő pszichoszociális kockázatok. Jelen tanulmány célja a reziliencia és a munkabiztonság kapcsolatának vizsgálata ezen foglalkozási csoportoknál, hazai és nemzetközi szakirodalmi források alapján. A szerző elemzi, hogy a pszichológiai ellenálló képesség (reziliencia) hogyan funkcionál nemcsak mentálhigiénés védőfaktorként, hanem a munkabiztonságot és a szabálykövető magatartást közvetlenül befolyásoló tényezőként. A cikk részletesen tárgyalja a reziliencia megjelenését egyéni, csapat- és szervezeti szinten, különös tekintettel a kohézióra és a vezetői támogatásra. Az eredmények rámutatnak, hogy bár a reziliencia fejleszthető kompetencia, a hierarchikus szervezeti kultúra és a mentális egészség stigmatizációja gyakran gátolja a hatékony programok bevezetését. A tanulmány konklúziója szerint a szervezeti reziliencia fejlesztése és a pszichoszociális kockázatok kezelése a modern műveleti biztonság elengedhetetlen eleme.

Kulcsszavak: reziliencia, pszichoszociális kockázat, munkabiztonság, hivatásos állomány, tűzoltóság, szervezeti kultúra

¹ Egyetemi adjunktus, Széchenyi István Egyetem Apáczai Csere János Pedagógiai, Humán- és Társadalomtudományi Kar, e-mail: nagy.zsolt5@sze.hu

² Doktori hallgató, Széchenyi István Egyetem Állam- és Jogtudományi Doktori Iskola, e-mail: nagyabda@gmail.com

In the line of duty, professional personnel – particularly firefighters and soldiers – face significant psychosocial risks associated with interventions, alongside physical dangers. This study aims to examine the relationship between resilience and occupational safety within these occupational groups, based on both domestic and international literature. The author analyses how psychological resilience functions not only as a mental health protective factor but also as a direct determinant of occupational safety and adherence to rules. The paper discusses in detail the manifestation of resilience at individual, team, and organisational levels, with particular emphasis on cohesion and leadership support. The results indicate that although resilience is a developable competence, hierarchical organisational culture and stigmatisation of mental health often hinder the implementation of effective programmes. The study concludes that developing organisational resilience and managing psychosocial risks are vital elements of modern operational safety.

Keywords: resilience, psychosocial risk, occupational safety, professional staff, fire service, organisational culture

Bevezetés

A hivatásos állomány, különös tekintettel a tűzoltókra és a Magyar Honvédség katonáira, szolgálatteljesítése során fokozott fizikai és pszichoszociális terhelésnek van kitéve. Az operatív beavatkozások, a veszélyes műveleti környezet, a traumatizáló eseményekkel való rendszeres konfrontáció, valamint az állandósult készenléti állapot olyan kumulatív stresszhatást generál, amely hosszú távon nemcsak a testi és mentális egészség romlását idézheti elő, hanem a munkabiztonsági fegyelem lazulásához is vezethet.³

Ebben a kontextusban a reziliencia – azaz az egyén és a szervezet adaptív rugalmassága és helyreállító képessége – az elmúlt évtizedekben a pszichológiai és munkabiztonsági kutatások fókuszába került. A rendvédelmi és katonai szervezeteknél a reziliencia több mint a mentális egészség védőfaktora: a munkabiztonsági rendszer szerves elemét képezi. A magasabb rezilienciaszint bizonyítottan korrelál a biztonságtudatos magatartással, a baleseti kockázatok mérséklésével, valamint a kritikus stresszhelyzeteket követő gyorsabb reintegrációval.⁴

A hazai normatív háttérrel a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény (Mvt.) biztosítja, amely a munkáltató alapvető kötelezettségeként rögzíti az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés követelményeit, beleértve a pszichoszociális kockázatok kezelését is. A nemzetközi normák közül az ISO 45003:2021⁵ szabvány külön hangsúlyozza a pszichés egészség és a reziliencia fejlesztésének fontosságát a munkahelyi biztonság integrált részeként.

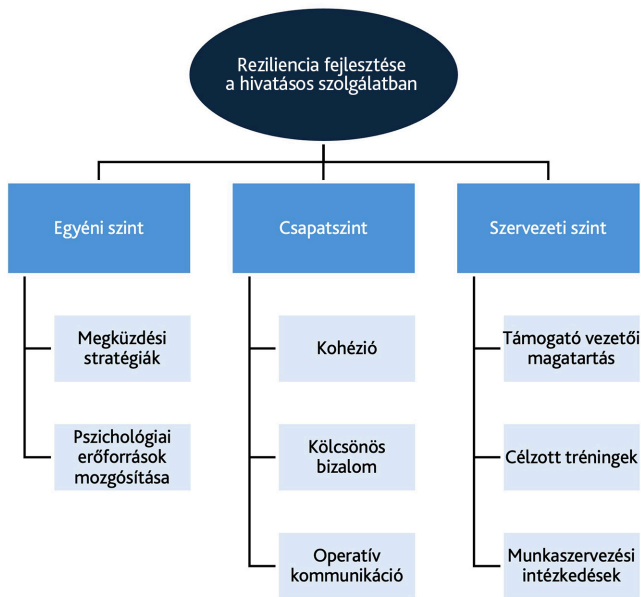
³ CUENCA-LOZANO – RAMÍREZ-GARCÍA 2023.

⁴ BAKIRCI et al. 2025.

⁵ Az ISO 45003:2021 nemzetközi szabványt a Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) dolgozta ki, és lehetővé teszi a szervezetek számára a munkahelyi pszichoszociális kockázatok kezelését, különös tekintettel az ISO 45001 szabványon alapuló munkahelyi egészségvédelmi és biztonsági (MEB) irányítási rendszerekre. Az ISO 45003:2021 szabvány általánosságban megkönnyíti a szervezetek számára, hogy megelőzzék munkavállalóik és más érdekelt felek munkahelyi sérüléseit és betegségeit, valamint elősegítsék a munkahelyi jóllétet.

A reziliencia fejlesztése rendszerszemléletű megközelítést igényel, amely három szinten valósítható meg hatékonyan (1. ábra):

- *egyéni szinten*: a megküzdési stratégiák és pszichológiai erőforrások mozgósítása által;
- *csapat szinten*: a kohézió, a kölcsönös bizalom és az operatív kommunikáció erősítésével;
- *szervezeti szinten*: támogatói vezetői magatartással, célzott tréningekkel és megfelelő munkaszervezési intézkedésekkel.



1. ábra: A reziliencia fejlesztése a hivatásos szolgálatban

Forrás: a szerzők szerkesztése

Ezek a kapcsolódási pontok különösen fontosak a tűzoltók és katonák speciális feladatrendszerében, ahol a pszichoszociális kockázatok csökkentése közvetlen hatással van a műveleti biztonságra.⁶ Jelen tanulmány célja, hogy a hazai és nemzetközi szakirodalom szintézisével feltárja a reziliencia és a munkabiztonság közötti összefüggéseket a hivatásos állomány körében, valamint alkalmazható kutatási keretrendszert vázoljon fel a gyakorlati szakemberek számára.

A reziliencia és a pszichoszociális kockázatok összefüggésrendszere

A hivatásos állomány, különös tekintettel a tűzoltókra és a katonákra, szolgálatteljesítése során extrém fizikai és pszichés terhelésnek van kitéve, ami szükségszerűen fokozott pszichoszociális

⁶ MAO et al. 2025.

kockázati kitettséget eredményez. Ebben a kontextusban a reziliencia nem csupán pszichológiai védőfaktoroként, hanem a műveleti biztonság kritikus elemeként értelmezendő. Ez a képesség határozza meg, hogy az egyének és csoportok miként reagálnak a terhelésre, és képesek-e fenntartani a biztonságtudatos, szabálykövető magatartást a magas kockázatú szituációkban. Feltételezhető, hogy a reziliencia enyhíti a szolgálati kiégés és a munkabiztonsági eredmények közötti negatív korrelációt. Ezen hatásmechanizmusok feltárása elengedhetetlen a biztonsági magatartás megerősítése és a humán kockázati tényezők csökkentése érdekében.

A reziliencia hatása a magatartásra és szabálykövetésre

Magas rezilienciaszint esetén a személyi állomány tagjai bizonyítottan nagyobb valószínűséggel alkalmaznak adaptív megküzdési stratégiákat. Ez a kompetencia szignifikánsan csökkenti a hibázási hajlamot a krízishelyzetekben és a beavatkozások során. A jelenség közvetlen összefüggést mutat a baleseti kockázatok mérséklésével: a reziliens egyénre jellemző fokozott kognitív kontroll, a pontos helyzetfelismerés és a stressz alatt is stabil döntéshozatali képesség mind javítják a munkabiztonsági kimeneteket.⁷

A reziliencia a szabálykövető magatartás egyik prediktora is. A reziliens szolgálatot teljesítő nem csupán egyéni biztonságát helyezi előtérbe, hanem a szervezeti normákhoz való alkalmazkodás révén hozzájárul a kollektív biztonság fenntartásához. Csapatszinten a reziliencia – amelynek központi elemei a kohézió, a kölcsönös bizalom és az operatív kommunikáció – elősegíti a biztonsági protokollok fegyelmezett betartását, ami a nagy kockázatú műveletek során életmentő lehet.⁸

Szervezeti felelősség és pszichoszociális tényezők

A reziliencia fejlesztése nem korlátozódhat az egyén szintjére; szervezeti dimenzióban is értelmezendő. A támogató parancsnoki/vezetői magatartás, a biztonságorientált szervezeti kultúra, valamint a célzott intervenciók (rezilienciatréningek, szupervízió) hosszú távon a szolgálati balesetek számának csökkenését és a műveleti hatékonyság növekedését eredményezik. Ez alátámasztja azt a tézist, hogy a reziliencia a modern munkabiztonság integráns része, amely közvetlenül befolyásolja az egyéni és szervezeti szintű biztonsági mutatókat.

A pszichoszociális kockázatok definíciós keretét tekintve a szolgálati környezet azon jellemzőiről beszélünk, amelyek tartós stresszt, pszichés túlterhelést vagy szociális feszültséget generálnak, negatívan befolyásolva az állomány mentális, fizikai és társas jóllétét, valamint a munkabiztonsági fegyelmet. Ide tartoznak többek között a túlzott munkaterhelés, a bizonytalan munkafeltételek, az időnyomás, a felelősségi körök tisztázatlansága, a szervezeti támogatás hiánya, valamint a társas kapcsolatokban megjelenő konfliktusok vagy bizalomhiány.

⁷ KETELAARS et al. 2024.

⁸ OLÁH 2021.

Lényeges hangsúlyozni, hogy a pszichoszociális kockázatok nem absztrakt pszichológiai jelenségek, hanem a munkabiztonsági kockázattértékelés komplex tényezői, amelyek közvetlen összefüggést mutatnak a szolgálati biztonsággal és a teljesítményromlással.⁹

Összességében megállapítható, hogy a reziliencia fejlesztése a tűzoltók és katonák körében multidiszciplináris. A pszichológiai egészségvédelem, a munkabiztonsági kockázatcsökkentés és a szervezeti teljesítmény optimalizálása együttesen indokolja a rezilienciaalapú szemléletmód beépítését a hivatásos szolgálatok rendszerébe.

A reziliencia megjelenési szintjei a hivatásos szolgálatban

A reziliencia a hivatásos szolgálatban több, egymással kölcsönhatásban álló szinten jelenik meg. Az egyéni pszichológiai ellenálló képesség mellett meghatározó szerepe van a csapat-szintű kohézióknak, valamint a szervezeti támogatási mechanizmusoknak is. Az alábbiakban e három szint főbb jellemzőit mutatjuk be.

Egyéni reziliencia: pszichológiai védőfaktorok

Az egyéni pszichológiai reziliencia a hivatásos állomány tagjainak azon komplex képessége, amely lehetővé teszi a fokozott terheléssel, váratlan helyzetekkel, traumatikus eseményekkel és krízisekkel való sikeres megküzdést. A reziliencia ezen szintje olyan személyiségjegyekből, kognitív stratégiákból, érzelmi szabályozási mechanizmusokból és fiziológiai erőforrásokból áll, amelyek együttesen biztosítják, hogy az egyén képes legyen fenntartani vagy helyreállítani pszichés egyensúlyát extrém körülmények között is. Pszichológiai dimenziói közé sorolható az optimista életszemlélet, a belső kontrollhely, az önhatékonyság érzése, valamint a problémaközpontú megküzdési (*coping*) stratégiák alkalmazása, amelyek lehetővé teszik a stresszorok reális értékelését és adaptív feldolgozását.¹⁰

A magyar jogszabályok jelenleg nem tartalmazzák explicit módon a reziliencia fogalmát. Ugyanakkor a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény, a munka törvénykönyvéről szóló 2012. évi I. törvény és az egészségügyről szóló 1997. évi CLIV. törvény olyan kötelezettségeket rögzítenek, amelyek közvetett módon összefüggést mutatnak a pszichológiai ellenálló képesség szerepével. Különösen a pszichoszociális kockázatok csökkentése, a lelki egészség védelme és a hivatásos állomány pszichés alkalmassági követelményei emelik ki a reziliencia jelentőségét a munkabiztonsági és szolgálati összefüggésekben.

Érzelmi szempontból a negatív érzelmek szabályozásának képessége és a pozitív érzelmi élmények fenntartása különösen fontos, hiszen ezek elősegítik a traumák feldolgozását és a pszichés rugalmasság erősödését. Fiziológiai oldalról a megfelelő terhelhetőségnek, az idegrendszeri adaptációnak és a regenerációs kapacitásnak van kiemelt szerepe.¹¹

⁹ HOLLAND-WINKLER et al. 2023.

¹⁰ CONNOR-DAVIDSON 2003.

¹¹ MORENO-ALMEIDA-SANCHEZ 2024.

A nemzetközi szakirodalomban nagy figyelmet kapott a *Connor–Davidson resilience scale* (CD-RISC), amely a rugalmasság, a problémamegoldó képesség, a kitartás, valamint a gyors regeneráció mérésére szolgál.¹² Empirikus vizsgálatok igazolják, hogy a magas reziliencia-értékekkel rendelkező tűzoltók és katonák hatékonyabban képesek kezelni a krízishelyzeteket, ritkábban mutatnak akut stresszreakciót, és gyorsabban épülnek fel traumatikus események után. Ez a képesség közvetlenül összefügg a biztonságosabb munkavégzéssel is, mivel a reziliens munkavállalók fokozottabb figyelmet fordítanak a szabálykövetésre, jobban érzékelik a kockázatokat, és a higgadtságuk révén csökkentik a hibázás esélyét.

Hazai empirikus kutatások is megerősítik ezeket az eredményeket. A vizsgálatok szerint a magyar tűzoltók rezilienciaértékei szignifikánsan magasabbak az általános populációnál. Ennek oka részben a szolgálat során szerzett tapasztalat, részben pedig a szakmai identitás és a bajtársi közösség által nyújtott védőhatás. A tűzoltói hivatás során a veszélyhelyzetek ismétlődő megtapasztalása nem pusztán stresszor, hanem a pszichológiai rugalmasság fejlődésének egyik forrása is.¹³

Fontos hangsúlyozni, hogy az egyéni reziliencia nem statikus adottság, hanem dinamikusan változó képesség, amely fejleszthető. Ennek eszközei lehetnek a pszichológiai támogatás, a rezilienciatréningek, valamint a reziliencia-szempontú szituációs gyakorlatok. Emellett a vezetői támogatás is elengedhetetlen és alappillére az erős szervezeti biztonsági kultúrának. E fejlesztő tényezők hosszú távon nemcsak a mentális egészség védelmét segítik, hanem a munkabalesetek számának mérsékléséhez és a munkabiztonsági előírások következetesebb betartásához is hozzájárulhatnak.

Csapat szintű reziliencia és kohézió

A reziliencia alapvetően az egyén vagy közösség alkalmazkodó- és ellenálló képességét jelenti stressz, krízis vagy trauma esetén. A csapatszintű reziliencia a szervezeti és közösségi működés kritikus komponense, amely a csoport kohéziójában, a tagok közötti bizalomban, a kommunikáció minőségében, valamint a kollektív problémamegoldó és adaptív képességekben nyilvánul meg.¹⁴

Míg az egyéni reziliencia az egyén stresszkezelő képességeit vizsgálja, a csapatszintű reziliencia a közösség működésére, a belső kapcsolatok minőségére és a közös krízishelyzetekben tanúsított reakciókra összpontosít.

A hivatásos szervezetekben, mint tűzoltóság és katonaság, a reziliencia elengedhetetlen, mivel a szolgálat során életveszélyes helyzetekkel és rendkívüli stresszel szembesülnek.

A reziliencia koncepciója a pszichológiai ellenálló képesség mellett a szervezeti és csapatközi támogatást, a vezetői irányítást, valamint a feladatok rugalmas és adaptív végrehajtását foglalja magában. A katonai kontextusban a reziliencia kiterjed az egyéni felkészültségre,

¹² HEYDARI et al. 2022.

¹³ ROSSOUW et al. 2024.

¹⁴ SZÖLLŐSI 2025.

a pszichológiai ellenálló képességre, a mentális egészség fenntartására, valamint a csapatszintű összetartásra és kohézióra, amelyek együttesen biztosítják a küldetések sikeres végrehajtását.

Nemzetközi vizsgálatok rámutattak, hogy a magas csapatszintű reziliencia javítja a mentális egészséget, csökkenti a kiégést és a traumatikus stressz hosszú távú hatásait, valamint növeli a motivációt és a szervezeti elkötelezettséget; kimutatták, hogy a csapatreziliencia csökkenti a majdnem bekövetkezett baleset (*near-miss*) események számát, és hozzájárul a biztonsági protokollok következetes betartásához. A hivatásos beavatkozó egységekben a magas kohézióval és bizalommal rendelkező csapatok gyorsabban reagálnak a váratlan helyzetekre, hatékonyabban kommunikálnak, és adaptív stratégiákat alkalmaznak a krízisek kezelésére.

A csapatreziliencia fejlesztése több dimenzióban történhet a hivatásos egységek esetében:

- *strukturális és szervezeti támogatás*: világos szerepek, hatékony kommunikációs csatornák és vezetői támogatás biztosítása;
- *szociális és pszichológiai összetartozás*: kölcsönös bizalom, bajtársiasság, közös értékek és normák erősítése;
- *képesség a kollektív adaptációra és tanulásra*: a hibákból való tanulás, gyors alkalmazkodás és közös reagálás krízishelyzetekben.

A tűzoltói és a katonai szolgálat során a beavatkozások mindig csapatban zajlanak, ezért a csapatszintű reziliencia közvetlenül hat a biztonsági előírások betartására és a sikeres küldetés végrehajtására. A magas kohézióval rendelkező egységek kevésbé hajlamosak hibázni, gyorsan alkalmazkodnak a változó körülményekhez, és fenntartják a mentális ellenálló képességet a stresszes helyzetekben.¹⁵

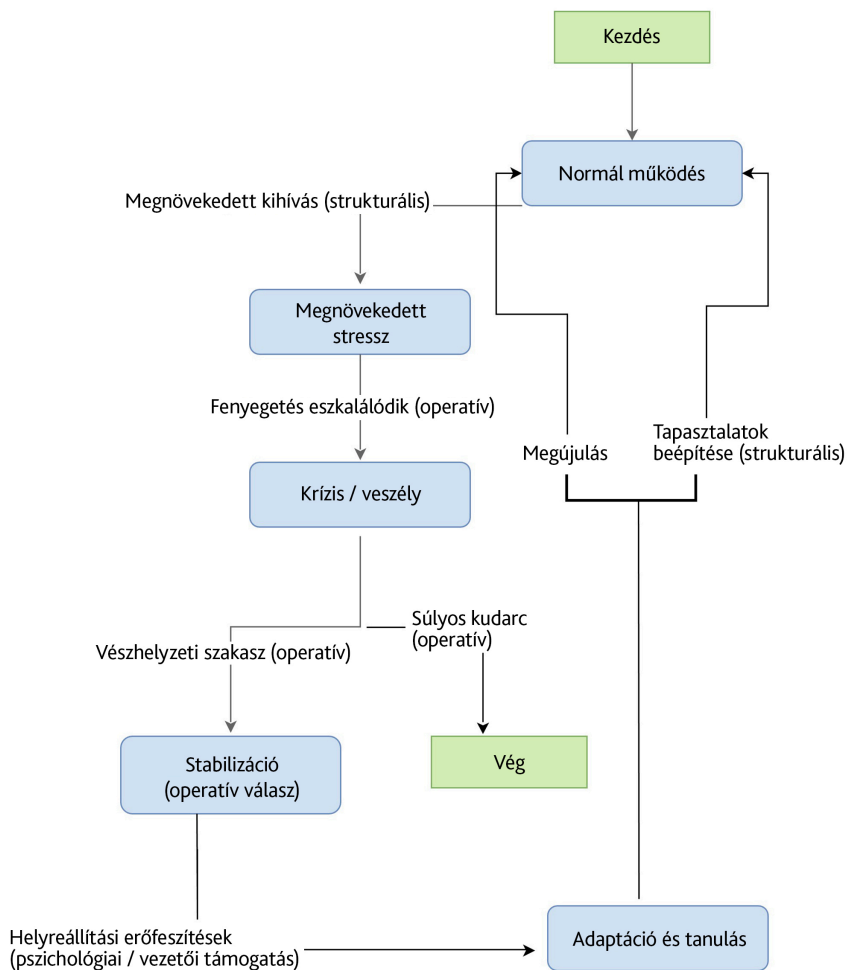
Magyar kontextusban a *Védelem Tudomány*ban megjelent rezilienciaelméletek kiemelik, hogy a katonai és katasztrófavédelmi szervezetekben a csapatszintű kohézió, a kölcsönös támogatás és a bajtársiasság alapvető feltétele a túlélésnek és a sikeres beavatkozásnak. Krízishelyzetekben a csapatreziliencia lehetővé teszi, hogy a tagok adaptív módon reagáljanak, minimalizálják a hibák számát, és fenntartsák a pszichológiai jóllétet, miközben biztosítják a szervezeti célok teljesítését.

Összességében a csapatszintű reziliencia komplex rendszer, amely a közösségi adaptáció, a kollektív problémamegoldás, a bajtársi támogatás és az alkalmazkodóképesség kombinációjából áll. A magas szintű kohézió, bizalom és adaptív képesség nemcsak a pszichológiai jóllétet erősíti, hanem közvetlenül javítja a munkabiztonsági eredményeket és a szervezeti hatékonyságot, így kulcsfontosságú a katonai és katasztrófavédelmi szolgálatokban.

¹⁵ TORNERO-AGUILERA et al. 2024.

Szervezeti reziliencia és intézményi támogatás

A szervezeti reziliencia képessége lehetővé teszi, hogy egy intézmény rugalmasan alkalmazkodjon a folyamatosan változó környezethez, hatékonyan reagáljon a krízishelyzetekre, és fenntartsa működőképességét még extrém vagy váratlan helyzetekben is.¹⁶



2. ábra: A szervezeti reziliencia összetevői

Forrás: a szerzők szerkesztése

¹⁶ MALEKABAD et al. 2025.

A szervezeti ellenálló képesség összetevői

A szervezeti reziliencia a szervezet struktúráiban, működési eljárásaiban, vezetési kultúrájában és kríziskezelési képességeiben fejeződik ki. Ezen a szinten a reziliencia a szervezeti rugalmasságot, a kockázatok kezelésének képességét, valamint a hivatásos szolgálatot teljesítők pszichoszociális védelmének intézményesített formáit jelenti.

A reziliencia nem csupán a válságok során mutatott túlélési képességet jelentheti, hanem a szervezet folyamatos tanulási és adaptációs mechanizmusait is, amelyek révén a szervezet képes megelőzni a károkat, minimalizálni a kockázatokat és javítani a működés hatékonyságát.

A katonai szervezetek esetében a szervezeti reziliencia több szinten jelenik meg. Strukturálisan a hierarchikus felépítés, a szabályozott eljárásrendek és a feladatkiosztás biztosítja a működés folytonosságát a stresszes és veszélyes környezetekben. Operatív szinten a vezetési gyakorlatok, a szimulációs és harci kiképzési programok, valamint a krízismenedzsment-képességek erősítik a szervezet ellenálló képességét. Emellett a katonai szervezeteknél szerepet kap a pszichológiai felkészítés és a vezetői támogatás, amelyek hozzájárulnak a személyzet mentális egészségének fenntartásához, erősítve a szervezet teljesítőképességét krízishelyzetekben (2. ábra).

A tűzoltóságok és más vészhelyzeti beavatkozók (*emergency worker*) szintén erősen függenek a szervezeti rezilienciától. A beavatkozási protokollok, a képzési és továbbképzési rendszerek, valamint a munkabiztonsági intézkedések biztosítják, hogy a szolgálatban részt vevők hatékonyan és biztonságosan tudjanak reagálni a veszélyhelyzetekre. A tűzoltóság példáján keresztül jól látható, hogy a szervezeti reziliencia nem csupán a technikai és logisztikai eszközök meglétét jelenti, hanem magában foglalja a kommunikációs csatornák, a koordinációs mechanizmusok és a csapatkohézió fejlesztését is, amelyek együttesen csökkentik a hibázás és a baleset kockázatát.

Nemzetközi szabályozási környezet és sztenderdek

A nemzetközi szabványok és irányelvek kiemelik a pszichoszociális kockázatok kezelésének és a szervezeti reziliencia fejlesztésének fontosságát. Az ISO 45003:2021 szabvány szerint a pszichoszociális kockázatok kezelése integrált része kell hogy legyen a szervezeti munkabiztonsági rendszernek, mivel a hivatásos szolgálatot teljesítők mentális egészsége és ellenálló képessége közvetlenül befolyásolja a munkavégzés biztonságát és a szervezet teljesítményét.

A szabvány fő irányvonala a munkahelyi egészségvédelem és biztonság mellett a pszichoszociális kockázatok kezelése. A világ első nemzetközi szabványa, amely kifejezetten a munkahelyi pszichoszociális kockázatok kezelésére ad keretrendszert.

A hivatásos állományú katonákra és tűzoltókra speciális szolgálati törvények vonatkoznak (például a rendvédelmi feladatokat ellátó szervek hivatásos állományáról szóló 2015. évi XLII. törvény), amelyek tartalmazzák a pszichés alkalmassági vizsgálatok, pszichológiai támogatás és utógondozás szabályait. Tűzoltók folyamatosan találkoznak traumatikus eseményekkel (balesetek, halálesetek, katasztrófahelyzetek), amelyek erős pszichés megterhelést okoznak. Magyarországon a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság biztosít pszichológiai

szolgálatot, amely krízisintervenciót, stresszkezelést és utógondozást nyújt. Katonák esetében a szolgálat természetéből fakadóan gyakori a stressz, szorongás, poszttraumás stressz-zavar (PTSD) kockázata. A Honvédségben működik a MH Egészségügyi Központ keretében pszichológiai és mentálhigiénés szolgálat, amely a beosztás előtti, szolgálat alatti és utáni pszichológiai ellátást biztosítja.

A hierarchikus szervezeti kultúra miatt néha nehéz a mentális problémák nyílt kommunikációja. Egyre nagyobb hangsúlyt kellene kapnia a reziliencia fejlesztésének, a csapatpszichológiának, valamint a bevetések utáni tapasztalatok kikérdezésének és értékelésének (azaz a *debriefingnek*).

A NATO-hoz és EU-hoz való kapcsolódás révén a Magyar Honvédségben és a katasztrófavédelemben is folyamatosan közelítik a nemzetközi standardokat, amelyek lényegében összhangban állnak az ISO 45003:2021 alapelveivel.

Az Európai Munkahelyi Biztonsági és Egészségvédelmi Ügynökség (EU-OSHA) kiemeli, hogy a vészhelyzeti beavatkozók (*emergency workers*), például tűzoltók, mentők és katonák esetében a szervezeti reziliencia alapvető szerepet játszik a pszichés egészség fenntartásában, a munkahelyi balesetek számának csökkentésében, valamint a stressz okozta teljesítményromlás mérséklésében.

A katonai és katasztrófavédelmi szervezeteknél ez a gyakorlatban rezilienciatréningek, pszichológiai felkészítő programok, stresszkezelő workshopok és a vezetői támogatási rendszerek révén tudna megvalósulni. Erre irányuló programoknak kellene megcélózni, hogy a hivatásos szolgálatot teljesítőik képesek legyenek fenntartani a mentális stabilitást, kezelni a traumatikus élményeket, és a váratlan helyzetekben is hatékonyan teljesíteni feladataikat.¹⁷

E három szint szorosan összekapcsolódik az egyéni rezilienciával, és erősíti a csapatszintű adaptív működést, viszont a csapatreziliencia hozzájárul a szervezeti stabilitáshoz, a szervezeti reziliencia pedig keretet tud adni az egyéni és közösségi szint fenntartásához és fejlesztéséhez. Így a rezilienciának a hivatásos állományban nemcsak pszichológiai, hanem munkabiztonsági és szervezetbiztonsági jelentősége is kell hogy legyen.

Pszichoszociális kockázatok kezelése és fejlesztési lehetőségek

A pszichoszociális kockázatok a szolgálatteljesítés azon rendszerszintű és operatív tényezőiként definiálhatók, amelyek közvetlen veszélyt jelentenek a mentális integritásra, krónikus stresszreakciót válthatnak ki, vagy növelhetik a biztonsági incidensek valószínűségét. A hivatásos állomány esetében e kockázati profil specifikus elemekből épül fel: a szélsőséges munkaterhelés, a váltásos és készenléti szolgálati rendből fakadó bioritmuszavarok, a traumatizáló eseményeknek való közvetlen expozíció, az erőszakos cselekményekkel való konfrontáció, valamint a nem megfelelő parancsnoki/vezetői támogatás mind ide sorolhatók.

¹⁷ MAO et al. 2025.

A pszichoszociális kockázatok hatása a beavatkozó állományra

A nemzetközi szakirodalom egyértelműen rámutat arra, hogy a reziliencia szintje moderálhatja ezen kockázati tényezők egészségkárosító és biztonságot veszélyeztető hatását. Empirikus vizsgálatok igazolják, hogy tűzoltók esetében a magasabb rezilienciaszint szignifikánsan csökkenti a poszttraumás stressz-szindróma előfordulását, miközben elősegíti a poszttraumás növekedés (PTG) folyamatát. Katonai populációkban a reziliencia elsődleges védőfaktorként funkcionál az akut és kumulatív stresszel szemben, ezáltal közvetlenül hozzájárul a harcképesség és a műveleti alkalmazhatóság fenntartásához.¹⁸

Összhangban a nemzetközi trendekkel, a hazai tudományos álláspont is rögzíti, hogy a pszichoszociális kockázatok kezelése nem korlátozódhat kizárólag az egyéni megküzdés szintjére. A hivatásos állomány védelme szervezeti szintű beavatkozásokat és prevencióstratégiákat követel meg.¹⁹

A fejlesztés lehetőségei és a szervezeti akadályok

A rezilienciaalapú megközelítés beépítése a hivatásos állomány képzési rendszerébe ma már nem csupán opció, hanem a korszerű humánerőforrás-fejlesztés stratégiai követelménye. A modern had- és rendészettudományi kutatások egyetértése szerint a reziliencia nem statikus, veleszületett személyiségvonás, hanem dinamikus, tanulható kompetencia, amely megfelelő pedagógiai és pszichológiai módszertannal fejleszthető. Tekintettel arra, hogy a tűzoltók és katonák szolgálatteljesítése fokozott pszichoszociális kitettséggel jár, a rezilienciatréningeknek a kiképzés és a folyamatos továbbképzés szerves részévé kell válniuk. Ez a beruházás kettős megtérülést eredményez: egyrészt garantálja a mentális egészségvédelmet, másrészt közvetlenül növeli a műveleti hatékonyságot és a beavatkozások biztonságát.

Ugyanakkor a fegyveres és rendvédelmi szervek működését meghatározó tradicionális szervezeti kultúra sajátos gátló tényezőket emel a fejlesztés elé. A hierarchikus struktúra, a szigorú alá-fölé rendeltség és a parancsuralmi rendszer – bár a műveleti irányítás elengedhetetlen alapfeltételei – merevségükkel akadályozhatják a pszichológiai adaptivitást.²⁰

A szervezeti szocializáció során rögzülő „katonás hozzáállás” – történelmileg a sztoicizmusra, a fizikai terhelhetőségre és a nehézségek csendes elviselésére épül. Ebben a norma-rendszerben a mentális nehézségek megfogalmazása gyakran a gyengeség jeleként, illetve a szolgálati feladatokra való „alkalmatlansággként” stigmatizálódik.

Ez a szubkulturális jelenség jelentős visszatartó erőt, úgynevezett látenciát generál a segítségkérésben. A hierarchikus viszonyrendszerben az állomány tagjai – különösen az alacsonyabb rendfokozatúak – vonakodnak jelezni pszichés problémáikat, tartva a karrierkövetkezményektől: a minősítéstől, a beosztásból való felmentéstől vagy a fegyverviselési engedély visszavonásától. A mentális egészséget övező társadalmi stigma a zárt, maskulin

¹⁸ SUN et al. 2024.

¹⁹ HORVÁTH–SZABÓ 2018.

²⁰ TEIXEIRA et al. 2024.

dominanciájú hivatásrendekben hatványozottan érvényesül, aminek következtében a stresszkezelési és rezilienciaprogramok gyakran háttérbe szorulnak a fizikai és harcászati/technikai kiképzéssel szemben.

Hazai szinten további rendszerszintű kihívást jelent az erőforrások aszimmetrikus elosztása. A honvédelmi és rendvédelmi költségvetések prioritása jellemzően a technikai modernizációra (fegyverzet, infrastruktúra) irányul, míg a humán alrendszer pszichológiai támogatása strukturális hiányosságokkal küzd. A pszichológiai szolgálatok humánerőforrás-kapacitása korlátozott: az egy szakpszichológusra jutó állományi létszám aránya kedvezőtlen, ami a prevenció helyett szükségszerűen a reaktív működés (krízisintervenció, kötelező alkalmassági szűrések) felé tolja el a hangsúlyt.

A munkavédelmi törvény, valamint a szolgálati szabályzatok elvben tartalmazzák a pszichoszociális kockázatok kezelésének előírásait. A gyakorlatban azonban ezek nem fordulnak át kötelező, rendszeres tréningekbe vagy rezilienciafejlesztő programokba. A pszichológiai felkészítés sokszor csak műveleti missziók (például nemzetközi békefenntartó vagy katonai bevetések) előtt történik meg, a mindennapi szolgálati rutinba azonban kevésbé épül be. Hiányoznak azok a standardizált protokollok, amelyek meghatároznák a preventív reziliencia-tréningek kötelező gyakoriságát és módszertanát az általános állomány számára.²¹

Összegzés

A reziliencia szerepe a tűzoltók és a katonai állomány munkabiztonsági rendszerében komplex, multidiszciplináris vizsgálati terület, amely a pszichológia, a munkabiztonság, a szervezetfejlesztés és a vezetélmélet metszéspontjában helyezkedik el. Jelen tanulmány megállapításai megerősítik, hogy a hivatásos állomány tagjai a szolgálatteljesítés során sajátos és fokozott pszichoszociális terhelésnek vannak kitéve. E kockázatok hatékony kezelése nem korlátozható kizárólag a technikai vagy jogi szabályozási eszközökre; a megoldás kulcsa elsősorban a humán tényezőkben rejlik.

A reziliencia védőfaktoroként három szinten fejti ki hatását a biztonsági kimenetekre:

- *Egyéni szint:* a pszichés immunitás elemei – mint az optimizmus, az önhatékonyság, a fejlett problémamegoldó készség és az érzelmi reguláció – közvetlen hatással vannak a baleseti prevencióra, a szabálykövető magatartásra, valamint a traumatikus események utáni reintegrációra.
- *Csapat szint:* a kollektív reziliencia a kohézió, a kölcsönös bizalom és az operatív kommunikáció révén erősíti a biztonsági kultúrát, ezáltal mérsékelve az emberi hibából fakadó kockázatokat.
- *Szervezeti szint:* a reziliencia intézményesült formában a támogató parancsnoki/vezetői magatartásban, a célzott képzési portfóliókban és a pszichoszociális kockázatkezelési mechanizmusokban realizálódik.

²¹ HEWARD et al. 2024.

A nemzetközi és hazai tapasztalatok konszenzusa alapján a reziliencia nem veleszületett adottság, hanem fejleszthető kompetencia, amely integrálható a hivatásos állomány kiképzési rendszerébe.²²

A merev, hierarchikus szervezeti kultúra, a mentálhigiénés segítségkéréshez kötődő stigma (és az emiatt kialakuló késlekedés), valamint a pszichológiai támogatórendszerek korlátozott erőforrásai mind lassítják a széles körű bevezetést. Lényeges szemléletváltás szükséges: a rezilienciát nem csupán egyéni túlélési mechanizmusként, hanem stratégiai munkabiztonsági tényezőként kell definiálni. A tűzoltók és katonák körében a pszichoszociális stabilitás közvetlenül befolyásolja a szolgálati balesetek gyakoriságát, a kiégés (*burnout*) előfordulási arányát, valamint a műveleti teljesítményt.

Jelen tanulmány célja a reziliencia és a munkabiztonság közötti kauzális összefüggések feltárása, valamint egy gyakorlatorientált beavatkozási keretrendszer bemutatása volt. A jövőbeni kutatásokban indokolt a longitudinális vizsgálatok előtérbe helyezése, mivel ezek alkalmasak a reziliencia fejlődésének dinamikus modellezésére. További kutatási feladatot jelentenek azok a szervezeti és szubkulturális tényezők is, amelyek elősegíthetik vagy éppen akadályozhatják a fejlesztési programok intézményesülését.²³

Összességében kijelenthető, hogy a reziliencia erősítése a hivatásos állomány fizikai és pszichés védelmének, valamint a szolgálati feladatok eredményes ellátásának alapfeltétele. A rezilienciafókuszú szemlélet integrálása a munkabiztonsági stratégiákba hosszú távon nemcsak az egyéni jóllétet szolgálja, hanem a szervezeti ellenálló képességet és végső soron a társadalmi biztonságot is garantálja.

Felhasznált irodalom

- BAKIRCI, Ahmet Erhan et al. (2025): Post-Traumatic Stress Disorder and Post-Traumatic Growth in Firefighters: Examining the Moderating Effects of Resilience on Occupational Safety Behaviors. *BMC Public Health*, 25. Online: <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22908-9>
- BOUCHÉ-BENCIVINNI, Alicia et al. (2025): Assessment of Psychosocial Risk and Resource Factors Perceived by Military and Civilian Personnel at an Armed Forces Medical Center. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(4). Online: <https://doi.org/10.3390/ijerph22040494>
- CONNOR, Kathryn M. – DAVIDSON, Jonathan R. T. (2003): Development of a New Resilience Scale: The Connor–Davidson Resilience Scale (CD-RISC). *Depression and Anxiety*, 18, 76–82. Online: <https://doi.org/10.1002/da.10113>
- CUENCA-LOZANO, María F. – RAMÍREZ-GARCÍA, César O. (2023): Occupational Hazards in Firefighting: Systematic Literature Review. *Safety and Health at Work*, 14(1), 1–9. Online: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.01.005>
- FORCHUK, Callista A. et al. (2024): Optimizing Military Mental Health and Stress Resilience Training Through the Lens of Trainee Preferences: A Conjoint Analysis Approach. *Military Psychology*, 37(3), 175–186. Online: <https://doi.org/10.1080/08995605.2024.2324647>
- HEYDARI, Ahad et al. (2022): Building Resilience in Firefighters: A Systematic Review. *Iranian Journal of Public Health*, 51(7), 1546–1558. Online: <https://doi.org/10.18502/ijph.v51i7.10088>

²² BOUCHÉ-BENCIVINNI et al. 2025.

²³ FORCHUK et al. 2024.

- HEWARD, Carolyn et al. (2024): A Scoping Review of Military Culture, Military Identity, and Mental Health Outcomes in Military Personnel. *Military Medicine*, 189(11–12), e2382–e2393. Online: <https://doi.org/10.1093/milmed/usae276>
- HOLLAND-WINKLER, A. et al. (2023): Strategies to Improve Physiological and Psychological Components of Resiliency in Firefighters. *Physiologia*, 3(4), 611–626. Online: <https://doi.org/10.3390/physiologia3040045>
- HORVÁTH Péter – SZABÓ József (2018): A fejlődés perspektívái a Zala Különleges Mentők tevékenységében a pszichés és fizikai megterhelések leküzdésére. *Műszaki Katonai Közlöny*, 28(2), 57–65. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2018_2_05_Horvath-Szabo_MKK%20cikk.pdf
- KETELAARS, Elleke et al. (2024): Resilience Training for Critical Situation Management: An Umbrella and a Systematic Literature Review. *Safety Science*, 170. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106311>
- MALEKABAD, Ebadallah Shiri et al. (2025): Factors Influencing Military Personnel's Resilience During Natural Disasters in Iran: A Qualitative Study. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly*, 10(4), 315–328. Online: <https://doi.org/10.32598/hdq.10.4.645.1>
- MAO, Xiaorong et al. (2025): Resilience Enhancement Interventions for Disaster Rescue Workers: A Systematic Review. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, 33. Online: <https://doi.org/10.1186/s13049-025-01397-0>
- MORENO, Ana F. et al. (2024): Resilience Training Programs with Police Forces: A Systematic Review. *Journal of Police and Criminal Psychology*, 39, 227–252. Online: <https://doi.org/10.1007/s11896-023-09633-y>
- OLÁH, Attila (2021): *Anxiety, Coping, and Flow. Empirical Studies in Interactional Perspective*. Budapest: Akadémiai. Online: <https://doi.org/10.1556/9789634547075>
- ROSSOUW, Jurie G. et al. (2024): High Adversity Resilience Training (HART): Development for Emergency Responders and Defence. *Journal of Applied Neurosciences*, 3(1), a8. Online: <https://doi.org/10.4102/jan.v3i1.8>
- SUN, Zhanying et al. (2024): Preventing and Mitigating Post-Traumatic Stress: A Scoping Review of Resilience Interventions for Military Personnel in Pre Deployment. *Psychology Research and Behavior Management*, 17, 2377–2389. Online: <https://doi.org/10.2147/PRBM.S459220>
- SZÖLLŐSI Annamária (2025): A reziliencia a biztonság kontextusában. *Hadtudományi Szemle*, 18(2), 161–177. Online: <https://doi.org/10.32563/hsz.2025.2.10>
- TEIXEIRA, João et al. (2024): Empowering Leadership in the Military: Pros and Cons. *Merits*, 4(4), 346–369. Online: <https://doi.org/10.3390/merits4040026>
- TORNERO-AGUILERA, José Francisco et al. (2024): Optimising Combat Readiness: Practical Strategies for Integrating Physiological and Psychological Resilience in Soldier Training. *Healthcare*, 12(12). Online: <https://doi.org/10.3390/healthcare12121160>

Horváth Krisztián¹ 

Többtest-dinamika és kapcsolt szimulációk alkalmazása a védelmi iparban

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

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

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

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

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

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

Bevezetés

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

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

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

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

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

² DANG et al. 2024.

³ LIU et al. 2021.

⁴ MOCERA et al. 2020.

⁵ FAN et al. 2025.

⁶ DECSI-SZALAI 2022.

⁷ ABRO-ABDALLAH 2024.

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

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

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

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

Módszertan

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

A munka során három egymásra épülő lépést követtünk.

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

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

⁸ KIM et al. 2025.

⁹ ZHOU–CHANG 2022.

¹⁰ HARADA et al. 2019.

¹¹ FARKAS 2019.

¹² LIU et al. 2021; DANG et al. 2024.

¹³ DECSI–SZALAI 2022; FARKAS 2019.

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

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

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

Alkalmazási példák

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

Lánctalpas járművek terepjáró képességének modellezése

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

¹⁴ MOCERA et al. 2020.

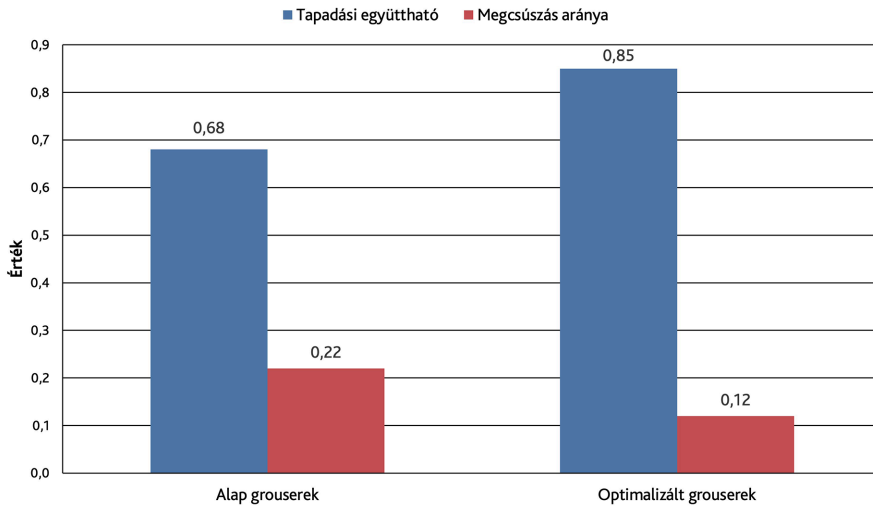
¹⁵ KIM et al. 2025.

¹⁶ ABRO–ABDALLAH 2024.

¹⁷ HARADA et al. 2019.

¹⁸ ZHOU–CHANG 2022.

¹⁹ MOCERA et al. 2020.



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

Amfibia járművek hidrodinamikai optimalizálása

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

Repülőgép-futóművek dinamikai vizsgálata

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

²⁰ FAN et al. 2025.

²¹ KIM et al. 2025.

Digitálisiker-alapú állapotfigyelés

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

NVH-optimalizálás védelmi rendszereknél

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

Fegyverrendszerek visszarúgás-szimulációja

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

Pilóta nélküli repülő rendszerek

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

Űripari mechanizmusok

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

²² ABRO–ABDALLAH 2024.

²³ DECSI–SZALAI 2022.

²⁴ FunctionBay 2025.

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

1. táblázat: A felhasznált kulcsirodalmak összefoglalása a tématerülethez kapcsolódóan

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

Forrás: a szerző szerkesztése

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

Előnyök a fejlesztési láncban

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

²⁵ FunctionBay 2025.

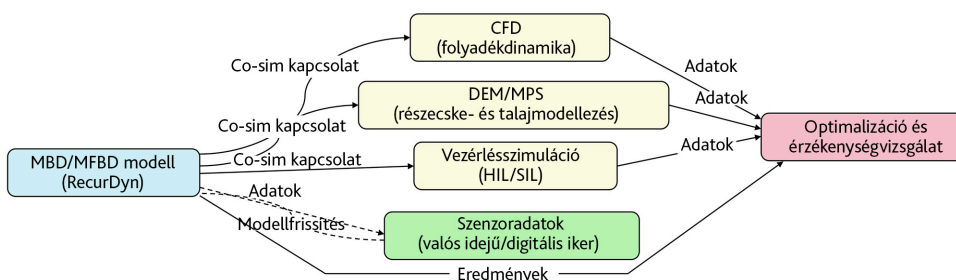
Korlátok és kockázatok

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

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

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

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



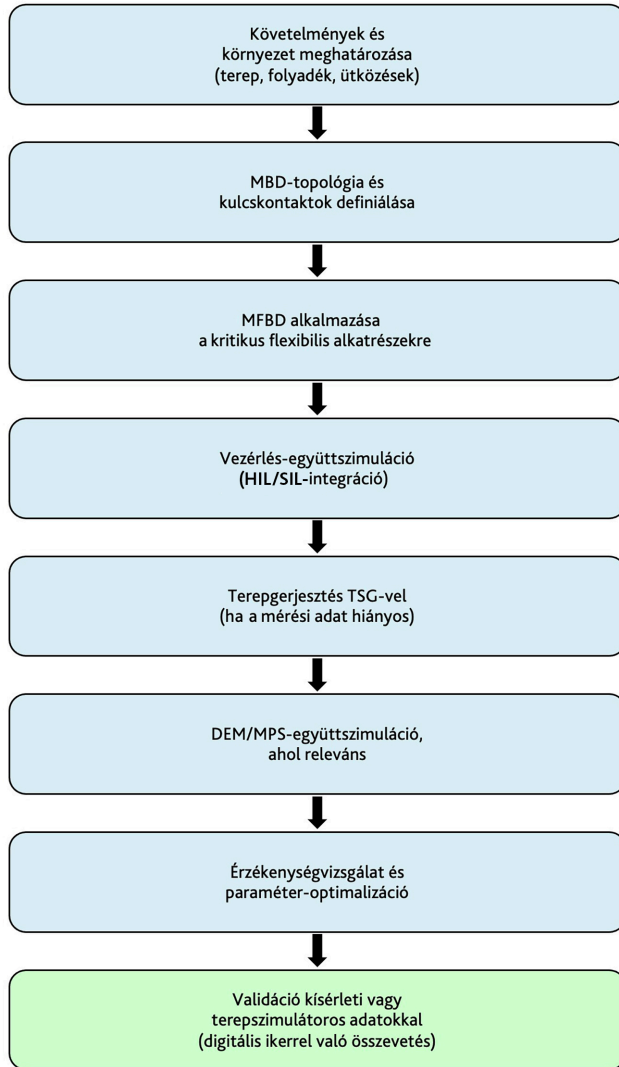
2. ábra: MBD/MFBD co-szimulációs architektúra, amely a CFD, DEM/MPS, vezérlés-szimuláció és valós idejű/digitálisiker-adatok integrációját mutatja, optimalizációs és érzékenységvizsgálati ciklussal kiegészítve

Forrás: a szerző szerkesztése

Javasolt workflow

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

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



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

Forrás: a szerző szerkesztése

Következtetések

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

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

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

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

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

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

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

Felhasznált irodalom

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

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

Horváth István¹ 

A gammakitörés-hosszúság és a spektrális keménységi adatok vizsgálatainak ellenőrzése a CGRO T50 és H32 adatok használatával

Verifying Gamma-Ray Burst Duration and Hardness Analysis Using the Compton Gamma-Ray Observatory T50 and H32 Data

A tanulmány a gammakitörések (GRB-k) időtartamának és statisztikai tulajdonságainak vizsgálatát mutatja be, különös hangsúllyal az adatelemzési módszerekre, a háttérkorrekcióra és a spektrális keménység elemzésére. A munka tárgyalja az észlelési torzítások hatását, valamint a kitörések időbeli és spektrális jellemzőinek kapcsolatát. A T50 és T90 paraméterek mellett a spektrális keménység eloszlásának vizsgálata is fontos szerepet kap, mivel ezek együttesen árnyaltabb képet adnak a GRB-k fizikai eredetéről. A kapott eredmények hozzájárulnak a gammakitörések osztályozásának pontosításához és az asztrofizikai modellek finomításához, továbbá módszertani alapot nyújtanak a jövőbeli nagy adatbázisokon végzett elemzésekhez. Az irodalomban jól ismert a BATSE H32-T90 síkon végzett kitörésoztályozás. Cikkünkben ezt megismételjük a H32-T50 paraméter síkon. Elemzésünk igazolja a H32-T90 elemzésekor kapott eredményt, hogy a kitöréseknek létezik egy harmadik, közepes hosszúságú csoportja. Ezek a gammakitörések tipikusan lágyabb spektrumúak, mint a másik két csoport tagjai.

Kulcsszavak: gammakitörés, gammasugárzás, műholdak, statisztikus elemzés

This study examines the duration and statistical characteristics of gamma-ray bursts (GRBs), with particular emphasis on data analysis techniques, background correction, and spectral hardness

¹ Egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Természettudományi Tanszék, e-mail: horvath.istvan@uni-nke.hu

investigations. It discusses the impact of observational biases and explores the relationship between the temporal and spectral properties of GRBs. In addition to the T50 and T90 parameters, the analysis of spectral hardness distributions provides further insight into the physical origins and diversity of these events. The findings contribute to a more refined classification of GRBs and the improvement of astrophysical models, offering a methodological foundation for future analyses based on large datasets. The BATSE burst classification on the H32-T90 plane is well known in the literature. In our paper, we repeat this on the H32-T50 parameter plane. Our analysis confirms the result obtained in the H32-T90 analysis, that there is a third, intermediate duration group of bursts. These gamma-ray bursts typically have a softer spectrum than the members of the other two groups.

Keywords: gamma-ray burst, gamma-ray, satellites, statistical analysis

Bevezetés

A gammakitörések (gamma-ray bursts, GRB-k) a nagyenergiás asztrofizika legizgalmasabb és legtöbbet vizsgált jelenségei közé tartoznak. Ezek a rövid ideig tartó, ám extrém fényességű gammavillanások a kozmikus égbolton bármikor felbukkanhatnak, és pillanatok alatt olyan energiát bocsáthatnak ki, amely eléri akár a Nap teljes élettartama alatt kibocsátott energiát is.² Az 1960-as évek végén a Vela műholdakat a nukleáris tesztek figyelésére tervezték, de véletlenül felfedezték, hogy gammakitörések is léteznek.³

Kezdetben központi kérdésként állt az, hogy a GRB-k a Tejútrendszeren belül vagy azon túl keletkeznek-e. A BATSE- (Burst and Transient Source Experiment) műszer adatai döntő bizonyítékot szolgáltatottak az extragalaktikus eredetre: a kitörések előfordulása gömbszimmetrikusnak bizonyult, és nem mutattak preferált irányt, ami a kozmológiai forrásmodellt erősítette meg.⁴ A GRB-k tehát nemcsak néhány száz fényévnnyire, hanem milliárd fényévnnyi távolságból érkehetnek, ami igen nagy energiakibocsátást feltételez.⁵

A jelenlegi kutatások szerint a gammakitörések fizikailag nem egyetlen osztályba sorolhatók. A legelterjedtebb osztályozás a rövid (< 2 s) és hosszú (> 2 s) kitörések közötti különbséget használja, amelyek eltérő progenitorokra – azaz kiváltó fizikai folyamatokra – utalhatnak.⁶ A hosszú GRB-k jellemzően nagytömegű csillagok összeomlásához (kollapszár modell) vezethetnek, míg a rövid GRB-k valószínűleg két kompakt objektum (neutroncsillag–neutroncsillag vagy neutroncsillag–feketelyuk) összeolvadásakor keletkeznek. Ezt a forgatókönyvet tovább erősítette az a megfigyelés, amikor egyszerre detektáltak gravitációs hullámot és GRB-t.

A gammakitörések megfigyelése számos technikai és módszertani kihívást tartalmaz. A kitörések tipikusan csak rövid ideig tartanak és meglepetésszerűen jelentkeznek, ezért szükségesek folyamatos, nagy látómezős űrteleszkópok és gyors, követő megfigyelések.

² PIRAN 2005.

³ KLEBESADEL–STRONG–OLSON 1973.

⁴ MEEGAN et al. 1992.

⁵ GIOVANNELLI 2025.

⁶ KOSHUT et al. 1996; BERGER 2014.

Az 1990-es évek elején a BATSE több ezer GRB-t azonosított és statisztikai adatbázist hozott létre. Ezt követték a BeppoSAX, HETE-2, majd a Neil Gehrels Swift Observatory és a Fermi Gamma-ray Space Telescope műholdak, amelyek már képesek voltak a kitörések helyének pontos meghatározására és az utófénylés (*afterglow*) korai megfigyelésére is.⁷

A megfigyelések azt mutatták, hogy a GRB-k időbeli lefutása rendkívül változatos: egyesek csak egyetlen rövid impulzust mutatnak, mások többszörös szerkezetűek. Ez a sokféleség szükségessé teszi az időbeli lefolyás alapos vizsgálatát. Ebben kiemelt szerepet kap a kitörés időtartama, amely nemcsak osztályozási szempont, hanem fontos fizikai jelzőként is szolgál.⁸

Az időtartam meghatározása azonban nem pusztán módszertani kérdés: alapvetően meghatározza, hogyan értelmezzük a kitörések fizikai természetét. A rövid és hosszú események mögött eltérő progenitorok állhatnak, és ezek eltérő környezetben keletkeznek. Az időtartam előre jelezheti a spektrális tulajdonságokat, az energiaeloszlást és az utófénylések viselkedését is.⁹

Továbbá, a GRB-k kozmológiai jelentőségük: mivel a fényük akár nagy vöröseltolódott forrásból is érkezik, betekintést nyújtanak a korai csillagkeletkezésbe és a Világegyetem szerkezetének alakulásába. Az időtartam-eloszlás alapos vizsgálata tehát nemcsak az esemény fizikai kiváltó okára utal, hanem arra is, hogy milyen környezetben, milyen távolságból figyeljük meg ezeket a kitöréseket.

A gammakitörések időtartama

A gammakitörések időtartamának pontos meghatározása a megfigyelési asztrofizika egyik alapvető, mégis összetett feladata. Ennek elsődleges oka, hogy a detektált fotonokról – a legtöbb esetben – nem tudhatjuk, pontosan milyen irányból érkeztek. A Swift műhold az egyetlen, amely a kitörések irányát nagy pontossággal képes meghatározni, de az előző generációs műszerek, például a BATSE esetében az egyes fotonok forrásirányáról nincs információnk. Ezért a háttérből származó, illetve a forrásból érkező fotonok egymástól statisztikailag sem mindig különíthetők el. A feladat tehát nem csupán a fénygörbe leírása, hanem annak eldöntése is, hogy mikor kezdődött és mikor ért véget maga a kitörés.

A kitörések fénygörbéjén jól azonosíthatók olyan időszakok, amikor a mért intenzitás szignifikánsan meghaladja a háttérszintet. Ezt a növekedést értelmezzük a kitörés kezdete-ként, azonban a folyamat vége gyakran bizonytalan, mivel a jel fokozatosan tér vissza a háttér szintjére. A fotonok időbeli eloszlása természetesen nem folytonos, hiszen a detektor diszkrét beütéseket mér. Így a „fénygörbe” fogalma is csak statisztikai értelemben érvényes: az egyes fotonbeütéseket adott időintervallumokba rendezzük, majd az adott rekeszben (úgynevezett binben) összesítjük a beérkező fotonok számát. Ezt a műveletet binelésnek nevezzük.

Az így kapott, időben diszkrét adatsor a kitörés időbeli lefolyását mutatja. A hagyományos gyakorlat szerint a binméret az egész adatfolyamon azonos, bár bizonyos esetekben – például rendkívül rövid, néhány tizedmásodperces GRB-k esetén – érdemes változó időfelbontást

⁷ BALÁZS et al. 2006; PÉREZ-RAMÍREZ et al. 2010; HAKKILA et al. 2018; HORVÁTH et al. 2019.

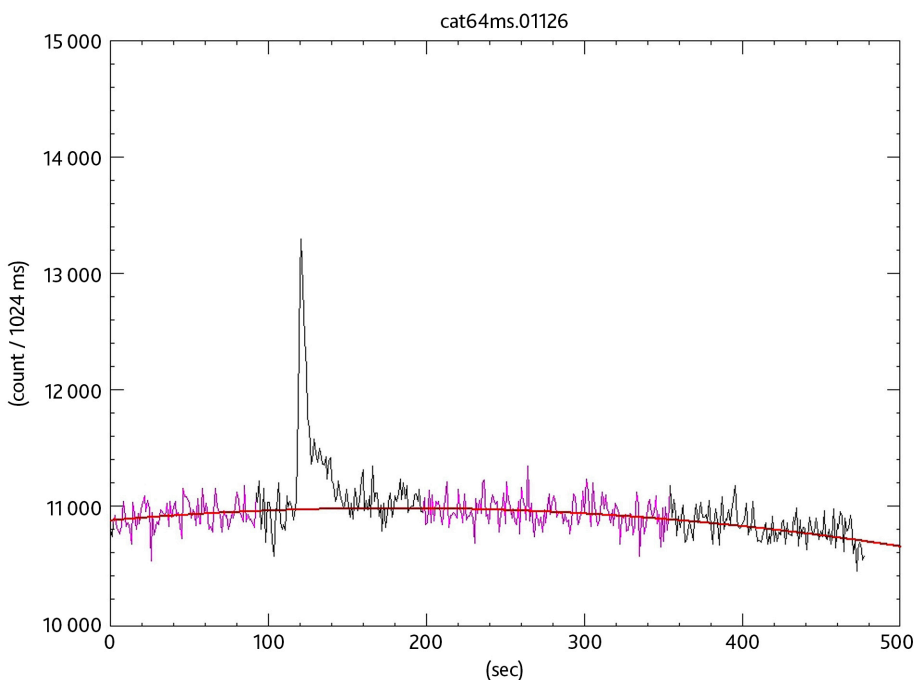
⁸ ZHANG 2018.

⁹ GIOVANNELLI 2025.

alkalmazni. Az egységes binelés ugyanakkor megkönnyíti a különböző események és műszerek adatainak összehasonlítását.

A mért időskála természetesen a választott binhossztól függ: az időtartamot a rekeszhossz egész többszöröseként tudjuk megadni. Ha jobb időfelbontású adat áll rendelkezésre, finomabb, részletesebb leírást is készíthetünk, ami segít a rövid időskálájú változások vizsgálatában. Fontos azonban megérteni, hogy a kitörés alatt folyamatosan érkeznek fotonok a háttérből is. Ezért alapvető fontosságú a háttér intenzitásának és időbeli változásának pontos ismerete – különben a kitörés tényleges hossza és energetikai jellemzői jelentős bizonytalanságot szenvednek.

A probléma itt egy klasszikus körkörös helyzetet mutat: a háttérszintet csak akkor tudnánk jól meghatározni, ha már ismernénk a kitörés időtartamát, ugyanakkor az időtartamot sem tudjuk pontosan megadni a háttér ismerete nélkül. Ebből a circulus vitiosusból a kiutat az úgynevezett „biztos” háttérintervallumok kijelölése jelenti. Ezek olyan időszakok, amelyekről nagy biztonsággal tudjuk, hogy a kitörés előtt vagy után történtek, és nem tartalmaznak a forrásból származó sugárzást. Ezekből az intervallumokból a háttér viselkedése jól modellezhető, és az így kapott illesztés alapján levonható a mért jelből (lásd az 1. ábrát).



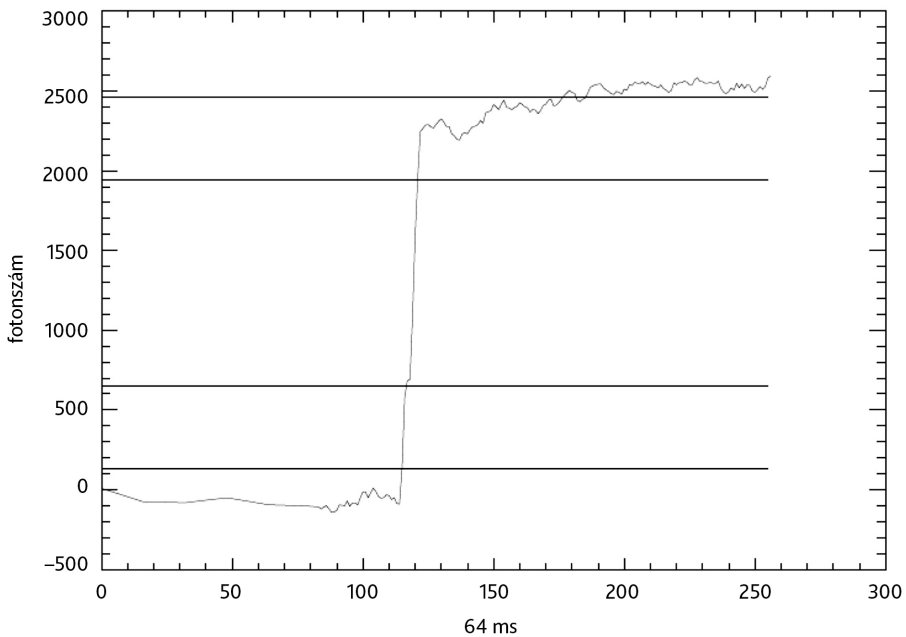
1. ábra: A 01126 számú kitörés gamma „fénygörbéje”. Vízintesen az idő van feltüntetve másodpercekben, függőlegesen a beütésszám

Forrás: a szerző szerkesztése

A BATSE-műszer, a Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) fedélzetén, több mint 2700 kitérését figyelt meg 1991 és 2000 között. Az úgynevezett négycsatornás BATSE-adatok elérhetők a NASA HEASARC adatbázisában, így bármely kutató önállóan is elvégezheti az adatfeldolgozást. Jay Norris és munkatársai¹⁰ részletesen meghatározták a BATSE-kitérés háttér- és kitérés intervallumait, valamint a kitérés idõtartamát jellemzõ mennyiségeket. Mivel ezeket az idõintervallumokat a szakirodalomban széles körben használják, célszerû ezekhez igazodni, így az újabb eredmények közvetlenül összehasonlíthatók korábbi vizsgálatokkal.

Norris és kollégái nemcsak az idõintervallumokat definiálták, hanem a háttérillesztéseket is elvégezték. Eredményeiket saját elemzésemben is ellenõriztem, és hasonló vizsgálatot végezett Varga Balázs diplomamunkájában.¹¹ A három elemzés eredményei néhány ezrelékes pontossággal megegyeztek, ami azt mutatja, hogy a háttér-meghatározás és a kitérés intervallum kijelölése stabil, reprodukálható eljárás.

A jól illesztett háttér levonása után elkészíthetõ az úgynevezett integrális (vagy kumulatív) görbe, amely megmutatja, hogy az adott idõpontig hány foton érkezett a kitérésbõl. Ez a görbe igen szemléletes, mivel egyetlen ábrán mutatja a teljes esemény idõbeli fejlõdését. A 2. és 3. ábrán példaként ilyen integrális görbék láthatók.

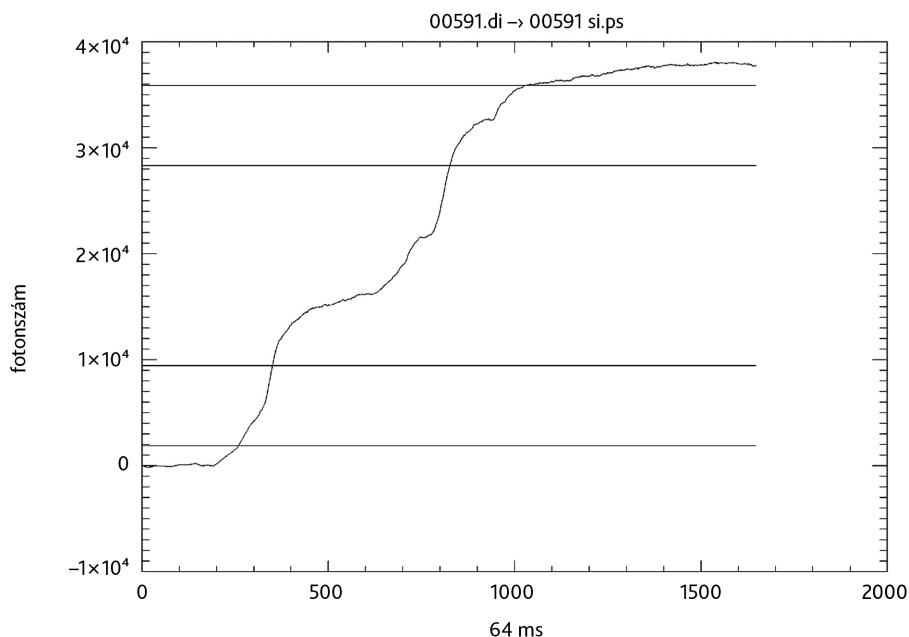


2. ábra: A 00575 számú kitérés integrális „fénygörbéje”. A vízszintes vonalak a teljes energia 5, 25, 75 és 95%-os szintjeit jelölik. Vízszintesen az idő van feltüntetve 64 milliszekundum egységekben

Forrás: a szerző szerkesztése

¹⁰ NORRIS et al. 1997.

¹¹ VARGA 2005.



3. ábra: A 00591 számú kitörés integrális „fénygörbéje”. A vízszintes vonalak a teljes energia 5, 25, 75 és 95%-os szintjeit jelölik

Forrás: a szerző szerkesztése

Az ábrák tanulsága szerint a kitörések kezdete általában jól azonosítható, mivel a fénygörbe meredeken emelkedni kezd. A kitörés vége azonban gyakran bizonytalan, mivel a jel lassan tér vissza a háttérszintre, és sokszor apró utóimpulzusok is megjelennek. Ezt a nehézséget Mazets és munkatársai¹² úgy oldották meg, hogy bevezettek két mennyiséget, amelyekkel a kitörések időtartamát objektív módon lehet jellemezni. Ezek a T_{50} és T_{90} időtartamok. A T_{50} annak az időintervallumnak felel meg, amely alatt a detektor az összes kitörési foton 25%-ától 75%-áig detektálja a beütéseket. A T_{90} ezzel szemben a 5% és 95% közöttit jelöli, vagyis a teljes fotonszám 90%-ának beérkezését.

E definíciók nagy előnye, hogy nem igényelnek szubjektív döntést a kitörés „végéről” – az integrális görbe jól meghatározható szintjeihez kötődnek. A kitörés előtti időszakban a kumulatív görbe közel állandó, a Poisson-zaj miatt apró véletlen ingadozásokkal. Ezt a konstans szintet nullának választhatjuk. A kitörés után a görbe stabilizálódik, és az elért plató értéke megfelel a detektor által regisztrált összes, a kitörésből származó foton számának. Az 5% – 95% szintek alapján így pontosan meghatározható, mikor zajlott le a kitörés „fő része”.

A két időtartam közül a T_{50} általában kisebb hibával határozható meg, mivel a fénygörbe közelebb van a háttérszinthez, nagy jel-zaj arányú szakaszán alapul. Ugyanakkor ez a mutató nem érzékeny a kitörés teljes lefolyására, mert figyelmen kívül hagyja a kezdeti és végső fázisokat. A T_{90} ezzel szemben a kitörés

¹² MAZETS et al. 1981.

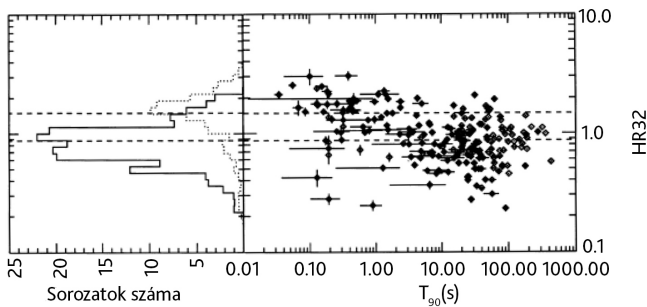
sokkal nagyobb hányadát foglalja magába, így az esemény energetikai karakterét jobban tükrözi. Emiatt a szakirodalomban a T_{90} időtartamot használják a GRB-k jellemzésére.¹³

Az elemzések tapasztalata szerint a kitörések többségénél a T_{90} értéke néhány tizedmásodperctől több száz másodpercig terjedhet. A rövid ($T_{90} < 2$ s) és hosszú ($T_{90} > 2$ s) kitörések elkülönítése a GRB-k osztályozásának egyik alapja, és a progenitorok (azaz a kiváltó fizikai folyamatok) különbözőségére is utal. Fontos megjegyezni, hogy az időtartam statisztikus eloszlása alapvető információt ad a kitörések természetéről és forrásfizikájáról.

A gammakitörések spektrális jellemzője

Egyváltozós analízis helyett többen használtak már többváltozós elemzést.¹⁴ Gammatartományban a BATSE-adatbázis elemzését 1998-ban végezték el főkomponens-analízissel.¹⁵ Kilenc megfigyelt változót figyelembe véve kimutatták, hogy kettő komponenssel leírható a megfigyelt adatok szerkezetének 92%-a. Az első főkomponens magyarázni tudja 65%-ban a kilenc változót, míg a második főkomponens újabb 27%-ot magyaráz. Az első két főkomponens összesen 92%-ot magyaráz.¹⁶ A harmadik főkomponensre, amely újabb 5%-ot magyarázna, már nincs szükség a Jolliffe-kritérium¹⁷ alapján (jelen esetben ez 7,8%). Az első főkomponens lényegében az időtartam volt.

A fentiekből két dolog is következik. Először, hogy célszerű egy változó vizsgálata mellett újabb változókat is használni, hogy a megfigyelt adatok szerkezetét jobban felderítsük. Másrészt egy jól megválasztott második változó esetén nincs szükség újabb változókra, hiszen két háttérváltozóval már jól jellemezhetjük a gammakitörés-megfigyeléseket. Már a rövid és hosszú kitöréseket felfedező cikkben közölték Kouveliotou és társai¹⁸ a 4. ábrát, amelyen az úgynevezett spektrális keménység eloszlását ábrázolták.



4. ábra: Kouveliotou et al. 1993 ábrája. Vízszintesen az időtartam, függőlegesen a kitörések spektrumára jellemző HR32 változó

Forrás: KOUVELIOTOU 1993

¹³ KOSHUT et al. 1996; TARNOPOLSKI 2016.

¹⁴ RAJANIEMI–MÄHÖNEN 2002; HAKKILA et al. 2004; BORGONOVO 2004; ŘÍPA et al. 2012; KOEN–BERE 2012.

¹⁵ BAGOLY et al. 1998.

¹⁶ BAGOLY et al. 1998.

¹⁷ JOLLIFFE 1972.

¹⁸ KOUVELIOTOU 1993.

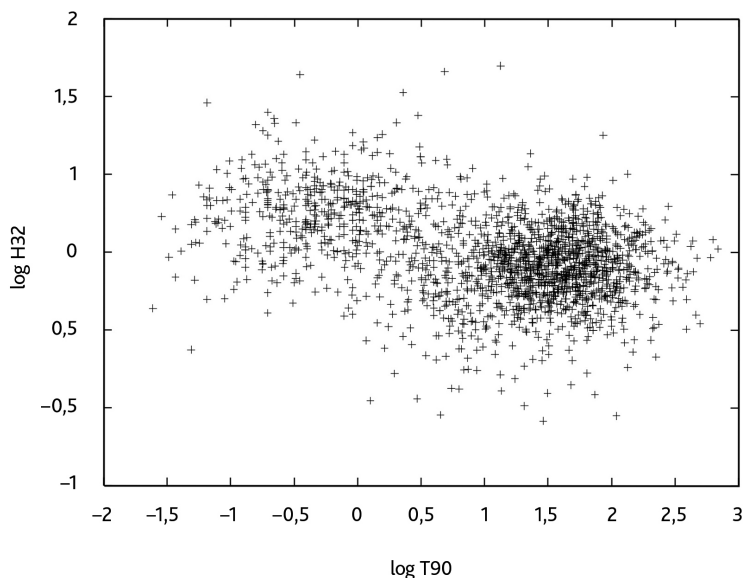
A BATSE-műszer nyolc detektora négy energiacsatornába osztályozta a beérkező fotonokat. Ezek határai a következők:

1. csatorna 25 keV – 58 keV
2. csatorna 58 keV – 115 keV
3. csatorna 115 keV – 320 keV
4. csatorna 320 keV – 1 MeV.¹⁹

Alacsony energián sugárzó gammakitörések esetében lényegében csak az első csatornán mértek beütést. Ezeket a kitöréseket lágy kitöréseknek nevezzük. Azon kitörések, amelyek keményebbek, azaz nagyobb energián is van lényeges kibocsátásuk, a magasabb energiacsatornákon is bocsátottak ki jelentős számban fotonokat. Egy tipikus gammakitörés legalább az első három csatornán produkált beütést, jellemzően a második csatornán a legtöbbet. A kemény kitörések relatíve több fotonbeütést okoztak a harmadik és negyedik csatornán, mint a kevésbé kemény gammakitörések.

A spektrális keménységet jól lehet jellemezni a két középső csatorna beütésszámainak hányadosával. Az így definiált HR32 változó van ábrázolva a 4. ábrán. A kitörések jelentős részének spektruma hatványfüggvénnyel jellemezhető, ezekben az esetekben a keménységi hányados arányos a spektrális indexszel.

A végleges BATSE-katalógusban 1956 olyan kitörés van, amely megtalálható mind az időtartam-, mind a fluxutáblázatban. A teljes adatbázist felhasználva nyerhető az 5. ábra, amelyen az említett 1956 kitörés látható az időtartam–keménység síkon. Ennek az adatbázisnak az értelmezésére, valamint az abból levonható következtetések levonására irányul a következő fejezet.



5. ábra: A BATSE által megfigyelt 1956 gammakitörés az időtartam–keménység síkon

Forrás: a szerző szerkesztése

¹⁹ MEEGAN et al. 1996.

A végleges BATSE-katalógus adatainak elemzése

Az időtartam-változóra előző cikkemben²⁰ megmutattam, hogy a BATSE-adatok sűrűségfüggvénye jól jellemezhető log-normális eloszlások összegével. Hasonló feltételezéssel élhetünk a keménység HR32 változó esetében. Az alakzat hasonlít két kétdimenziós Gauss-eloszlás összegéhez. E kétdimenziós eloszlást fogom a következőkben megvizsgálni.

A *maximum likelihood* módszert használva a megfigyelt 1956 kitörés adatait kétdimenziós Gauss-eloszlásokkal illeszttem, k az illesztett eloszlások száma. A kiszámolandó *likelihood* függvény alakja:

$$L = \sum_{i=1}^N \ln \left(\sum_{l=1}^k w_l f_l(x_i, y_i) \right). \quad (1)$$

Az f_l függvény esetünkben egy kétdimenziós Gauss-eloszlás, öt paraméterrel. f alakja:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \cdot \exp \left(-\frac{1}{2(1-r^2)} \left(\frac{(x-a_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-a_y)^2}{\sigma_y^2} - \frac{2r(x-a_x)(y-a_y)}{\sigma_x\sigma_y} \right) \right). \quad (2)$$

Jelen elemzés esetén T_{90} az x , HR32 az y koordináta, a_x és a_y a középvértékek, a szigmák a szórások és az r pedig a korrelációs koefficiens. A (1) egyenletben szereplő w_l súlyok összege természetesen 1 kell hogy legyen.

Két komponens esetén 11 független paramétert kell illeszteni: négy középvértéket, négy szórást, két korrelációs koefficienst, valamint a két súlyt, amelyekből csak az egyik független.

2006-ban a magyar csoport megvizsgálta,²¹ hogy mennyire tér el a megfigyelt eloszlás a kétkomponensű illesztéstől. A kettőt kivonva egymásból a különbségfüggvénynek mindenütt van értéke, de ez nagyrészt véletlen ingadozás. Kérdés, hogy ezen ingadozások mellett, között található-e a fizikai valóságból származó rész.

1. táblázat: Két komponens esetén a csoportparaméterek

l	w_l	a_x	a_y	σ_x	σ_y	r
1	0,28	-0,233	0,74	0,54	0,26	0,049
2	0,72	1,488	0,40	0,47	0,24	0,128

Forrás: a szerző szerkesztése

²⁰ HORVÁTH 2025.

²¹ HORVÁTH et al. 2006.

Ezek után elvégezték az 1–2 képletek alapján a *maximum likelihood* elemzést. Két komponens esetén a legjobb *likelihood* értéke 1193 volt. Az ezen illesztéshez tartozó paramétereket a 1. táblázat tartalmazza. A $k = 3$ esetben a legjobb *likelihood* érték 1237 volt. A három komponens illesztett paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

A $k = 3$ és a $k = 2$ esetben kapott maximális *likelihoodok* különbsége 44. Esetünkben fennáll a következő összefüggés:

$$2(L_3 - L_2) = \chi_6^2 \quad (3)$$

hiszen a második illesztés esetén 6 új paramétert kellett illeszteni. Ez a különbség 44 a χ_6^2 -eloszlás esetén extrém kicsiny (kisebb, mint 10^{-10}) valószínűségnek felel meg.

Abban az esetben, amikor $k = 4$, a maximális *likelihood* 1243 volt, a javulás 6. A 3 képlet szerint ez 6,2%-os valószínűségnek felel meg. Ez nem kellően szignifikáns, tehát egy negyedik csoport létezését ez az elemzés nem támasztotta alá.

2. táblázat: Három komponens esetén a csoportparaméterek

l	w_l	a_x	a_y	σ_x	σ_y	r
1	0,245	-0,301	0,763	0,525	0,251	0,163
2	0,109	0,637	0,269	0,474	0,344	-0,513
3	0,646	1,565	0,427	0,416	0,210	-0,034

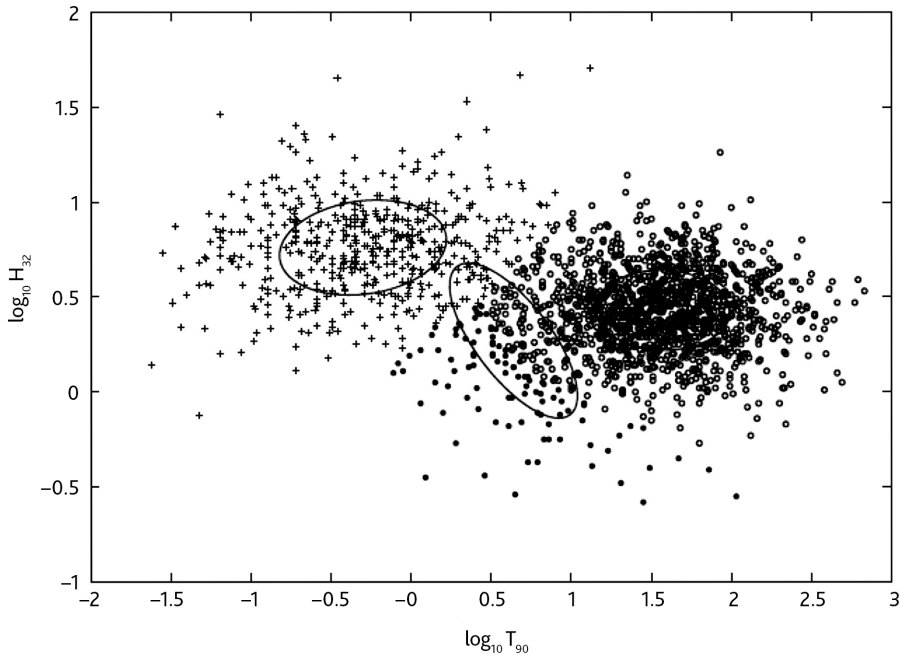
Forrás: a szerző szerkesztése

A *likelihood* jelentős javulása három komponens esetén azt mutatja, hogy az adathalmazból nagy valószínűséggel következik egy harmadik csoport léte (3. táblázat). Négy csoport esetén a *likelihood* nem javul szignifikánsan, tehát negyedik csoportot nem szükséges feltételezni. Az illesztett paramétereket tartalmazza a 2. táblázat, és az illesztett egy szigma-ellipsziseket mutatja a 6. ábra.

3. táblázat: A különböző csoportszámokkal (k) való illesztéseknél kapott *likelihood maximumok* és az azokból számolt szignifikanciák

k	L_{kmax}	$L_{kmax} - L_{(k-1)max}$	szignifikancia
2	1193		
3	1237	44	$1-10^{-10}$
4	1243	6	0,938

Forrás: a szerző szerkesztése



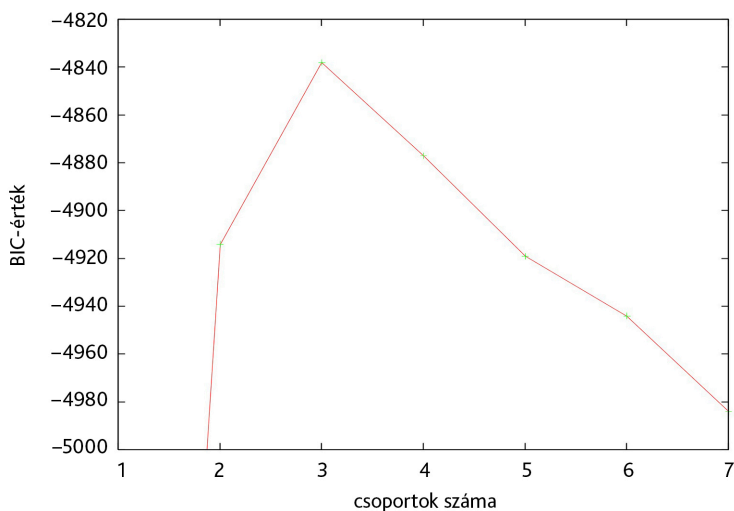
6. ábra: A három csoport (rövid +, hosszú ○, közepes ●) az időtartam–keménység síkon
 Forrás: a szerző szerkesztése

A kétdimenziós számítások elvégzése T50-adattal számolva

A magyar csoport 2006-ban²² közölt állításait megvizsgálhatjuk T50-adatokkal is. Az ott használt 1956 BATSE-gammakitörés adataival újra elvégeztem a számításokat a T50 – H32 síkon. Az ott publikáltak a következők: a *likelihood* javulása $1 \cdot 10^{-10}$ -re szignifikáns két csoportról háromra való áttérésnél. A negyedik csoportot bevezetve a javulás nem szignifikáns. Ugyanez olvasható le a Bayesi Információs Értéket (Bayesian Information Criterion, BIC), mutató 7. ábráról is.

A T50 – H32 síkon elvégezve az elemzést a következőt kaptam: a *likelihood* maximális értéke két 2D Gauss-eloszlást illesztve $-2497,03$, míg három esetén $-2463,58$. A kettő különbsége $33,45$, aminek duplája $66,9$, ez hat szabadsági fokú χ^2 eloszlás esetén minimum $1 \cdot 10^{-9}$ szignifikanciát jelent. Négy darab 2D Gauss-eloszlás esetén a maximális *likelihood* $-2459,454$. Az eltérés a három Gauss-eloszlás illesztésekor kapott maximális *likelihood* értéktől $4,126$, ez 22% valószínűségnek felel meg, ami nem szignifikáns.

²² HORVÁTH 2006.



7. ábra: A Bayesi Információs Értékek (Bayesian Information Criterion, BIC) különböző csoportszámok esetén a T90 – H32 síkon történt illesztéseknél

Forrás: a szerző szerkesztése

4. táblázat: Három komponens esetén a csoportparaméterek a T50 – H32 síkon történt illesztések esetén

csoport	w_i	log T50	log H32	r
rövid	0,21	-0,76	0,75	0,16
közepes	0,13	0,12	0,41	-0,40
hosszú	0,66	1,07	0,43	0,015

Megjegyzés: w_i jelöli, hogy a csoporttagok hányadrészét teszik ki a teljes mintának, r pedig a korrelációs együtthatót

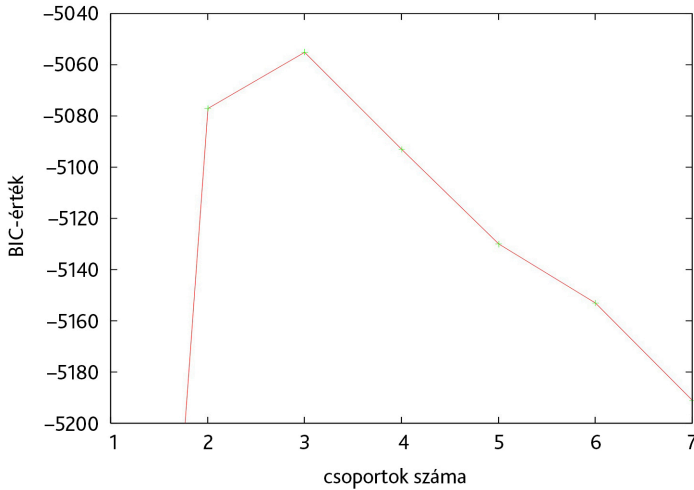
Forrás: a szerző szerkesztése

Tehát a T50 – H32 síkon vett illesztések esetén is, ha Gauss-eloszlásokkal illesztjük a megfigyelt adatok eloszlását, három komponens léte a legvalószínűbb (az illesztett paraméterek becsült értékét a 4. táblázat mutatja). Ezt támasztják alá a BIC-értékek is (8. ábra). A tíznél nagyobb eltérés a BIC-értékben erős evidenciát mutat.

A 4. táblázat adatai szerint az előző fejezet állítása T50 használatával is igazolható. Ugyanis ahogy az a 4. táblázatból látható, a közepes időtartamú gammakitörések spektruma a leglágább, azaz spektrális keménységük a legkisebb, így bár az időtartamuk a két főtípus közötti, a spektrumuk nem.

Az adódott korrelációs koefficiensek (szintén a 4. táblázatban láthatóak) T50 használata esetén is mutatják, hogy a rövid és hosszú időtartamú gammakitörés-csoport esetén minimális

korreláció van csak, míg a közepes időtartamú kitöréscsoport esetén negatív korreláció áll fenn. Ez arra is mutathat, hogy más fizikai folyamat van ezen kitörések hátterében.



8. ábra: A Bayesi Információs Értékek (Bayesian Information Criterion, BIC) különböző csoportszámok esetén a T₅₀ – H32 síkon történt illesztéseknél

Forrás: a szerző szerkesztése

Összefoglalás

A jelen tanulmány célja a gammakitörések időtartam- és spektrális jellemzőinek újbóli vizsgálata, különös tekintettel a BATSE-katalógus adataira, valamint a T₅₀ és T₉₀ időparaméterek alkalmazhatóságára a csoportosításban. A munka első fejezete áttekintette a GRB-k felfedezésének történetét, fizikai hátterét és osztályozási alapjait, hangsúlyt fektetve arra, hogy a rövid és hosszú kitörések eltérő asztrofizikai eredetűek lehetnek. A vizsgálat kiindulópontja az volt, hogy a CGRO/BATSE-műszer által gyűjtött nagy méretű adathalmaz megbízható alapot nyújthat a statisztikai és fizikai értelmezéshez.

A második fejezet részletesen tárgyalta az időtartam meghatározásának módszertanát. A fotonbeütések időbeli eloszlásának elemzése, a háttérmodellezés és az integrális fénygörbék konstruálása mind elengedhetetlen lépés a GRB-k objektív jellemzéséhez. Kiemeltük a T₅₀ és T₉₀ definíciók fizikai értelmezését, valamint azt, hogy a T₉₀ paraméter használata a nemzetközi gyakorlatban is elfogadott, mivel a kitörés fő szakaszát átfogó módon reprezentálja. A fejezet arra is rámutatott, hogy a háttér szintjének pontos ismerete alapvető a kitörés valódi hosszának és energiájának becsléséhez.

A harmadik fejezet a spektrális jellemzők vizsgálatát mutatta be. A BATSE-detektorok négy energiaszornában mérték a beérkező fotonokat, így a spektrális keménység (HR32) kiszámítása lehetővé tette a kitörések energiaszerkezetének tanulmányozását. Az időtartam–keménység

diagram (T_{90} –HR32) segítségével a GRB-k jól elkülöníthető populációkat mutatnak, ami alátámasztja a többféle fizikai eredet hipotézisét. A rövid, kemény és a hosszú, lágy kitörések mellett egy közepes, átmeneti csoport létezését is kimutattam.

A negyedik és ötödik fejezetek statisztikai módszerekkel – elsősorban maximum *likelihood* illesztéssel és Bayes Információs Érték (BIC) számításával – elemezték a megfigyelt eloszlásokat. Az eredmények szerint a kétkomponensű modell nem ad kielégítő leírást, míg a háromkomponensű Gauss-eloszlás szignifikánsan jobb illeszkedést mutatott. Ez megerősíti, hogy a BATSE-adatok alapján a GRB-k három, egymástól jól elkülöníthető csoportba sorolhatók. A negyedik komponens bevezetése nem hozott statisztikailag jelentős javulást, így további csoportok létezése jelen adathalmaz alapján nem valószínűsíthető.

A T_{50} adatok felhasználásával végzett elemzések megerősítették a T_{90} -alapú következtetéseket: mindkét időparaméter esetén három stabil csoport jelenik meg. A közepes időtartamú kitörések spektruma a leglágyabb, ami arra utal, hogy e populáció fizikai eredete különbözik a klasszikus rövid és hosszú GRB-től. Az eredmények összhangban vannak korábbi kutatásokkal²³ és tovább erősítik a háromosztályos modell létjogosultságát.

Összességében a dolgozat megerősítette, hogy a gammakitörések időtartam- és spektrális tulajdonságai nem írhatók le egyszerű, kéttípusú rendszerrel. A részletes statisztikai elemzés alátámasztja a közepes időtartamú, spektrálisan lágy GRB-k létezését, ami új megközelítéseket kínál a progenitorok és a kitörési mechanizmusok vizsgálatában. A T_{50} és T_{90} paraméterek egymást kiegészítő alkalmazása pedig lehetővé teszi a jövőbeli megfigyelések összehasonlítását, függetlenül a műszeres különbségektől. A jelen kutatás eredményei hozzájárulnak ahhoz, hogy a GRB-k osztályozása, fizikai értelmezése és kozmológiai jelentősége pontosabb, egységesebb képet nyerjen a modern asztrofizikai kutatásokban.

Felhasznált irodalom

- BAGOLY, Zsolt et al. (1998): Principal Component Analysis of the 3B Gamma Ray Burst Data. *Astrophysical Journal*, 498(1), 342–348. Online: <http://dx.doi.org/10.1086/305530>
- BALÁZS, L. G. et al. (2006): A Possible Interrelation Between the Estimated Luminosity Distances and Internal Extinctions of Type IA Supernovae. *Astronomische Nachrichten*, 327(9), 917–923. Online: <https://doi.org/10.1002/asna.200610649>
- BERGER, Edo (2014): Short-Duration Gamma-Ray Bursts. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 43–105. Online: <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035926>
- BORGONOVO, Luis (2004): Bimodal Distribution of the Autocorrelation Function in Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics*, 418(2), 487–493. Online: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20034567>
- GIOVANNELLI, Franco (2025): Gamma-Ray Bursts: The Energy Monsters of the Universe. *Galaxies*, 13(2). Online: <https://doi.org/10.3390/galaxies13020016>
- HAKKILA, J. et al. (2004): Subgroups of Gamma-Ray Bursts. *Baltic Astronomy*, 13, 211–216. Online: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004BaltA..13..211H/abstract>
- HAKKILA, J. et al. (2018): Properties of Short Gamma-ray Burst Pulses from a BATSE TTE GRB Pulse Catalog. *The Astrophysical Journal*, 855(2). Online: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaac2b>

²³ HORVÁTH 1998; HORVÁTH 2002; MÉSZÁROS et al. 2006.

- HORVÁTH, István (1998): A Third Class of Gamma-Ray Bursts? *The Astrophysical Journal*, 508(2), 757–759. Online: <https://www.doi.org/10.1086/306416>
- HORVÁTH, István (2002): A Further Study of the BATSE Gamma-Ray Bursts Duration Distribution. *Astronomy & Astrophysics*, 392(3), 791–793. Online: <https://www.doi.org/10.1051/0004-6361:20020808>
- HORVÁTH István (2025): A gammakitöréshosszúság-adatok vizsgálatának ellenőrzése a CGRO T50 időtartamok használatával. *Műszaki Katonai Közlöny*, 35(2), 97–106. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2025.2.7>
- HORVÁTH, István et al. (2006): A New Definition of the Intermediate Group of Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics*, 447(1), 23–30. Online: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041129>
- HORVÁTH, István et al. (2019): Multidimensional Analysis of Fermi GBM Gamma-Ray Bursts. *Astrophysics and Space Science*, 364(6). Online: <https://doi.org/10.1007/s10509-019-3585-1>
- JOLLIFFE, Ian T. (1972): Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I. Artificial Data. *Applied Statistics*, 21(2), 160–173. Online: <https://doi.org/10.2307/2346488>
- KLEBESADEL, Ray W. – STRONG, Ian B. – OLSON, Roy A. (1973): Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. *The Astrophysical Journal*, 182, L85–L88. Online: <https://doi.org/10.1086/181225>
- KOEN, Chris – BERE, A. (2012): On Multiple Classes of Gamma-Ray Bursts, as Deduced from Autocorrelation Functions or Bivariate Duration/Hardness Ratio Distributions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 420(1), 405–415. Online: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.20045.x>
- KOSHUT, Thomas M. et al. (1996): Systematic Effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts. *Astrophysical Journal*, 463(2), 570–579. Online: <https://doi.org/10.1086/177272>
- KOUVELIOTOU, Chryssa et al. (1993): Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts. *Astrophysical Journal Letters*, 413(2), L101–L104. Online: <https://doi.org/10.1086/186969>
- MAZETS, Evgenii Pavlovich et al. (1981): Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts from the KONUS Experiment Data. I. *Astrophysics and Space Science*, 80(1), 3–83. Online: <https://doi.org/10.1007/BF00649140>
- MEEGAN, Charles A. et al. (1992): Spatial Distribution of Gamma-Ray Bursts Observed by BATSE. *Nature*, 355, 143–145. Online: <https://doi.org/10.1038/355143a0>
- MEEGAN, Charles A. et al. (1996): The Third BATSE Gamma-ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement*, 106, 65–110. Online: <https://doi.org/10.1086/192329>
- MÉSZÁROS, Attila et al. (2006): Redshift Distribution of Gamma-Ray Bursts and Star Formation Rate. *Astronomy & Astrophysics*, 455(3), 785–790. Online: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20053807>
- NORRIS, J. P. et al. (1997): Attributes of Pulses in Long Bright Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, 459(1), 393–412. Online: <https://doi.org/10.1086/176902>
- PÉREZ-RAMÍREZ, D. et al. (2010): Detection of the High-z GRB 080913 and Its Implications on Progenitors and Energy Extraction Mechanisms. *Astronomy and Astrophysics*, 510. Online: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811151>
- PIRAN, Tsvi (2005): *The Physics of Gamma-Ray Bursts. Reviews of Modern Physics*, 76(4), 1143–1210. Online: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.1143>
- RAJANIEMI, H. J. – MÄHÖNEN, P. (2002): Classifying Gamma-Ray Bursts using Self-organizing Maps. *The Astrophysical Journal*, 566(1), 202–209. Online: <https://doi.org/10.1086/337959>
- ŘÍPA, Jakub et al. (2012): On the Spectral Lags and Peak Counts of the Gamma-Ray Bursts Detected by the RHESSI Satellite. *The Astrophysical Journal*, 756(1), 44. Online: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/756/1/44>
- TARNOPOLSKI, Mariusz (2016): Analysis of the Observed and Intrinsic Durations of Swift/BAT Gamma-Ray Bursts. *New Astronomy*, 46, 54–59. Online: <https://doi.org/10.1016/j.newast.2015.12.006>
- VARGA Balázs (2005): *Gammakitörések vizsgálata*. Diplomamunka. ELTE TTK.
- ZHANG, Bing (2018): *The Physics of Gamma-Ray Bursts*. Cambridge: Cambridge University Press. Online: <https://doi.org/10.1017/9781139226530>

Tartalom

ÁDÁM BALÁZS: <i>Objektumok robbantás elleni védelmének kialakítási lehetőségei</i>	5
SZEPESI VIKTOR: <i>Ukrajna humanitárius aknamentesítésének problémája a korszerű technológiák és lehetőségek tükrében</i>	33
KARDOS GERGELY: <i>Kémények robbantásos bontása beépített környezetben</i>	45
KRISZTIÁN VÉGH: <i>Issues of Countering Unmanned Aircraft Vehicles Concerning Deployed Forces</i>	59
ISTVÁN EMBER: <i>Possible Applications of Photopolymerisation Additive Manufacturing Processes in the Armed Forces</i>	73
MENTOLAI SEBASTIAN: <i>Robbanóanyag-analitikai vizsgálati módszerek alkalmazása a robbanóanyagokkal elkövetett bűncselekmények felderítésében</i>	85
PAP ANDREA, VÉG RÓBERT LÁSZLÓ: <i>Térszemlélet fejlesztése a katonai logisztikában 3D-nyomtatás és számítógéppel támogatott műszaki modellezés (CAD) által – 2. rész</i>	101
NAGY ZSOLT, HOKSTOK KINGA: <i>Reziliencia és pszichoszociális kockázatok a hivatásos szolgálatban</i>	117
HORVÁTH KRISZTIÁN: <i>Többtest-dinamika és kapcsolt szimulációk alkalmazása a védelmi iparban</i>	131
HORVÁTH ISTVÁN: <i>A gammakitörés-hosszúság és a spektrális keménységi adatok vizsgálatainak ellenőrzése a CGRO T50 és H32 adatok használatával</i>	143