



# MŰSZAKI KATONAI KÖZLÖNY

## Kiemelt közlemények

**VÉGH KRISZTIÁN:**

*Az erők védelme: a drónok kihívása*

**HEGEDŰS GERGELY, MOLNÁR PÉTER,  
DARUKA NORBERT:** *Robbanóanyag-  
feldolgozó üzem technológiai  
környezetének tervezése*

**ÁBEL PÁLMA ROXÁNA:** *A robbantások  
detektálásának lehetősége ionoszonda  
alkalmazásával*

**36. évf. (2026)  
2. szám**

ISSN 2063-4986 (elektronikus)



**LUDOVIKA**  
EGYETEMI KIADÓ

## **Műszaki Katonai Közlöny**

A Nemzeti Közzolgálati 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

Ember István

Hanka László

Hornycsek Júlia

Horváth Tibor

Kovács Tibor

Kovács Zoltán

Kuti Rajmund

Lőrincz Árpád

Lukács László

Pavel Manas

Nagy Rudolf

Tóth Rudolf

### **Szerkesztőség címe**

Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar  
Műveleti Támogató Tanszék

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

Levelezési cím: 1581 Budapest, Pf. 15

E-mail: [kovacs.zoltan@uni-nke.hu](mailto:kovacs.zoltan@uni-nke.hu)

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

### **Kiadó**

Nemzeti Közzolgálati Egyetem Ludovika Egyetemi Kiadó

Kapcsolat: [www.ludovika.hu](http://www.ludovika.hu); [kiadvanyok@uni-nke.hu](mailto:kiadvanyok@uni-nke.hu)

1083 Budapest, Ludovika tér 2.

A kiadásért felel: Deli Gergely rektor

Olvasószerkesztők: Farkas-Nagy Judit, Resofszki Ágnes

Tördelőszerkesztő: Fehér Angéla



## Tartalom

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Végh Krisztián                                                                                                                          |     |
| Az erők védelme: a drónok kihívása .....                                                                                                | 5   |
| Hegedűs Gergely, Molnár Péter, Daruka Norbert                                                                                           |     |
| Robbanóanyag-feldolgozó üzem technológiai környezetének tervezése .....                                                                 | 19  |
| Ábel Pálma Roxána                                                                                                                       |     |
| A robbantások detektálásának lehetősége ionoszonda alkalmazásával .....                                                                 | 39  |
| Pap Andrea, Vég Róbert László                                                                                                           |     |
| Térszemlélet fejlesztése a katonai logisztikában 3D-nyomtatás és számítógéppel támogatott műszaki modellezés (CAD) által, 3. rész ..... | 51  |
| Druzsín József                                                                                                                          |     |
| A honi légvédelem SzA-75M Dvina és Sz-75M Volhov közepes hatótávolságú légvédelmi rakétarendszerei .....                                | 65  |
| Horváth Krisztián                                                                                                                       |     |
| Vízi és víz alatti járművek csatolt vibroakusztikai modellezése .....                                                                   | 87  |
| Mészáros Zalán, Berek Tamás                                                                                                             |     |
| A 2M39 Poszeidón nukleáris fegyverrendszer hatásainak vizsgálata víz alatti nukleáris robbantások eredményei alapján .....              | 111 |
| Kovács-Szegedi Ildikó, Dobor József                                                                                                     |     |
| Agrárvegyszerek: kockázatkezelés és jogi keretek, 1. rész .....                                                                         | 125 |
| Lilla Horváth                                                                                                                           |     |
| The Importance of Base Layer in Firefighting Operations .....                                                                           | 143 |
| Baumann Szilárd                                                                                                                         |     |
| Mi is szolgálunk! .....                                                                                                                 | 153 |





Végh Krisztián<sup>1</sup> 

# Az erők védelme: a drónok kihívása

## Force Protection: Challenge of the Drones

*A tanulmány az erők védelme (force protection, FP) és a drónvédelem (C-UAS) kapcsolatát vizsgálja a modern műveleti környezetben. A pilóta nélküli repülőeszközök elterjedése új, alacsony észlelhetőségű és gyorsan adaptálható fenyegetéseket hozott létre, amelyek jelentősen növelik a katonai erők sérülékenységet. Az FP a NATO-doktrína szerint keresztfunkcionális tevékenységrendszer, amely a személyi állomány, az infrastruktúra és a haditechnikai eszközök védelmét, valamint a műveleti szabadság fenntartását szolgálja. A tanulmány rámutat, hogy a drónfenyegetés kezelése integrált megközelítést igényel, amelyben kiemelt szerepet kap a műszaki támogatás. Az erődítési tevékenység, az álcázás és a helyreállítási képességek hozzájárulnak a túlélőképesség növeléséhez. Következtetésként megállapítható, hogy a műszaki rendszabályok a korszerű, adaptív és rétegzett védelem alapvető elemei.*

**Kulcsszavak:** erők védelme, túlélőképesség, drónveszély

*The study examines the relationship between Force Protection (FP) and counter-unmanned aerial systems (C-UAS) within the modern operational environment. The proliferation of unmanned aerial vehicles has introduced new, low-observable and rapidly adaptable threats that significantly increase the vulnerability of military forces. According to NATO doctrine, FP is a cross-functional set of activities aimed at protecting personnel, infrastructure, and military equipment, while ensuring freedom of action. The study highlights that addressing the drone threat requires an integrated approach in which engineering support plays a key role. Fortification activities, camouflage, and recovery capabilities all contribute to enhancing survivability. It can be concluded that engineering measures constitute essential components of a modern, adaptive, and layered defence system.*

**Keywords:** force protection, survivability, drone threat

---

<sup>1</sup> Doktori hallgató, Nemzeti Közszoigalati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, e-mail: [vegh.krisztian@hm.gov.hu](mailto:vegh.krisztian@hm.gov.hu)

## Bevezetés

Az erők védelme (*force protection*, FP) a modern katonai műveletek egyik alapvető és nélkülözhetetlen funkciója, amely valamennyi vezetési szinten meghatározza a műveletek sikerességét és fenntarthatóságát. A NATO doktrínája szerint napjaink műveleti környezetében az erők védelmének jelentősége tovább növekszik, mivel a fenyegetések spektruma kiszélesedett, gyorsabban változik és egyre inkább többdimenziós jelleget ölt. A hagyományos frontvonalak látszólagos és fokozatos eltűnésével a veszélyek a teljes műveleti térben, beleértve a háterszágot, a kiberteret és az alacsony magasságú légtartományt, egyaránt megjelennek, ami komplex és integrált védelmi megközelítést tesz szükségessé.

Ebben a kontextusban a pilóta nélküli repülőeszközök (*unmanned aerial vehicles*, UAV) megjelenése és tömeges elterjedése új minőségi kihívást jelent az erők védelme számára. A kis méretű, alacsony radar-keresztmetszetű és kis hőkibocsátású, gyakran COTS<sup>2</sup>-drónok képesek a hagyományos védelmi rendszerek kijátszására, miközben felderítési, célmegjelölési vagy közvetlen csapásmérő képességeket biztosítanak az alkalmazóik számára. Az ilyen eszközök alkalmazása különösen veszélyes, mivel viszonylag alacsony költséggel, gyorsan adaptálható módon és akár tömegesen (rajokban) is bevetethők. A NATO-doktrína<sup>3</sup> által is hangsúlyozott sérülékenységek kihasználása – ami a drónok alkalmazóinak egyik alapvető törekvése – a drónok esetében különösen hatékonyan valósul meg, hiszen ezek az eszközök képesek a kritikus infrastruktúrák, vezetési és irányítási pontok, logisztikai bázisok vagy akár mozgó erők gyors és pontos felderítésére, majd támadására.

A drónfenyegetés rámutat arra, hogy a védelem nem korlátozódhat az egyes objektumokra. A teljes rendszerre és annak hálózati kapcsolataira is ki kell terjednie. Ennek megfelelően a modern drónvédelem és így az FP nem statikus védelem, hanem dinamikus, adaptív rendszer, amely képes reagálni a gyorsan változó fenyegetési környezetre, ilyen értelemben „fenyegetettségvezérelt”. A drónok által generált új típusú veszélyek az erők védelmét a katonai műveletek központi elemévé emelik, ami nélkül a műveleti szabadság és a küldetés sikeres végrehajtása kérdésessé válik.

A tanulmány célja annak vizsgálata, hogy a pilóta nélküli repülőeszközök által generált fenyegetések miként alakítják át az erők védelmének hagyományos értelmezését és milyen módon integrálhatók a műszaki támogatás rendszabályai a korszerű, rétegzett védelem kialakításába. Ennek érdekében a kutatás doktrinális elemzésre, szakirodalmi feldolgozásra, valamint aktuális műveleti tapasztalatok szintetizálására épül.

A nemzetközi szakirodalom is egyre hangsúlyosabban kezeli a C-UAS<sup>4</sup>-képeségek integrációját az erők védelmének rendszerében, különösen a hibrid hadviselés és az autonóm rendszerek elterjedésének kontextusában.

<sup>2</sup> COTS: *commercial-off-the-shelf* – kereskedelmi forgalomban kapható.

<sup>3</sup> NATO 2024.

<sup>4</sup> C-UAS: *counter-unmanned aerial systems* – pilóta nélküli rendszerek elleni védelem/ellentevékenységek.

## Az erők védelmének alapjai

Az erők védelme kérdésköre már a korai kétezres években elkezdte foglalkoztatni a hazai katonai gondolkodókat. Kovács Tibor és Talián István, mint a témakör úttörői, értelmezésében az erők védelme:

„[A]z FP mindazon rendszabályok és eljárások összessége, amelyek végrehajtásának célja, hogy csökkentsék a saját személyi állomány, a létesítmények, a felszerelések, a hadműveletek és az információk sérülékenységet bármilyen ellenséggel és fenyegetéssel szemben minden helyzetben, ezzel megőrizve a saját cselekvési szabadságot és a saját haderők műveleti hatékonyságát. E célok a kockázati tényezők helyes és folyamatos kezelésével érhetők el.”<sup>5</sup>

Az erők védelme gyakorlati megvalósítása érdekében célszerű azt funkcionális komponensekre bontani. Ilyen komponensek különösen a fenyegetések felderítése és értékelése, a sérülékenységek azonosítása, a kockázatkezelési intézkedések kialakítása, valamint az aktív és passzív védelmi rendszabályok integrált alkalmazása. A fenti komponensek egymással szoros kölcsönhatásban működnek, és csak integrált alkalmazásuk esetén képesek biztosítani az erők védelmének kívánt szintjét. Ennek hiányában a védelem széttagolttá válik, ami a sérülékenységek növekedéséhez vezethet. E megközelítés lehetővé teszi, hogy az FP ne pusztán elméleti konstrukcióként, hanem végrehajtható, mérhető és adaptálható rendszerként jelenjen meg a műveleti tervezésben.

A Kovács Tibor és Faa József általi fordítás alapján:

„[A] Force Protection mindazon rendszabályok és eljárások összessége, amelyek végrehajtásának célja, hogy csökkentsék a saját személyi állomány, a létesítmények, a felszerelések, a hadműveletek és a vezetés-irányítási és informatikai rendszerek sérülékenységet bármilyen ellenséggel és fenyegetéssel szemben, minden helyzetben, ezzel megőrizve a saját cselekvési szabadságot és a saját haderők műveleti hatékonyságát. E célok a kockázati tényezők helyes és folyamatos kezelésével érhetők el.”<sup>6</sup>

Az AJP-3.14 értelmezésében a fenyegetések és veszélyek spektruma minden műveleti dimenzióban és környezetben, beleértve a kiberteret és a világűrt, folyamatosan bővül és egyre gyorsabban változik. A műveleti környezetben gyakran nem különíthetők el egyértelműen a frontvonalak és a háterszág területei, és a szemben álló fél várhatóan bárhol támadhatja a szövetséges erők gyenge pontjait, egyre szélesebb körű, azonos vagy közel azonos képességekkel rendelkező rendszerek alkalmazásával. Ebben a tekintetben az UAV sem jelent kivételt. Az ezen kiadvány korábbi változataiban szereplő fenyegetés- és veszélykezelési módszerek többsége ma is ugyanolyan hatékony, mint a hidegháború időszakában (amikor az FP-t *survive to operate* megközelítésként értelmezték), a balkáni műveletek során, valamint később, az afganisztáni

<sup>5</sup> KOVÁCS–TALIÁN 2005.

<sup>6</sup> KOVÁCS–FAA 2004.

műveletekhez igazított alkalmazásukkor. A hatékony, kockázatalapú FP kulcsa a szövetséges erők és partnerek felkészültsége, akik intézményesítették az FP alapelveit, módszertanát és kompetenciáit, miközben rendelkeznek azzal a szellemi rugalmassággal is, amely minden vezetési szinten lehetővé teszi ezen elvek és módszerek alkalmazkodását a megjelenő új kihívásokhoz.

A doktrína definíciója:

„Minden olyan intézkedés és eszköz, amelynek célja a személyi állomány, a létesítmények, a haditechnikai eszközök, a műveletek és tevékenységek sérülékenységeinek csökkentése a fenyegetésekkel és veszélyekkel szemben, annak érdekében, hogy biztosítsa az erők műveleti szabadságát és harcértékének megőrzését, ezáltal hozzájárulva a küldetés sikeréhez.”<sup>7</sup>

Megfigyelhető, hogy a definíció különbséget tesz a *threats*, mint fenyegetés és a *hazards*, mint veszélyforrás között. A *fenyegetések* spektruma a pszichológiai fenyegetésektől a törvényes rend hiányán, a terrorizmuson, felkelésen és belső fenyegetéseken keresztül egészen az ellenséges államokig és ellenséges haderőig terjedhet. A terrorfenyegetés a tevékenységek teljes spektrumát lefedheti, a hírszerzési adatgyűjtéstől és emberrablástól kezdve a nagyszabású, tömeges áldozatokkal járó támadásokig. A NATO-nak képesnek kell lennie a szükséges ellenintézkedések alkalmazására a CBRN<sup>8</sup>-események megelőzése, az azok elleni védelem és a következmények felszámolása érdekében. A NATO-vezetésű erők fokozottan ki vannak téve a nem hagyományos fenyegetéseknek is, beleértve a kibertérben végrehajtott támadásokat.

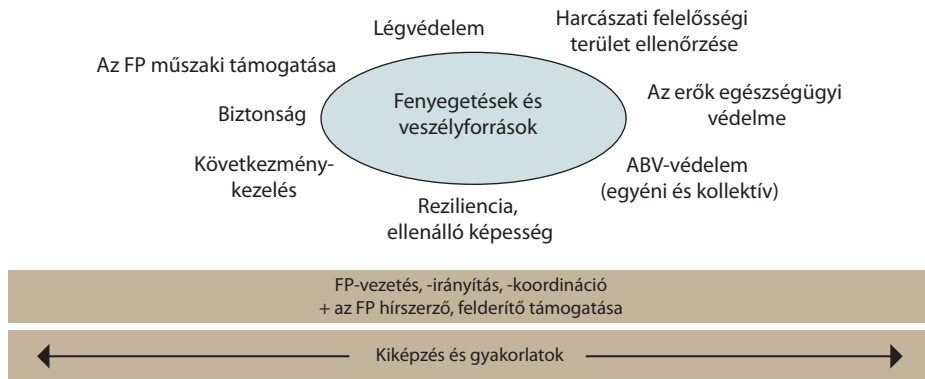
A *veszélyforrások* tekintetében elmondható, hogy a NATO tevékenységének jellegéből adódóan előfordulhat, hogy természeti katasztrófákra (például földrengés, cunami, aszály, tűzvész, hurrikán stb.) vagy járványokra, pandémiákra kell reagálnia. Emellett természeti katasztrófák olyan térségben is bekövetkezhetnek, ahol a NATO katonai műveleteket folytat. Az időjárás, az éghajlat, a tengerszint feletti magasság, a terepviszonyok, a növényzet, az állatok és kártevők, az élelmiszer- és vízforrások, a higiéniai körülmények, a fertőző betegségek, a zaj, a pszichológiai és fizikai megterhelések, a biológiai ágensek, a természetes és mesterséges vegyi anyagok, valamint a helyi lakossággal való érintkezés mind veszélyt jelentenek a NATO tevékenységében részt vevő személyi állomány (katonai és civil) számára. Fontos továbbá megjegyezni, hogy az ellenséges tevékenység – akár szándékos, akár nem szándékolt következményként – szintén veszélyforrást teremthet, például ha a szemben álló fél tevékenysége TIM<sup>9</sup> kiszabadulásával járó eseményt idéz elő.

Az FP kapcsán tehát egy olyan keresztfunkcionális törzsfunkcióról van szó, amelynek működtetése hozzájárulhat a biztonságos feladat-végrehajtáshoz mind az ellenséges tevékenységek okozta hatások, mind a természeti vagy ember által okozott katasztrófák által bonyolulttá tett környezetben. Ennek a keresztfunkcionalitásnak az ábrázolása (1. ábra) azt szemlélteti, hogy melyek azok a – jelenleg beazonosított – szakterületek, amelyek együttműködése leginkább a középpontban áll.

<sup>7</sup> A NATO 2024 megfogalmazása alapján fordította a szerző.

<sup>8</sup> CBRN: *chemical, biological, radiological, nuclear* – vegyi, biológiai, radiológiai és nukleáris.

<sup>9</sup> TIM: *toxic industrial material* – mérgező ipari anyag.



1. ábra: Az FP keresztfunkcionális feladatai

Forrás: a szerző szerkesztése NATO 2024 alapján

Az 1. ábra tanúsága szerint – annak összeállítása időszakában – a megadott felelősségi körök és szakterületek együttműködését tartották a szerzők szükségesnek a fenyegetések és veszélyforrások kezeléséhez. A harcászati felelősségi terület ellenőrzése azonban – figyelembe véve a hazai értelmezéseket – további magyarázatra szorulhat: az FP kijelölt területen belüli, fenyegetésekkel és veszélyekkel szembeni koordinációjának elősegítése érdekében létrehozható egy TAOR,<sup>10</sup> amelynek elsődleges feladata a mélységi védelem biztosítása. Ennek célja, hogy megakadályozza mind a közvetlen, mind a közvetett támadásokat a küldetés szempontjából létfontosságú eszközök, infrastruktúra és a személyi állomány ellen.

A TAOR kialakítása során a drónfenyegetés sajátosságait is figyelembe kell venni. A kis magasságú, lassú és kis radar-keresztmetszetű célok elleni védelem integrálása a TAOR rendszerébe új követelményeket támaszt, különösen az érzékelési zónák, a reagálási idők és a felelősségi körök meghatározása tekintetében. Ennek hiányában a TAOR mélységi védelmi funkciója részlegessé válna.

Az adott műveleti helyszín környezete határozza meg, hogy milyen FP-intézkedéseket, -feladatokat és -tevékenységeket szükséges alkalmazni az aktuális fenyegetések és veszélyforrások elleni hatékony ellentevékenység érdekében, ezáltal hozzájárulva a biztonságos műveleti környezet kialakításához (fenyegetettség és veszélyforrás-vezéreltség).

Az ismertetett megfogalmazásból kiolvasható, hogy nem pusztán a személyi állomány túlélőképessége van a fókuszban, ennek megfelelően az erők védelme nem helyezhető és rendelhető kizárólag a műszaki csapatok túlélőképessége fenntartásának és fokozásának feladatrendszerébe. Az FP lényege kiterjed a műveleti biztonság, a kritikus infrastruktúra védelme, a vezetés-irányítás folytonossága és végeredményben a műveleti célok elérésének gondolatiságára, az FP megvalósulása tehát egyik alapvető eleme a műveletek sikeres végrehajtásának.

Értelmezésem szerint az FP nem önálló szervezeti elemként, hanem keresztfunkcionális képességrendszerként értelmezhető, amely a különböző szakterületek integrált működésén

<sup>10</sup> TAOR: tactical area of responsibility – harcászati felelősségi terület.

alapul, azok eredményeinek felhasználásával. Az FP százszázalékos megvalósulása egy ideális vagy kívánt állapot, olyan helyzet vagy körülmény, amelynek fennállása és megvalósulása esetén a haderő alaprendeltetésű feladatainak végrehajtását akadályozó tényezőket, körülményeket vagy hatásokat az adott műveleti törzs kiiktatja, a keresztfunkcionalitáson alapuló FP elméletére alapozott gyakorlat szerint.

Kissé visszatekintve világosan látszik, hogy a doktrína keletkezésének évében (2024) abból indultak ki, hogy a drónfenyegetés nem tűnt említésre méltó kategóriának (két alkalommal említi az UAS és egyszer a C-UAS fogalmát), vagy azt egyszerűen a légvédelem feladatkörébe helyezték. Ma már egyértelműen megállapítható, hogy mindkét feltételezés meghaladtottá vált, és a drónfenyegetés alulértékelése a védelem hiányosságaihoz vezethet. Ennek fényében kifejezetten előremutatónak látom a NATO nemzeteinek, köztük Magyarországnak, azon belül a Magyar Honvédségnek az önálló kutatásait, amelyek eredményeinek közös felhasználása fokozhatja a problémakör megértését és a megfelelő eljárásrendek kialakítását.

Az erők védelmét nevezhetjük feladatnak, feltételnek, keresztfunkcionális törzsfunkciónak. Jelenleg bizonyosnak tűnik, hogy az FP és a drónvédelem összefüggéseinek további vizsgálata megkerülhetetlen, mivel kiemelkedő katonai jelentősége van.

## A drónok jelentette kihívás az erők védelme elméletében

Az UAS fejlődése az elmúlt három évtizedben alapvetően átalakította a hadviselés jellegét, különösen az erők védelmének követelményeit. Kezdetben a drónok elsősorban ISR<sup>11</sup>-feladatokat láttak el, és főként állami szereplők alkalmazták őket magas költségű és komplex rendszerek formájában. Ebben az időszakban az erők védelme elsősorban a hagyományos fenyegetésekre – például tűzérési csapásokra, légi támadásokra vagy diverzáns tevékenységre – fókuszált, miközben a drónok inkább támogató szerepet töltek be a célfelderítésben és a helyzetismeret biztosításában.

A 2000-es évek elejétől azonban a technológiai fejlődés és a COTS-drónok elterjedése új dimenziót nyitott a fenyegetési környezetben. Az alacsony költségű, könnyen beszerezhető és gyorsan módosítható eszközök megjelenése lehetővé tette nem állami szereplők számára is, hogy drónokat alkalmazzanak. Ezek az eszközök már nemcsak felderítésre, hanem közvetlen támadások végrehajtására is alkalmassá váltak, például IED<sup>12</sup> célba juttatásával. Ez a változás jelentősen növelte az erők sérülékenységét, különösen a statikus célpontok, így az előretolt bázisok, logisztikai csomópontok esetében. Az erők védelmének ebben a szakaszban alkalmazkodnia kellett az alacsony magasságú, nehezen észlelhető fenyegetésekhez, ami új érzékelési rendszerek fejlesztését és ellentétevényiségek bevezetését tette szükségessé.

A legújabb fejlődési szakaszban a drónok alkalmazása egyre inkább a hálózatos, koordinált és autonóm működés irányába halad. A rajokban alkalmazott UAS-ek képesek túlterhelni a hagyományos légvédelmi rendszereket. Ezzel párhuzamosan a cirkáló löszerek és az MI<sup>13</sup>-alapú

<sup>11</sup> ISR: *intelligence, surveillance, reconnaissance* – hírszerzés, megfigyelés, felderítés.

<sup>12</sup> IED: *improvised explosive device* – improvizált robbanószerkezet.

<sup>13</sup> MI: mesterséges intelligencia.

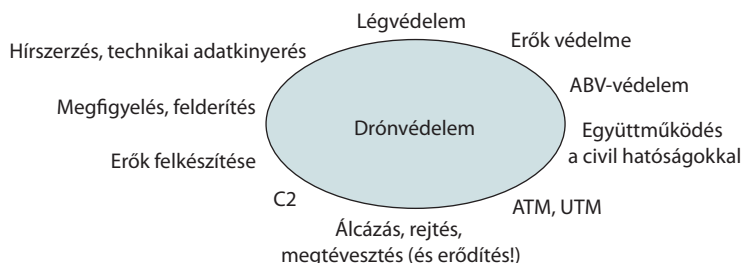
autonóm rendszerek integrációja tovább növeli a támadások pontosságát és hatékonyságát. Mindez azt eredményezi, hogy az erők védelme már nem korlátozódhat egyes objektumok fizikai védelmére, hanem komplex, rétegzett és integrált rendszerként kell működnie, amely egyaránt magában foglalja a hírszerzést, a felderítést, az előrejelzést vagy riasztást, az aktív és passzív védelem elemeit, valamint a gyors reagálást és helyreállítást.

A drónfenyegetések rendszerezése alapján megkülönböztethetők felderítő, csapásmérő, elektronikai hadviselési, valamint kombinált alkalmazású UAS-ek. E kategóriák eltérő védelmi megközelítést igényelnek, amely indokolttá teszi a differenciált, képességalapú C-UAS rendszer kialakítását az FP keretrendszerén belül.

A drónvédelem kérdéskörének alapvető fontosságú NATO-dokumentuma<sup>14</sup> szerint a kis méretű pilóta nélküli légi rendszerek által jelentett fenyegetés alapvetően átalakítja az erők védelmének követelményeit. Ennek következtében a drónvédelem nem tekinthető önálló képességnek, hanem az szoros összefüggést mutat az erők védelmének rendszerével, amely a légvédelem, az elektronikai hadviselés és a parancsnoki rendszerek szoros együttműködésén alapul. A hatékony védelem rétegzett megközelítést igényel, amely magában foglalja az érzékelést, a célkövetést, az azonosítást, a döntéshozatalt és a megfelelő hatás kiváltását, miközben figyelembe kell venni a járulékos károk minimalizálását is. A dokumentum rámutat arra, hogy a drónfenyegetés kezelése nem csupán technológiai, hanem komplex műveleti és doktrinális kihívás.

A hatékony drónvédelem megvalósítása érdekében célszerű a C-UAS-folyamatot egy döntési ciklus mentén értelmezni, amely magában foglalja az észlelést, azonosítást, követést, döntéshozatalt és a megfelelő hatás kiváltását. E ciklus egyes elemeinek késedelme vagy hiányossága a teljes rendszer hatékonyságát csökkentheti. A döntési ciklus lerövidítése kulcsfontosságú tényező a drónfenyegetések elleni védelemben, mivel a kis méretű és gyorsan alkalmazott eszközök esetében a reakcióidő közvetlenül befolyásolja a védelem sikerességét. A C-UAS rendszer működésének főbb elemeit a 2. ábra mutatja be.

A 2. ábra nemcsak a funkcionális kapcsolatokat tárja fel, hanem rámutat arra is, hogy a különböző szakterületek közötti információáramlás kulcsszerepet játszik a reakcióidő csökkentésében, amely a drónfenyegetések elleni védelem egyik kritikus tényezője.



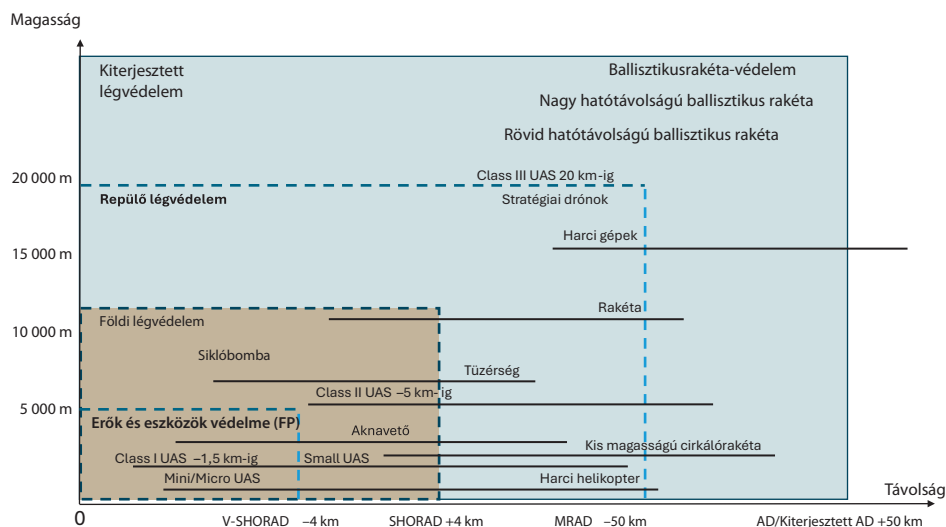
2. ábra: A C-UAS keresztfunkcionális feladatai

Forrás: a szerző szerkesztése és kiegészítése NATO 2025 alapján

<sup>14</sup> NATO 2025.

Bár a 2. ábra logikusan felépített rendszert szemléltet, ugyanakkor több elem – különösen az ATM<sup>15</sup> és az UTM<sup>16</sup> kapcsolódása – további pontosítást igényel a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából. Az ATM lényege a légi forgalom biztonságos és hatékony irányítása, amely magában foglalja a repülőgépek elkülönítését, útvonaltervezését, valamint a légiforgalmi irányítók és technológiai rendszerek összehangolt működését a késések csökkentése és a kapacitás optimalizálása érdekében, figyelembe véve időjárási és biztonsági tényezőket. Az UTM célja a pilóta nélküli légi járművek forgalmának biztonságos és hatékony kezelése, beleértve az autonóm drónok koordinációját, útvonaltervezését és elkülönítését, amely biztosítja az integrációt a hagyományos légi forgalommal, minimalizálva a kockázatokat és optimalizálva a légtér kihasználását.

Az FP és a C-UAS keresztfunkcionalitását szemléltető ábra vizsgálata rámutat, hogy a számos, természetszerűen eltérő funkció mellett megjelennek közös attribútumok is. Ilyenek a légvédelem, a CBRN és a műszaki támogatás szakterületei, utóbbi esetében ez az álcázás (binnen a rejtés és megtévesztés) területére összpontosul. Figyelembe véve ugyanakkor a tényt, hogy az orosz–ukrán konfliktusban jelenleg az ukrán fél mintegy négyezer kilométernyi útszakaszt tervez drónhálóval megerősíteni,<sup>17</sup> úgy vélem, hogy a drónvédelem feladatrendszerében kiemelten szükséges lenne megjeleníteni a műszaki támogatás fontosságát és szerepét. Hozzáteszem, hogy a 2025-ben jóváhagyott és elfogadott doktrínában kicsivel több mint egy év elteltével nem ezt az egyetlen, mára zárójelbe teendő állítást rögzítették.



3. ábra: A C-UAS integrált „all domain” felépítése

Forrás: a szerző szerkesztése NATO 2025 alapján

<sup>15</sup> ATM: *air traffic management* – légiforgalmi irányítás.

<sup>16</sup> UTM: *unmanned traffic management* – pilóta nélküli légieszközök légiforgalmi irányítása.

<sup>17</sup> Reuters 2026.



A 3. ábra alapján a NATO kategorizálása szerinti Class I UAS műveleti magassága 1500 méter (5000 láb). Ezzel szemben mind az orosz, mind pedig az ukrán oldalon alkalmaznak olyan, ebbe a kategóriába tartozó drónokat, amelyek ezt a repülési magasságot lényegesen meghaladják. Talán elég megemlíteni egyik oldalról a Shark, a Bober, a Furia, másik oldalról pedig a híres Orlan-10, Gerbera vagy KUB-BLA drónokat. Mindez arra mutat rá, hogy a folyamatos és alapos vizsgálat és kutatás jelentőségét nem szabad alábecsülni, hiszen a védelem kialakítása során ezeknek az adatoknak kiemelkedő szerepük van.

## A műszaki csapatok a drónvédelem szolgálatában

A műszaki támogatás szerepe az FP és a C-UAS összefüggérendszerében értelmezhető leginkább, ahol a műszaki rendszabályok hidat képeznek a passzív védelem és az aktív ellenintézkedések között. Ebben az értelemben a műszaki támogatás nem csupán támogató, hanem integráló funkciót is betölt.

Az erők védelme és a drónvédelem műszaki támogatási feladatainak beazonosítása céljából fontos röviden áttekinteni a műszaki támogatást mint a harctámogatás egy fajtája feladatrendszerének sokszínűségét.

A műszaki támogatás magába foglalja mindazokat a speciális rendszabályokat és tevékenységeket, amelyeket a harc, hadművelet, valamint a nem háborús katonai műveletek előkészítése és végrehajtása időszakában műszaki feltételként meg kell teremteni a feladatot végrehajtó csapatok tevékenységének sikeres megvalósításához.

Ennek megfelelően a műszaki csapatok fő feladatai:

- a saját csapatok mozgékonyságának biztosítása;
- az ellenség mozgékonyságát akadályozó feladatok;
- a saját csapatok túlélőképességét biztosító feladatok;
- az egyéb műszaki feladatok.<sup>18</sup>

A saját csapatok túlélőképességének fenntartását, fokozását biztosító feladatok mindazon rendszabályok és tevékenységek összessége, amelyek a személyi állomány, a technikai eszközök, valamint az anyagi készletek megóvását lehetővé teszik. A csapatok az erődítési tevékenységet folyamatosan végzik a harc előkészítése és megvívása során a terep és objektumok védő és álcázó képességeinek kihasználásával, a technikai eszközök alkalmazásával, robbanóanyagok és felszerelések felhasználásával és a helyszíni szükséganyagok széles körű kihasználásával.

A megfogalmazott célok elérését a meghatározott, illetve a birtokba vett körletek, terepszakaszok, állások és vezetési pontok körleteinek tábori erődítési berendezése biztosítja alapvetően. Ennek célja a csapatok személyi állománya védettségének növelése, a harci-technikai eszközök hatékonyságának fokozása, a vezetés folyamatosságának biztosítása, valamint az anyagi eszközök megóvása. Úgy vélem, ez a műszaki alapfeladat kifejezett analógiát mutat mind az erők védelme, mind a drónvédelem tekintetében.

<sup>18</sup> Kovács 2022: 10–12.

A túlélőképesség fenntartása és fokozása szempontjából az álcázás műszaki rendszabályainak végrehajtása szintén kiemelt fontosságú, mint azt láthattuk a 2. ábrán. Az álcázás magába foglalja a rejtés, színlelés és az ellenség megtévesztése feladatainak megvalósítását. Mindennek célja a csapatok tevékenysége jellegének, összetételének, helyzetének elfedése az ellenség elől, ezáltal a túlélőképesség fokozása. A műszaki rendszabályok magukba foglalják a csapatok elhelyezésének, tevékenységének és fontos objektumainak rejtését, valamint színlelt körletek és objektumok műszaki berendezését és fenntartását. Az álcázás műszaki rendszabályainak megvalósítását a fegyvernemek és szakcsapatok önállóan, illetve a műszaki csapatokkal együttműködve hajthatják végre. Az álcázás feladatrendszerén belül fontos szerepe van az úgynevezett csapatálcázásnak. A csapatálcázás magába foglalja a rendszeresített rejtő eszközök és a csapatok által készített álcák használatát; az álcázó festés alkalmazását; a növényzet és a helyi álcázó eszközök széles körű felhasználását, valamint a terep álcázó megmunkálásának végrehajtását. Értelmezésem szerint a drónvédelem alapvető támogató funkcióját lehet az álcázás feladatrendszerében felfedezni.

Az egyéb műszaki feladatok rendszerén belül a fegyverek csapásai következményeinek felszámolását biztosító műszaki rendszabályok szintén támogathatják az erők védelmére fordított erőfeszítéseket. Céljuk a csapatok harcképességének helyreállítása és a szükséges műszaki feltételek megteremtése a harctevékenység sikeres megvívásához. A csapások következményeinek felszámolását és a harcképesség helyreállítását célzó rendszabályok lehetnek a csapások körzeteinek felderítése, az erődítési építmények helyreállítása, rombolt utak, átkelőhelyek, objektumok helyreállítása, a technikai eszközök mentése, tüzek lokalizálása és oltása.

A fenti elemzés alapján megállapítható, hogy a műszaki támogatás komplex feladatrendszere szoros és többdimenziós kapcsolatban áll az erők védelmével, valamint a korszerű drónvédelem megvalósításával. A saját csapatok túlélőképességének biztosítása érdekében végrehajtott erődítési tevékenységek, az álcázás különböző formái, valamint a csapásokat követő helyreállítási műveletek nem csupán hagyományos harctámogató elemekként értelmezhetők, hanem a modern fenyegetések, különösen a C-UAS alapvető komponenseiként is.

Legfőképpen az álcázás rendszabályai emelhetők ki, amelyek az érzékelésen alapuló felderítő és csapásmérő drónrendszerek ellen nyújtanak hatékony passzív védelmet. Emellett az erődítési megoldások<sup>19</sup> növelik a fizikai ellenálló képességet, míg a helyreállítási képességek biztosítják a harcképesség gyors regenerálását egy esetleges támadást követően.

A műszaki támogatás nem csupán kiegészítő, hanem integráns eleme a korszerű FP- és C-UAS-megközelítésnek, enélkül egyik szakterület sem lehet sikeresen biztosítható. A jövő hadviselésében, ahol a drónfenyegetés folyamatosan növekvő szerepet játszik, a műszaki rendszabályok adaptív, integrált alkalmazása kulcsfontosságú a műveleti siker és a csapatok védelmének biztosítása érdekében.

A fentiek alapján kijelenthető, hogy a műszaki támogatás nem csupán reagál a fenyegetésekre, hanem proaktív módon képes alakítani a műveleti környezetet, ezáltal csökkentve a drónfenyegetések hatékonyságát.

<sup>19</sup> SZABÓ–KOVÁCS–TÓTH 2011.

## Gyakorlati implikációk és alkalmazási lehetőségek

A vizsgált összefüggések alapján megállapítható, hogy a pilóta nélküli repülőeszközök által generált fenyegetések nem csupán elméleti vagy doktrinális szinten jelentenek kihívást, hanem közvetlen hatással vannak a műveleti tervezésre és végrehajtásra is. Ennek megfelelően az erők védelme és a drónvédelem integrációja nem halasztható feladat, hanem olyan gyakorlati követelmény, amelynek már a felkészítés és a művelettervezés fázisában meg kell jelennie.

Elsődlegesen kiemelandő, hogy az FP rendszereinek kialakítása során a drónfenyegetést mint alapértelmezett kockázati tényezőt szükséges kezelni. Ez azt jelenti, hogy a tábori elhelyezési körletek, vezetési pontok, logisztikai bázisok és egyéb kritikus infrastruktúrák kijelölésekor és kialakításakor figyelembe kell venni az alacsony magasságú légi fenyegetések jelenlétét. Ennek hiányában a hagyományos védelmi rendszabályok – különösen a statikus objektumvédelem – csak részlegesen lehetnek hatékonyak.

A műszaki támogatás gyakorlati alkalmazása szempontjából ez többek között az erősítési rendszabályok újragondolását teszi szükségessé. A hagyományos fedezékek és védművek mellett meg kell jelenniük azoknak a megoldásoknak is, amelyek kifejezetten a felülről érkező fenyegetések ellen nyújtanak védelmet, ideértve a lefedéseket, hálórendszereket vagy egyéb fizikai akadályokat. Az ukrainai tapasztalatok is azt mutatják, hogy az ilyen jellegű műszaki megoldások képesek csökkenteni a drónok által okozott veszteségeket, különösen tömeges alkalmazás esetén.

Az álcázás és megtévesztés rendszabályainak alkalmazása szintén új értelmezést nyer a drónfenyegetés kontextusában. A vizuális rejtés mellett egyre nagyobb jelentőséget kap a multispektrális álcázás, valamint a színlelt célok alkalmazása, amelyek alkalmasak az ellenség érzékelési és döntési ciklusának megzavarására.<sup>20</sup> Ezen rendszabályok hatékony alkalmazása nemcsak a felderíthetőséget csökkenti, hanem az ellenséges erőforrások lekötését is eredményezheti.

Fontos továbbá hangsúlyozni a helyreállítási képességek szerepét, amelyeknek a dróncsapások következményeinek kezelésében van kiemelt jelentőségük. A gyors reagálás, a károk felmérése és a működőképesség helyreállítása hozzájárul a műveleti folyamatosság fenntartásához, illetve csökkenti az ellenség által elérni kívánt hatásokat. Ebben a tekintetben a műszaki csapatok szerepe meghatározó, különösen a kritikus infrastruktúrák helyreállítása és a mozgékonyság biztosítása területén.

A drónvédelem hatékony megvalósítása ugyanakkor nem képzelhető el kizárólag műszaki rendszabályok alkalmazásával. Szükséges a légvédelem, az elektronikai hadviselés, valamint a vezetés-irányítási rendszerek integrált működése, amely biztosítja a gyors döntéshozatalt és a megfelelő válaszintézkedések végrehajtását. Ebben a rendszerben a műszaki támogatás olyan stabil alapot képez, amelyre a többi képesség ráépülhet.

Megállapítható, hogy a drónfenyegetés által meghatározott műveleti környezetben az erők védelme csak akkor lehet hatékony, ha az FP és a C-UAS képességeket integrált, kockázatalapú

<sup>20</sup> SZABÓ–KOVÁCS–KOVÁCS 2006.

és adaptív rendszerként alkalmazzák. Ennek központi eleme a műszaki támogatás, amely nem csupán kiegészíti, hanem alapvetően meghatározza a védelem gyakorlati megvalósíthatóságát.

## Összegzés

A tanulmány során arra kerestem a választ, hogy a pilóta nélküli légi eszközök elterjedése milyen módon alakítja át a katonai műveleti környezetet, és milyen következményekkel jár a csapatok biztonságának fenntartására nézve. Megállapítottam, hogy ezek az eszközök új dimenziót nyitnak a fenyegetések között, különösen a nehezen észlelhető és gyorsan alkalmazható megoldások révén, amelyek jelentősen növelik a sérülékenységet, és folyamatos kockázatot jelentenek a teljes műveleti térben.

Elemzésem során rámutattam, hogy a korábban alkalmazott és modernnek tekintett eljárások már nem feltétlenül korszerűek, ezért a különböző szakterületek összehangolt működése és a témakör folyamatos vizsgálata és értékelése elengedhetetlen feladat. Ebben a rendszerben kiemelt jelentőséget tulajdonítok a műszaki szakfeladatoknak, amelyek a védelem egyik alapját képezik. Az erősítési tevékenységek révén növelhető a fizikai ellenálló képesség, így a csapatok rezilienciája, míg az álcázás és megtévesztés megfelelően végrehajtott feladatai csökkenthetik a felderíthetőséget és a célpontképzést. A terep tudatos felhasználása, a létesítmények megfelelő kialakítása, valamint a technikai és helyi erőforrások egyidejű alkalmazása mind hozzájárulhatnak a túlélőképesség fokozásához. A korszerű műveleti környezetben az álcázás már nem korlátozódhat a vizuális rejtésre, hanem ki kell terjednie a multispektrális tartományokra is, beleértve az infravörös, rádiófrekvenciás és akusztikai jellemzők csökkentését. Ez különösen a drónok szenzoralapú felderítési képességei miatt válik meghatározóvá.

Külön figyelmet fordítottam a csapatokat követő helyreállítási képességekre is, amelyek biztosítják a működőképesség gyors visszaállítását, ezáltal csökkentve a támadások hatásait. Megállapítottam, hogy a műszaki támogatás nem pusztán kiegészítő elem, hanem a védelem meghatározó pillére.

Arra a következtetésre jutottam, hogy a jövőben az FP és a C-UAS hatékonysága nagymértékben azon múlik, hogy a katonai szervezetek képesek-e integrálni a drónelhárítási képességeket és az erők védelme érdekében kifejtett erőfeszítéseiket egy adaptív, kockázat-alapú és többdimenziós védelmi rendszerbe, amely nagymértékben támaszkodik a műszaki támogatásban megtalálható lehetőségekre.

A tanulmány egyik fő hozzájárulása, hogy a műszaki támogatást nem pusztán támogató, hanem integráló funkcióként értelmezi az erők védelme és a drónvédelem rendszerében, amely új megközelítést kínál a korszerű, rétegzett védelem kialakításához.

Mindezek alapján indokoltnak tekinthető az erők védelmének olyan újraértelmezése, amelyben a drónfenyegetés nem különálló kihívásként, hanem az FP rendszerét alapvetően meghatározó tényezőként jelenik meg.

Ennek megfelelően az erők védelmének jövőbeni fejlesztése elképzelhetetlen a drónfenyegetés rendszerszintű integrálása nélkül, ami a katonai gondolkodás és doktrinális fejlesztés egyik meghatározó irányává válik.

## Felhasznált irodalom

- KOVÁCS Tibor – FAA József (2004): A „Force Protection” – feladatok tartalma, tervezése, végrehajtása az állampolgárok érdekében folytatott bűnmegelőző tevékenység során. *Műszaki Katonai Közlöny*, 14(1–4), 75–89. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/3100/2349>
- KOVÁCS Tibor – TALIÁN István (2005): A csapatok védettsége növelésének lehetséges feladatai. *Műszaki Katonai Közlöny*, 15(1–4), 69–80. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/3042/2302>
- KOVÁCS Zoltán (2022): *Mozgásakadályozás: elvek, módszerek és eszközök*. Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó. Online: [https://doi.org/10.36250/01056\\_00](https://doi.org/10.36250/01056_00)
- NATO (2024): *Allied Joint Doctrine for Force Protection (AJP-3.14)*. Edition B, Version 1. NATO Standardization Office.
- NATO (2025): *Countering Class I Unmanned Aircraft Systems (ATP-117)*. Edition A. NATO Standardization Office.
- Reuters (2026): Ukraine to Cover 4,000 km of Roads with Anti-Drone Nets by Year-End, Minister Says. *Reuters*, 2026. február 25. Online: <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/ukraine-cover-4000-km-roads-with-anti-drone-nets-by-year-end-minister-says-2026-02-25/>
- SZABÓ, Sándor – KOVÁCS, Tibor – KOVÁCS, Zoltán (2006): Cover and Concealment Material and Equipment in the Hungarian Defence Forces and Possible Ways for Development. *AARMS*, 5(1), 51–58.
- SZABÓ, Sándor – KOVÁCS, Zoltán – TÓTH, Rudolf (2011): Force Protection Solutions with HESCO Bastion Concertainer. *AARMS*, 10(1), 31–59.



Hegedűs Gergely,<sup>1</sup>  Molnár Péter,<sup>2</sup>  Daruka Norbert<sup>3</sup> 

# Robbanóanyag-feldolgozó üzem technológiai környezetének tervezése

## Design of the Technological Environment for an Explosives Processing Plant

*A robbanásveszélyes anyagokat feldolgozó ipari létesítmények tervezése összetett mérnöki és biztonságtechnikai feladat, amely megköveteli a technológiai folyamatok, a létesítménykialakítás és a védelmi intézkedések integrált szemléletű kezelését. A tanulmány célja a robbanóanyag-ipari létesítmények technológiai és biztonsági tervezésének kockázatalapú megközelítésben történő elemzése, különös tekintettel a biztonságos üzemeltetést biztosító térbeli elrendezésre, védelmi rendszerekre és kockázatcsökkentési megoldásokra. A vizsgálat során a vonatkozó hazai jogszabályi környezet, valamint a nemzetközi robbanásbiztonsági szabványok és ajánlások (különösen az IATG, AASTP és DGUV irányelvek) összehasonlító elemzése történt, kiegészítve kockázatértékelési módszerek – így a legrosszabb eset alapú megközelítés és a kvalitatív és kvantitatív elemzési eljárások – alkalmazásával.*

*Az eredmények rámutatnak, hogy a biztonságos létesítménytervezés alapját a safety by design szemlélet, az expozíció minimalizálása, valamint a többrétegű védelmi rendszerek (defence in depth) következetes alkalmazása képezi. A technológiai folyamatok és az építészeti kialakítás összehangolása, a veszélyes és inert zónák megfelelő elkülönítése, valamint a védőtávolságok és robbanásvédelmi megoldások helyes meghatározása jelentősen csökkenti a baleseti kockázatokat és azok következményeit. A tanulmány hozzájárul egy integrált, kockázatalapú tervezési szemlélet kialakításához, amely támogatja a robbanóanyag-ipari létesítmények biztonságos és hatékony megvalósítását, valamint a hazai és nemzetközi előírásoknak való megfelelést.*

**Kulcsszavak:** robbanásbiztonság, kockázatalapú tervezés, kockázatértékelés, robbanóanyag-ipari létesítmények, védőtávolság

<sup>1</sup> Robbantástechnikai szakmérnök, e-mail: [gergely.hegedus@hirtenberger.com](mailto:gergely.hegedus@hirtenberger.com)

<sup>2</sup> Robbantástechnikai szakmérnök, e-mail: [peter.molnar@hirtenberger.com](mailto:peter.molnar@hirtenberger.com)

<sup>3</sup> Robbanóanyag-ipari szakmérnök, e-mail: [daruka.norbi@gmail.com](mailto:daruka.norbi@gmail.com)

*The design of industrial facilities that process explosive materials is a complex engineering and safety task that requires an integrated approach to technological processes, facility layout, and protective measures. The aim of this study is to analyse the technological and safety design of facilities in the explosives industry using a risk-based approach, with particular emphasis on spatial layout, protective systems, and risk mitigation solutions that ensure safe operation.*

*During the study, a comparative analysis was conducted of the relevant domestic regulatory framework as well as international explosion safety standards and recommendations (particularly the IATG, AASTP, and DGUV guidelines), supplemented by the application of risk assessment methods – such as the worst-case scenario approach and qualitative and quantitative analysis procedures. The results highlight that the foundation of safe facility design is the "safety by design" approach, the minimisation of exposure, and the consistent application of defence-in-depth systems. The coordination of technological processes and architectural design, the proper separation of hazardous and inert zones, and the correct determination of safety distances and explosion protection solutions significantly reduce accident risks and their consequences. This study contributes to the development of an integrated, risk-based design approach that supports the safe and efficient implementation of facilities in the explosives industry, as well as compliance with domestic and international regulations.*

**Keywords:** explosion safety, risk-based design, risk assessment, explosives industry facilities, safety distance

## Bevezetés

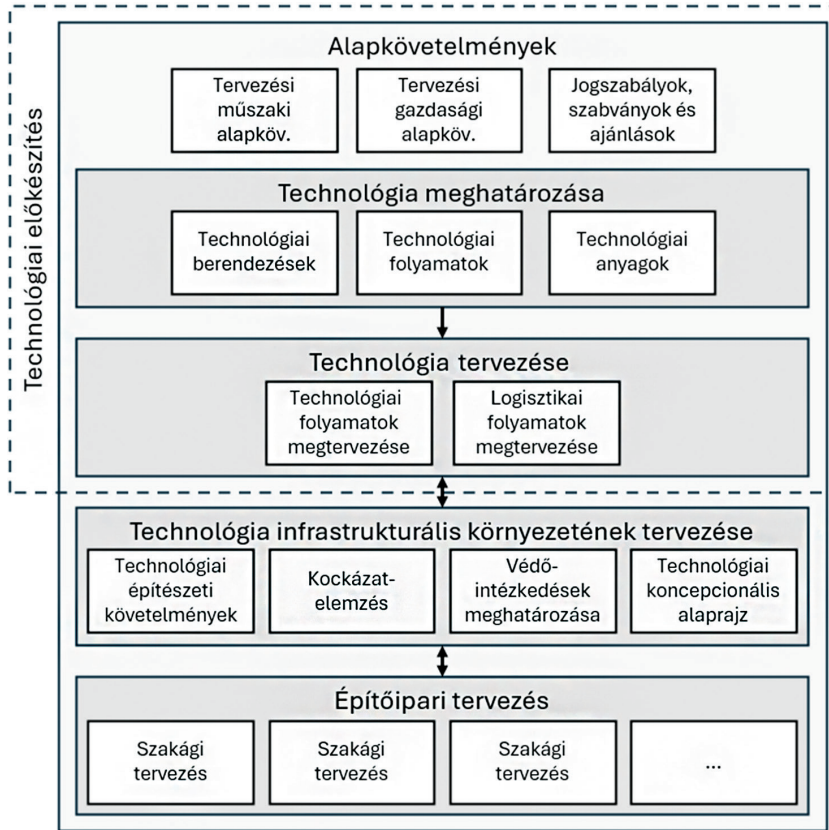
Egy új ipari létesítmény – különösen, ha robbanóanyagok feldolgozására szolgál – megvalósítása lehetőséget biztosít arra, hogy a gyártási technológia igényeihez igazodó, korszerű és a legmagasabb biztonsági előírásokat és védőintézkedéseket szem előtt tartó helyiségek, épületek és infrastruktúra jöjjön létre. A zöldmezős beruházás, a nulláról történő tervezés lehetővé teszi, hogy a létesítmény kialakítása ne csak a hatályos magyar jogszabályi környezet követelményeire, de a nemzetközi szinten elismert műszaki ajánlásokra is épüljön.<sup>4</sup> Ezáltal biztosítható egy olyan gyártókörnyezet létrehozása, amely egyszerre támogatja a hatékony termelést és garantálja a robbanásveszéllyel járó folyamatok nagy fokú biztonságát.

A modern ipari és védelmi környezetben a robbanóanyag-feldolgozó üzemek tervezése egyre inkább multidiszciplináris megközelítést igényel, amelyben a klasszikus építészeti és technológiai szempontok mellett megjelennek a digitális tervezési módszerek, az adatvezérelt döntéshozatal és a rezilienciaközpontú szemlélet elemei is. A kritikus infrastruktúrák növekvő sérülékenysége, valamint a komplex ellátási láncok függősége indokoltá teszi, hogy a tervezés során ne csupán a normál üzemállapotokra, hanem a rendkívüli eseményekre és azok láncreakcióira is kiemelt figyelem irányuljon.

<sup>4</sup> 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet; IATG 02.30; DGUV 113-017.



A gyárépítés építőipari tervezési, kivitelezési fázisát megelőzi egy alapos, a gyártási technológiára koncentrálnó előkészítő szakasz, amelynek során meghatározzák a gyártási folyamatokat befolyásoló gazdasági és műszaki paramétereket, a technológiai berendezéseket, folyamatokat, a feldolgozott anyagok típusait, valamint azok technológiai, biztonsági, térbeli és szervezési követelményeit (1. ábra).<sup>5</sup>



1. ábra: Robbanóanyag-feldolgozó üzem fejlesztésének lépései

Forrás: a szerzők szerkesztése

Ezen technológiai előkészítési szakasz eredményeire támaszkodva alakítható ki a technológiának helyet adó környezet, tervezhetők meg a technológiai koncepciók alaprajzok. A technológiai koncepciók alaprajzok, a kapcsolódó építészeti, épületgépészeti és épületvillamossági információkkal kiegészítve, alapvető bemeneti adatokat biztosítanak az építészeti tervek kidolgozásához.

<sup>5</sup> HEGEDŰS–MOLNÁR–DARUKA 2025.

## Technológiai koncepcionális alaprajz

A gyártási technológia funkcionális felosztása, amely figyelembe veszi a gyártásközi minőség-ellenőrzési folyamatokat, valamint a késztermékek alösszeállítási szakaszait, alapvetően meghatározza a technológiai részfolyamatokat. E részfolyamatok részletes kockázatelemzésével az egyes technológiai lépések elhelyezése optimálisan elhatárolt, egymástól független helyiségekbe tervezhető. A részfolyamatok végrehajtásához szükséges eszközök és berendezések elhelyezésének meghatározása pedig lehetővé teszi az egyes helyiségek szükséges méreteinek precíz definiálását.

A gyártóhelyiségek ideális méretezése, a technológiai folyamatok figyelembevételével, biztosítja az épületek koncepcionális alaprajzainak kialakítását. Ezen alaprajzok folyamatos, lépésről lépésre történő finomítással és kockázatelemzés által optimalizálhatók. A végleges építészeti alaprajz alapját az így kialakult, technológiailag optimalizált koncepció adja, kiegészítve az építészeti szakági információkkal.

A technológiai alaprajzok megalkotásával párhuzamosan figyelembe kell venni a technológiai anyagáramokat, amelyek elengedhetetlenek a koncepcionális kialakítások értékeléséhez. A koncepciók alaprajzok segítségével ezen anyagáramok logisztikai útvonalai is bemutathatók és kiértékelhetők.

A technológiai alaprajzok kialakítása során kiemelt jelentősége van az anyagáramlások és a személyforgalom szétválasztásának. A robbanásveszélyes anyagok mozgatásának útvonalait úgy kell kialakítani, hogy azok a lehető legkisebb mértékben keresztezzék a személyi közlekedési útvonalakat, ezáltal csökkentve az expozíciós kockázatot.<sup>6</sup> E megközelítés összhangban áll az ALARP-elvvel, amely a kockázatok észszerűen elérhető legalacsonyabb szintre történő csökkentését írja elő.<sup>7</sup>

A koncepcionális alaprajzok kialakítása során célszerű figyelembe venni a *defence in depth* elv alkalmazását is, amely több egymásra épülő védelmi réteg kialakítását jelenti. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy egy esetleges műszaki vagy emberi hiba ne vezessen közvetlenül súlyos következményekhez, mivel a rendszer további védelmi elemei képesek a hiba hatásainak lokalizálására és korlátozására.<sup>8</sup>

Továbbá célszerű a technológiai egységeket funkcionális klaszterekbe szervezni, ahol az egymással szoros kapcsolatban álló műveleteket egy épületen belül, de megfelelő fizikai elhatárolással helyezik el. Ez lehetővé teszi a belső logisztika optimalizálását, miközben fenn tartja a szükséges biztonsági szeparációt.

A telephelyi objektumok kialakítása során figyelembe kell venni mind a szabályozási, mind a technológiai előírásokat. Egy-egy gyártóépület jellemzően nem csak egy technológiai lépésnek vagy gyártóegységnek adhat helyet. Sok esetben szükség van a különböző gyártási folyamatok elemzésére, és figyelembe véve az eljárások különböző peremfeltételeit, például az energiaigényét, belső logisztikai kapcsolatait, a processzált anyagmennyiségeket,

<sup>6</sup> IATG 02.30; Department of Defense 2020.

<sup>7</sup> IATG 02.30.

<sup>8</sup> Department of Defense 2020; DGUV 113-017.

munkaerő-szükségletét és az eljárások biztonsági, illetve kockázati besorolását, egy gyártó-épületbe különböző technológiai lépések is integrálhatók. Az épületek tervezése nem válsulhat meg függetlenül a technológiai folyamatoktól, hiszen a technológia alapvetően befolyásolja az épületek kialakítását. A technológiai fejlesztés és az építészeti tervezés párhuzamosan, egymástól elválaszthatatlanul, ismétlődő lépések sorozatából álló folyamatként kell történnjen, mivel a két folyamat által kialakított kompromisszum eredményezi a végleges struktúra kialakítását.

## Technológiai zónák és funkcionális szeparáció

A robbanóanyag-feldolgozó üzemek tervezésének egyik kulcseleme a különböző funkciójú zónák egyértelmű meghatározása és fizikai elkülönítése. A zónák kialakítása során figyelembe kell venni az alkalmazott anyagok veszélyességi osztályát, a technológiai műveletek jellegét, valamint az egyes folyamatok közötti kölcsönhatásokat.

A nemzetközi gyakorlatban elterjedt megközelítés szerint a technológiai területek többszintű szeparációja szükséges:

- robbanásveszélyes technológiai zónák;
- átmeneti (*buffer*) zónák;
- inert vagy adminisztratív területek.

A zónák kialakításánál célszerű figyelembe venni az ember-gép interakciók gyakoriságát is, mivel a magas humán jelenlétű területeken a kockázatok kezelése eltérő megközelítést igényelhet. Az ergonómiai szempontok integrálása nemcsak a munkavégzés hatékonyságát növeli, hanem hozzájárul a hibázási valószínűség csökkentéséhez is.

A zónák közötti átmenetet műszaki és szervezési intézkedésekkel kell szabályozni<sup>9</sup> (például zsiliprendszerek, hozzáférés-szabályozás, technológiai *interlock*<sup>10</sup> rendszerek). A megfelelő zónakialakítás hozzájárul a dominóhatás kialakulásának megelőzéséhez, valamint lehetővé teszi a kockázatok lokális kezelését.

## Inert épületek kialakítása

Az inert épületek olyan létesítmények, amelyekben robbanóanyag nem található. Ezen épületek tervezésére és kialakítására a robbanóanyagok specifikus tulajdonságaira, valamint azok kezelésére vonatkozó szigorúbb előírások nem érvényesek. Ennek következtében az inert épületek megtervezésére és kivitelezésére az általános, jól szabályozott tervezési irányelvek és követelmények alkalmazandók. Fontos megjegyezni azonban, hogy a robbanóanyagokkal kapcsolatos biztonsági előírások, különösen a külső behatásokkal szembeni védelem, az inert

<sup>9</sup> DGVU 113-017; 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet.

<sup>10</sup> Az *interlock* (reteszelés) kifejezés a robbanóanyag-feldolgozó üzemekben egy kulcsfontosságú biztonságtechnikai fogalom. Egy olyan automatikus biztonsági logika, amely megakadályozza, hogy egy veszélyes művelet elinduljon vagy folytatódjon, ha a szükséges biztonsági feltételek nem teljesülnek.

épületekre is kihatással lehetnek, így esetenként előfordulhat, hogy az épületeket például biztonsági üvegezéssel kell ellátni a másodlagos hatások elkerülése érdekében.<sup>11</sup>

Bár az inert épületekben közvetlen robbanásveszély nem áll fenn, ezek elhelyezése és kialakítása nem választható el a robbanóanyaggal kapcsolatos technológiai területektől. Az ilyen épületek gyakran a kritikus támogató infrastruktúrát (irányítás, energiaellátás, karbantartás) biztosítják, így sérülésük közvetett módon hatással lehet a teljes üzem működésére. Ennek megfelelően tervezésük során figyelembe kell venni a külső robbanási hatások elleni ellenálló képiséget, valamint az üzembiztonság fenntartásának követelményeit.

## Robbanóanyag-raktárak kialakítása

A robbanóanyagok tárolására alkalmas raktárak esetében javasolt földdel borított, szabványos, minősített vasbeton szerkezetű építmények (*earth-covered magazine*, ECM) alkalmazása. Az ECM típusú raktárak előnye, hogy kialakításuk révén hatékonyan csökkentik a repesz és léglökés hatását, amelyek más típusú tárolóegységeknél jelentősebben érvényesülhetnek. További előnye a sztenderd, szabványos ECM-raktárak alkalmazásának, hogy azokhoz elérhetők a részletes tervdokumentációk, amelyek alkalmazásával számottevő tervezési és engedélyezési költségmegtakarítás érhető el.<sup>12</sup>

A raktárak használatakor a személyi jelenlét ritkán és csak rövid időszakokban szükséges biztosítani, jellemzően egy-két fő számára, amikor a tárolt anyagok manipulálása zajlik.

A szükséges raktárkapacitás meghatározásakor az ADR<sup>13</sup> szerinti együtt-tárolhatósági előírások, valamint a termelési területek gyártási kapacitása, az alkalmazott anyagok csomagolási egységei, a beszállított anyagmennyiségek és a várható rendelési volumenek is meghatározó tényezők.

## Robbanóanyag-feldolgozó épületek kialakítása

A robbanóanyagok feldolgozása során az állandó személyi jelenlét szükséges lehet, eltérően a raktári tárolástól. Még a legnagyobb biztonsági óvintézkedések mellett is – figyelembe véve a robbanóanyagok természetét – teljes mértékben nem lehet kizárni a robbanás lehetőségét. Ezért kiemelt figyelmet kell fordítani a robbanóanyag-feldolgozó üzemek tervezésekor arra, hogy a gyártási technológia és a gyártóépület a lehető legbiztonságosabb környezetet biztosítsa a dolgozók számára.<sup>14</sup>

A feldolgozóépületek kialakításánál célszerű a személyi jelenlét minimalizálására törekedni, különösen a magas kockázatú technológiai műveletek esetében. Ennek egyik eszköze az automatizálás és a távvezérelt rendszerek alkalmazása, amely összhangban áll a modern

<sup>11</sup> UFC 3-340-02; AASTP-1.3.

<sup>12</sup> AASTP-1.3.

<sup>13</sup> Accord relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route. A veszélyes áruk nemzetközi közúti szállításáról szóló európai megállapodás.

<sup>14</sup> IATG 02.30; DGUV 113-017.

iparbiztonsági megközelítésekkel.<sup>15</sup> Az ilyen megoldások nemcsak a személyi kockázat csökkentését szolgálják, hanem hozzájárulnak a folyamatok stabilitásához és reprodukálhatóságához is.

## Védelmi intézkedések

A technológiában használt anyagok, berendezések támasztotta követelmények alapján a technológiai folyamatok megtervezése bemenetet kínál az épület kialakításához, mind építészeti, épületvillamossági és épületgépészeti tekintetben. Egy új ipari létesítmény létrehozása esetén elengedhetetlen, hogy az épületek kialakítása teljes mértékben illeszkedjen a gyártási technológia szükségleteihez. Ezenkívül az épületek tervezése során figyelembe kell venni a nyersanyagok, alapanyagok, félkész- és késztermékek logisztikai folyamatainak követelményeit, a megfelelő fizikai védelmi intézkedések biztosítását, valamint a vonatkozó jogszabályoknak való maradéktalan megfelelést.<sup>16</sup>

A védelmi intézkedések rendszere többretegű megközelítést igényel, amely magában foglalja a primer (megelőző), szekunder (hatáscsökkentő) és tercier (kárenyhítő) intézkedéseket. A primer intézkedések célja a robbanás bekövetkezésének megelőzése (például technológiai paraméterek kontrollja), míg a szekunder intézkedések a robbanás hatásainak csökkentésére irányulnak (például kifúvófelületek, robbanásálló szerkezetek). A tercier intézkedések a bekövetkezett esemény következményeinek kezelését szolgálják (például vészhelyzeti eljárások, mentési infrastruktúra).<sup>17</sup>

A védelmi intézkedések hatékonyságának biztosítása érdekében szükséges azok rendszeres felülvizsgálata és validálása. Ez magában foglalhatja a szimulációs vizsgálatokat, próbateljesítéseket, valamint az üzemeltetési tapasztalatok visszacsatolását a tervezési folyamatba. A folyamatos fejlesztés elvének (*continuous improvement*) alkalmazása kulcsfontosságú a hosszú távú biztonsági szint fenntartásához.<sup>18</sup>

A jogszabályok betartásának kényszere kiemelt figyelmet igényel az egészségvédelem terén, mind az üzemi területeken kívül, mind pedig belső környezetben. Az üzemen belüli biztonságos munkakörnyezet kialakítása nem csupán a különböző gyártóépületek közötti, hanem a gyártóépületeken belüli területekre is kiterjed, így biztosítva az egész létesítmény védelmét.

## Biztonsági alapkonceptió

Az épületek tervezési folyamatában alapvető fontosságú szempont az egészségvédelmi és munkavédelmi követelmények érvényesítése, a kockázatok elfogadható szintre csökkentésének biztosítása mellett. Az egészségvédelem és biztonság megteremtésének fontosságát mind a magyar jogszabályok, mind pedig a nemzetközi szabványok és irányelvek kiemelten kezelik.

<sup>15</sup> Department of Defense 2020.

<sup>16</sup> 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet.

<sup>17</sup> DGUV 113-017; Department of Defense 2020.

<sup>18</sup> IATG 02.30; Department of Defense 2020.

27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról:<sup>19</sup>

„11. § (3) Azon gyártó helyiség terelőfalait, amely helyiségben a robbanás gyakori bekövetkezésével kell számolni, többszöri robbanással szemben is ellenállónak kell kialakítani. A terelőfalak ténylegesen szükséges szerkezetét és falvastagságát a helyiségben végzett technológiai folyamat, a berendezések, a jelenlevő anyagok minősége, mennyisége, a helyiség terhelési tényezője figyelembevételével kell meghatározni.”

„11. § (14) A különösen veszélyes munkahelyeken (különösen iniciáló robbanóanyag szárításánál, szitálásánál, száraz keverésénél, préselésénél, brizáns robbanóanyag sajtolásánál) a munkavállalókat a technológiai tértől vasbeton fallal és zsiliprendszerű mozgatható acéllappal el kell választani. A vasbeton fal és az acéllap kialakításának olyannak kell lenni, hogy a technológiai térben esetleg felrobbanó összes robbanóanyag a munkavállalók testi épségét ne veszélyeztesse.”

„12. § (1) »RV-besorolású« építmény létesítésénél – belső védelme kialakításán túl – szükség esetén gondoskodni kell a környező építmények és az azokban foglalkoztatott személyek külső védelméről is.”

DGUV 113-017 4.1 General requirements:<sup>20</sup>

„A védőintézkedések meghatározásakor figyelembe kell venni, hogy az épületeket, szobákat, helyiségeket, létesítményeket, berendezéseket és tevékenységeket úgy tervezzék meg és üzemeltessék, hogy a munkahelyen lévő biztosított személyre és harmadik személyekre ható – a tűz vagy robbanás hatásaiból eredő – kockázat a lehető legkisebb legyen.”

DESR 6055.09, 1.4.1 General Informations:<sup>21</sup>

„Az emberek és a vagyontárgyak lehető legnagyobb mértékű védelme a robbanóanyagok potenciális káros hatásaival szemben, valamint a biztonságos és hatékony műveletekkel összhangban lévő expozíció minimalizálása (azaz a lehető legkisebb számú embernek a lehető legkisebb ideig, a lehető legkisebb mennyiségű robbanóanyagnak való kitétele).”

IATG 02.30 5.1 Risk management (LEVEL 2) – General:<sup>22</sup>

„A robbanóanyagok tárolására és feldolgozására használt valamennyi létesítményt a rendeltetésszerű használatra alkalmasnak kell engedélyeztetni. A robbanóanyag-engedély kiadásához az illetékes műszaki hatóságnak meg kell győződnie arról, hogy a létesítmény az engedély feltételeinek betartásával történő működése során az embereket olyan kockázatoknak teszi ki, ame-

<sup>19</sup> 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet.

<sup>20</sup> DGUV 113-017.

<sup>21</sup> Department of Defense 2020.

<sup>22</sup> IATG 02.30 – Risk Management (Level 2).

lyek a lehető legalacsonyabb szinten (As Low As Reasonably Practicable, ALARP) vannak. Ennek meg kell felelnie az adott társadalom számára megfelelőnek ítélt tolerálható kockázatnak. Az ALARP elsődleges elvének kell lennie, hogy az automatikus engedélyezési rendszeren túlmutató, engedélyezési szabályokon túl is mérlegelni kell, hogy az adott tevékenységet észszerűen és gyakorlatiasan biztonságosabb módon lehet-e végezni. Ha a biztonság az IATG iránymutatásain túlmenően gyakorlatilag javítható, akkor egyértelmű gondossági kötelezettség áll fenn, amelyet teljesíteni kell. Nem elég olyan útmutatásra támaszkodni, amely nem veszi figyelembe azokat a helyi körülményeket, amelyek magasabb szintű biztonsági intézkedéseket tehetnek szükségessé vagy tesznek lehetővé."

A munkavállalók testi épségének védelme érdekében védőintézkedéseket kell alkalmazni nem csupán az üzemeltetés során, hanem már a tervezési fázisban is.<sup>23</sup> A vonatkozó védelmi intézkedések egy része a magyar jogszabályokban van rögzítve, ugyanakkor a nemzetközi irányelvek, szabályozások és publikációk további, kiegészítő útmutatásokat is biztosítanak, amelyek segítenek a biztonságos munkakörnyezet kialakításában. Többek között a következő okmányok előírásait ajánlott figyelembe venni:

- AASTP-1 Edition C Version 1 NATO Guidelines for the Storage of Military Ammunition and Explosives (STANAG 4440);
- AASTP-1.1 Edition A Version 1 Manual for the Development of an Explosives Safety Site Plan Based on AASTP-1;
- AASTP-1.2 Edition A Version 1 Development of Nato Debris and Fragment Distance Curves for AASTP-1;
- AASTP-1.3 Edition A Version 1 Nationally Approved Structures for Explosives Areas;
- AASTP-3 Edition 1 Version 3 Manual of NATO Safety Principles for the Hazard Classification of Military Ammunition and Explosives (STANAG 4123);
- STANAG 4442 Edition 1 (AASTP-4) Application of Risk Analysis to the Storage and Transport of Military Ammunition and Explosives;
- AASTP-4 Vol. PART I Edition 1 Version 4 Explosives Safety Risk Analysis Part I: Guidelines for Risk-Based Decisions;
- AASTP-4 Vol. PART II Edition 1 Version 4 Explosives Safety Risk Analysis Part I: Technical Background;
- AASTP-05 Edition B Version 1 NATO Guidelines for the Storage, Maintenance and Transport of Ammunition on Deployed Missions or Operations;
- AMovP-6 Allied Multi-Modal Transportation of Dangerous Goods Directive;
- DIN VDE V 0166:2011-04 Errichten elektrischer Anlagen in Bereichen, die durch Stoffe mit explosiven Eigenschaften gefährdet sind;
- DGVU 113-008 04.2001 – Pyrotechnic;
- DGVU 113-017 Tätigkeiten mit Explosivstoffen;
- TRGS-526 Technische Regeln für Gefahrstoffe – Laboratorien;
- Department of Defense (DoD) (2020). DESR 6055.09 – Defense explosives safety regulation. U.S. Department of Defense.

<sup>23</sup> 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet; DGVU 113-017; Department of Defense 2020; IATG 02.30

- UFC 3-340-02 (TM5-1300) – Unified Facilities Criteria – Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions;
- UFC-3-340-01 (DAHS-CWE) – Design of Hardened Structures for Conventional Weapons Effects;
- DDESB TP-10 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Methodology for Chemical Hazard Prediction;
- DDESB TP-12 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Fragment and Debris Hazard;
- DDESB TP-13 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Software Update;
- DDESB TP-15 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Approved Protective Construction;
- DDESB TP-16 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Methodologies for calculating Primary Fragment Characteristics;
- DDESB TP-17 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Blast scaling;
- DDESB TP-18 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Minimum Qualifications for Unexploded Ordnance (UXO) Technicians and Personnel;
- DDESB TP-20 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Blast Effects Computer – Open (BEC-O) Version 1 User's Manual and Documentation, 11 June 2018;
- DDESB TP-21 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Procedures for the Collection, Analysis, and Interpretation of Explosion-Produced Debris-Revision 2;
- DDESB TP-23 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Assessing Explosives Safety Risks, Deviations, and Consequences;
- DDESB TP-26 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Guidance for Required Explosives Safety Submissions;
- DDESB TP-27 – Department of Defense Explosives Safety Board – Technical paper, Explosives Safety Training;
- DDES Issuances;
- DoD Instruction (6055.16; 4145.26; 4140.62);
- CJCSI 4360.01;
- DOE-STD-1212 Department of Energy Technical Standard – Explosives Safety;
- DOE/TIC-11268 Department of Energy A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures;
- EIG–Explosives Industry Group – The Use of Structural Justification to Underpin an HSE/ONR Explosives Licence;
- DSA03 OME Part 2 (korábban JSP 482);
- International Ammunition Technical Guidelines (IATG).



## Kockázatelemzés és -értékelés

A technológiai részfolyamatok kapcsolatai meghatározzák, hogy mely technológiai sorok helyezhetők el egy területen belül, a folyamatokat alkotó berendezések és kiszolgáló területek befoglaló méretei pedig az épületek helyiségeinek méreteit határozzák meg. Ezen információk lényegesek a robbanóanyag-feldolgozó épületek tervezésénél, ugyanakkor nem elegendők a végleges kialakítás meghatározásához. Egyéb tényezők, mint például a biztonság, költségek és az optimális épületgeometria, szintén jelentős hatással lehetnek a tervekre. A végleges alaprajzok meghatározása érdekében, jellemzően egy összetett, többlépcsős ismétlődő, ciklikus tervezési és értékelési eljárási folyamatra van szükség, amelynek eredményeként az épület optimális, közelítő alaprajza kialakítható.<sup>24</sup>

A kockázatelemzés során alkalmazott módszertanok kiválasztása jelentős hatással van a tervezési döntések megalapozottságára. A kvalitatív és kvantitatív módszerek kombinált alkalmazása lehetővé teszi a veszélyforrások teljes körű azonosítását, valamint azok hatásainak számszerűsítését. A HAZOP-,<sup>25</sup> FMEA-<sup>26</sup> és QRA-<sup>27</sup>-módszerek integrált alkalmazása különösen indokolt a robbanóanyag-feldolgozó üzemek esetében, ahol a komplex kölcsönhatások és a nemlineáris hatásmechanizmusok miatt az egyszerűsített megközelítések nem elegendők. A HAZOP-módszer a technológiai folyamatok eltéréseinek szisztematikus feltárását teszi lehetővé, míg az FMEA a berendezések hibamódjainak és azok következményeinek elemzésére alkalmas. Ezzel szemben a QRA kvantitatív megközelítést alkalmaz, amely lehetővé teszi a kockázatok számszerűsítését és a védőtávolságok meghatározását. A módszerek integrált alkalmazása biztosítja a kockázatok több szinten történő értékelését, amely elengedhetetlen a robbanásveszélyes technológiák biztonságos tervezéséhez.

A kockázatelemzési módszerek alkalmazását célszerű kiegészíteni adatvezérelt megközelítésekkel, például esemény-adatbázisok és ipari baleseti statisztikák feldolgozásával. Az ilyen adatok lehetővé teszik a ritka, de nagy következményű események jobb megértését, valamint a modellek validálását.

A közelítő alaprajzok a kockázatelemzés kezdeti alapját képezik. A kockázatelemzés folyamán az alaprajzok módosulnak, és az épületen belül, valamint kívül alkalmazandó védőintézkedések részletes meghatározása is megtörténik.

A robbanóanyagok feldolgozásával foglalkozó üzemek esetében különösen fontos figyelembe venni, hogy egy esetleges üzemi baleset hatása jelentősen megnövekszik a HD 1.1

<sup>24</sup> AASTP-4 Part I–II; IATG 02.30.

<sup>25</sup> Hazard and Operability Study. Egy strukturált, csoportos elemzési módszer, amely a technológiai folyamatok eltéréseit vizsgálja veszélyforrások feltárására, folyamatbiztonság vizsgálatára, illetve tervezési hibák kiszűrésére.

<sup>26</sup> Failure Modes and Effects Analysis. Hibamód- és hatáselemzés, amely a berendezések és rendszerek meghibásodásait vizsgálja berendezés szintű kockázatok, karbantartási prioritások, illetve megbízhatóság növelésének meghatározására.

<sup>27</sup> Quantitative Risk Assessment. Kvantitatív (számszerűsített) kockázatelemzés védőtávolságok és telephely-elrendezés meghatározására, illetve hatósági engedélyezés céljából.

besorolású anyagok esetén,<sup>28</sup> mivel ezek tömegrobbanásra képesek és potenciális repeszkepzők.<sup>29</sup> Ennek következményeként az ilyen üzemekkel kapcsolatos biztonsági előírások különös figyelmet igényelnek.

A robbanóanyag-feldolgozó üzemek környezetre gyakorolt hatásával több jogszabály, szabvány és irányelv foglalkozik, amelyek előírásokat tartalmaznak a megengedett védőtávolságok és a szükséges védelmi intézkedések vonatkozásában (például AASTP-1 szabvány).<sup>30</sup> Az ezen szabályozások szerinti védőtávolságok és védelmi intézkedések megfelelő alkalmazásával jelentős mértékben csökkenthetők a környezetet érő veszélyek, például a robbanás következtében keletkező léglökés, repeszhatás, hőhatás, szeizmikus rezgések, illetve a vegyi anyagok okozta egészségkárosodás. A biztonsági létesítmények és berendezések alapvető szerepe e hatások mérséklése.<sup>31</sup>

Míg az AASTP-1 szabvány alapján az épületek közötti minimális távolságot pontosan meghatározhatjuk a robbanóanyag mennyisége és típusa alapján, addig az épületen belüli, a robbanóanyag feldolgozásával kapcsolatos veszélyek csökkentésére vonatkozó előírások nem olyan részletesek. Bár léteznek bizonyos általános előírások és ajánlások a belső kialakítással kapcsolatban, ezek többsége inkább irányelv, mintsem konkrét számításokkal alátámasztott, részletes metodika. Ezt a különbséget elsősorban az indokolja, hogy minden üzem egyedi sajátosságokkal rendelkezik, így a pontos tervezési előírások univerzálisan nem definiálhatók.<sup>32</sup>

Ennek ellenére a gyártóhely üzemeltetőjének kulcsszerepe van abban, hogy az érintett hatóságokkal együttműködve meghatározza, hogy az adott épületen belül milyen mértékű veszélyeztetettség elfogadható, valamint mi az az üzemi kockázat, amit egy esetleges baleset következményeként el lehet viselni. Ez az egyedi mérlegelés minden üzem esetében eltérhet. Az üzemi kockázat és a legrosszabb forgatókönyv szerinti baleset (*worst case*) hatása elfogadható szintjének meghatározásával, a technológia alapos ismeretében elvégezhető az épület adott kialakításának kockázatelemzése. A kockázatelemzés során feltárt gyenge pontok alapján, folyamatosan ismétlődő, ciklikus tervezési és értékelési eljárással (iterációval) meghatározható az épület belső kialakítása, valamint a szükséges védőintézkedések.

## A kockázatértékelés alapelvei

A kockázatértékelés kiindulópontja az üzemi kockázat, valamint a legrosszabb forgatókönyv alapján elfogadható hatások szintjének rögzítése. E célból az adott létesítményt biztonsági intézkedésekkel több, jól elkülöníthető szektorra lehet osztani, és ezen szektorokon belül az elfogadható kockázati szintek külön-külön meghatározandók.<sup>33</sup>

<sup>28</sup> A „HD 1.1 – Hazard Division tömegrobbanás-veszély” egy nemzetközi veszélyességi besorolás, amely a robbanóanyagok viselkedését írja le baleset esetén. A HD 1.1 besorolású robbanóanyagok olyan anyagok, amelyek tömegrobbanásra képesek, azaz egy adott mennyiség robbanása esetén a teljes készlet gyakorlatilag egyidejűleg reagál, és a robbanás hatása az egész mennyiségre kiterjed.

<sup>29</sup> AASTP-3.

<sup>30</sup> AASTP-1.

<sup>31</sup> AASTP-1; AASTP-1.1; AASTP-1.2.

<sup>32</sup> IATG 02.30.

<sup>33</sup> IATG 02.30; AASTP-4 Part I.

A különböző funkciójú területek megkülönböztetése fontos szerepet kap. Azokat a helyiségeket, ahol robbanásveszélyes vagy energetikai anyagokkal dolgoznak, vagy azokat ideiglenesen tárolják, „Vörös szektorként” lehet definiálni. Ezzel szemben azok az inert területek, ahol nincsenek jelen veszélyes anyagok, az úgynevezett „Zöld szektorok”, és e helyiségekre akár szigorúbb elfogadási szintek is vonatkozhatnak.

Bár a megfelelő védőintézkedések és munkaszervezés révén a balesetek előfordulásának valószínűsége jelentősen csökkenthető, azok teljes kizárása mégis lehetetlen, hiszen statisztikailag csupán idő kérdése, mikor fog a baleset bekövetkezni. A kockázatértékelés során figyelembe kell venni a baleset esetleges hatásait, nemcsak az adott helyiségre, hanem az azal szomszédos helyiségekre is. A kockázatértékeléshez célszerű megkülönböztetni a *donor* helyiséget, ahol a baleset bekövetkezését vizsgáljuk, és a vele egy épületben lévő szomszédos *acceptor* helyiségeket. Az elfogadható kockázati szintek meghatározása során különbséget érdemes tenni ezen két típusú helyiség között.

A kockázatértékelés során fontos, hogy különbséget tegyünk és részletesen elemezzük a legrosszabb forgatókönyv szerinti balesetek hatásait, valamint az üzemi működésből származó kockázatokat. A hatások értékelését célszerű három fő kategóriában elvégezni:

- *Emberi hatás:* A baleset következményeként jelentkező hatások az érintett személyekre, azaz a munkavállalókra.
- *Gazdasági hatás:* Az esemény hatása a gazdasági eszközökre, gépekre, berendezésekre és termékekre.
- *Épületre gyakorolt hatás:* A baleset következményei az épületszerkezetekre és az azokkal kapcsolatos infrastruktúrára.

Ezek a kategóriák lehetővé teszik a kockázatok részletesebb és átfogóbb elemzését, figyelembe véve a balesetek humán, gazdasági és műszaki vonatkozásait is.

## A legrosszabb forgatókönyv (*worst case*) elemzése

A legrosszabb forgatókönyv vizsgálata során figyelembe kell venni az adott helyiségre vonatkozó maximálisan megengedett robbanóanyag-mennyiséget, és ezen érték alapján értékelhetjük a *donor* és *acceptor* helyiségekre gyakorolt hatásokat.<sup>34</sup> A tervezett védőintézkedések megfelelősége akkor elfogadható, ha a hatások a korábban meghatározott, elfogadható szinthez viszonyítva alacsonyabb szinten vannak.

A legrosszabb forgatókönyv hatásvizsgálata minden egyes helyiségre elvégezhető, figyelembe véve azt, hogy a donor helyiségben bekövetkező esemény milyen hatást gyakorol az adott helyiségre, valamint a szomszédos (*acceptor*) helyiségekre. Ezen elemzéshez elengedhetetlen, hogy tisztában legyünk a helyiségben tárolt robbanóanyag-mennyiséggel, az alkalmazott technológiai folyamatokkal, a helyiségben tartózkodók számával, valamint az alkalmazott védőintézkedésekkel, például a falvastagsággal, a fal típusával, a födém szerkezetével és a kifúvó felületek elhelyezkedésével.

<sup>34</sup> AASTP-1.1; AASTP-4 Part I.

Fontos hangsúlyozni, hogy a legrosszabb forgatókönyv elemzése nem csupán egy elméleti gyakorlat, hanem a tervezési döntések egyik legfontosabb alapja. Az így meghatározott határértékek szolgálnak referenciaként a szerkezeti méretezéshez, a védelmi intézkedések kialakításához és a telephelyi elrendezés optimalizálásához. A *worst case* szemlélet alkalmazása különösen indokolt a HD 1.1 besorolású anyagok esetében, ahol a tömegrobbanás következményei katasztrofálisak lehetnek.<sup>35</sup>

## Üzemi működési kockázatértékelés súlyos következményekkel járó balesetek esetén

Az üzemi kockázatok értékelésekor nem csupán a potenciális hatásokat, hanem azok valószínűségét és előfordulási gyakoriságát is figyelembe kell venni. A kockázatértékeléshez számos különböző módszert kínálnak a nemzetközi szabványok.<sup>36</sup>

A kockázatértékelést a kockázatcsökkentő intézkedések szem előtt tartásával kell végrehajtani, figyelembe véve az épület minden egyes helyiségét mint donor helyiséget, valamint a szomszédos helyiségeket, amelyek acceptor szerepet töltenek be.

A kockázatcsökkentő intézkedések figyelembevételével elvégzett kockázatértékelés segíthet meghatározni az adott épület minden egyes helyiségére vonatkozó kockázati szintet, amely alapján mérlegelhető a bevezetett védelmi intézkedések megfelelősége.

## A dominóhatás kockázatának meghatározása

A kockázatértékelés fontos része a legrosszabb forgatókönyv szerinti hatások áttérjedésének, az úgynevezett dominóhatás kockázatának meghatározása. Ennek során figyelembe kell venni, hogy egy baleset hatásai hogyan terjedhetnek át a helyiségből a szomszédos terekre.<sup>37</sup>

A legrosszabb forgatókönyvre, üzemi kockázatra és dominóhatásra kiterjedő, mind emberi, mind gazdasági hatásokat vizsgáló kockázatelemzés lehetővé teszi az épület kialakításának és a védőintézkedések hatékonyságának értékelését. Amennyiben szükséges, további védelmi intézkedések alkalmazhatók a kockázati szint megfelelő mértékű csökkentése érdekében.

A dominóhatás modellezése során célszerű külön kezelni a fizikai (léglökés, repesz, hő) és funkcionális (energiaellátás kiesése, irányítási rendszerek sérülése) kölcsönhatásokat. A komplex rendszerek esetében a másodlagos és harmadlagos hatások gyakran jelentősebb következményekkel járhatnak, mint az elsődleges esemény.

A módosított alaprajzok és bevezetett védőintézkedések alapján a kockázatelemzést újra el kell végezni, és ezt a folyamatot addig kell ismételni, amíg a bevezetett védelmi intézkedések következtében a kockázat minden helyiségben elfogadható szintre csökken.

<sup>35</sup> AASTP-3; AASTP-4 Part II.

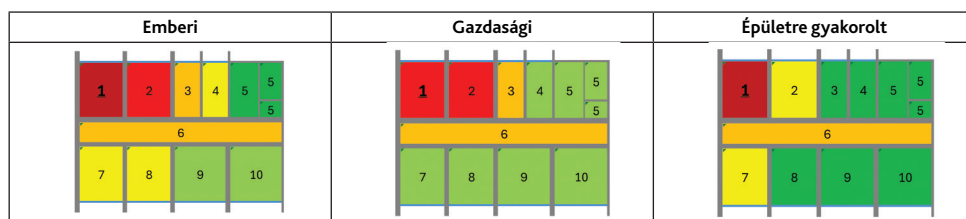
<sup>36</sup> AASTP-4 Part I; STANAG 4442 / AASTP-4.

<sup>37</sup> AASTP-4 Part II; UFC 3-340-02.

## Kockázatelemzés és -értékelés eredményének vizuális ábrázolása

A kockázatértékelés eredményét könnyen lehet vizuálisan szemléltetni a gyártóépület alaprajza szerint. A vizsgált alaprajzon a számmal ellátott területek jelölik a gyártóhelyiségeket, és színükkel jelölhetjük a kockázatértékelés eredményét.

A 2. ábra reprezentatív jelleggel mutatja be egy feltételezett alaprajz 1-es szobájára elvégzett elemzés kockázati szintjeit.



2. ábra: A donor (1) és acceptor szobák kockázatértékelési eredményeinek vizuális megjelenítése a három vizsgált kategóriában

Forrás: a szerzők szerkesztése

## Digitális és szimulációs támogatás a tervezésben

A modern robbanóanyag-feldolgozó üzemek tervezése során egyre nagyobb szerepet kapnak a digitális modellezési és szimulációs eszközök. A számítógépes robbanásmodellek, CFD-szimulációk<sup>38</sup> és digitálisiker-rendszerek<sup>39</sup> lehetővé teszik a különböző tervezési alternatívák összehasonlítását és optimalizálását még a kivitelezés előtt.

A CFD-szimulációk numerikus modellezési módszerek, amelyek lehetővé teszik a robbanási folyamatok során kialakuló áramlási, nyomás- és hőmérsékleti viszonyok részletes vizsgálatát, ezáltal támogatva a védőszerkezetek és technológiai terek optimalizálását.

A digitálisiker-rendszerek a fizikai üzem virtuális reprezentációi, amelyek valós idejű adatok felhasználásával lehetővé teszik a technológiai folyamatok szimulációját, előrejelzését és optimalizálását, ezáltal növelve az üzembiztonságot.

A digitális modellek alkalmazása lehetőséget biztosít a prediktív karbantartási stratégiák kialakítására is, amely révén az üzemeltetési kockázatok tovább csökkenthetők. A valós idejű monitoring és az előrejelző algoritmusok integrálása hozzájárulhat a kritikus események megelőzéséhez.

<sup>38</sup> *Computational fluid dynamics*. Egy numerikus módszereken alapuló szimulációs eljárás, amely folyadékok és gázok áramlását, valamint azok kölcsönhatását modellezi. Robbanóanyag-üzemi alkalmazás során CFD segítségével vizsgálható a robbanási légközhullám terjedése, a nyomáseloszlás épületen belül, a gázok és gőzök terjedése, a szellőztetési rendszerek hatékonysága, illetve a hőmérséklet-eloszlás. Alkalmazásával előre modellezhető a robbanás hatása, illetve optimalizálható a falvastagság, a kifúvó felületek mérete, a helyiségek elrendezése, tehát közvetlenül támogatja a kockázatelemzést.

<sup>39</sup> *Digital twin*. Egy fizikai rendszer valós idejű adatokkal folyamatosan frissített virtuális modellje. Robbanóanyag-üzemi alkalmazás esetén a digitálisiker-rendszerek a robbanóanyag-feldolgozó üzem teljes működésének virtuális leképezését biztosítják, támogatva a biztonsági és technológiai folyamatok elemzését.

A szimulációs eszközök alkalmazása különösen hasznos a léglökéshullám terjedésének, a repeszhatásnak és a nyomáseloszlásnak az elemzésében, amelyek meghatározók a védőszerkezetek méretezésénél. E módszerek alkalmazása lehetővé teszi a kockázatok megbízhatóbb értékelését, és támogatja a biztonsági intézkedések hatékonyabb kialakítását.

## Technológiai koncepcionális alaprajzok optimalizálása

A kockázatértékelés révén kialakított alaprajzok figyelembe veszik az egyes helyiségekben tárolt robbanóanyagok mennyiségét, az üzemi kockázatokat, valamint a legrosszabb forgatókönyv szerinti baleset esetén bekövetkező hatásokat.<sup>40</sup> Az alaprajzoknak biztosítaniuk kell, hogy az egyes helyiségeken belüli hatások ne haladják meg a megengedett határértékeket, és a szomszédos helyiségekre gyakorolt hatások is az elfogadható szint alatt maradjanak. A koncepció alaprajzok megfelelő helyiségelosztásokat, méreteket és szükséges védőintézkedéseket tartalmaznak, továbbá meghatározzák a helyiségekben tárolható maximális robbanóanyag-mennyiséget, valamint figyelembe veszik az adott technológiai folyamatok követelményeit.

A koncepció alaprajzok optimalizálhatók költségértékelési szempontok alapján is, hogy egy biztonságot garantáló, ugyanakkor költséghatékony kialakítás jöheszen létre. Ezen alaprajzok már megfelelő bemeneti információként szolgálnak az épületek építészeti tervezéséhez.

Az építészeti, épületgépészeti, épületvillamossági, tűzbiztonsági, illetve egyéb szempontok figyelembevételének érdekében, az egyes szakágak tervezői ezen alaprajzok alapján képesek a szakterület támasztotta igényeket mérlegelni. A szakterületi tervezők munkájának eredményeként a koncepcionális alaprajzok módosulhatnak, bővíthetnek és adott esetben átrendeződhetnek. E változtatások tükrében folyamatosan szükséges a kockázatértékelés frissítése, miközben a szaktervezők javaslatait figyelembe kell venni és szükség esetén azok módosítását kérni.<sup>41</sup>

## A technológiával kapcsolatos infrastrukturális igények

Az infrastrukturális követelmények részletes meghatározása nem csupán a tervezési folyamat támogatását szolgálja, hanem alapját képezi a későbbi üzemeltetési és karbantartási stratégiáknak is. A megfelelően strukturált adatkészlet lehetővé teszi az életciklus-alapú megközelítés alkalmazását, amely a létesítmény teljes élettartamára kiterjedő optimalizálást támogatja.

A technológiai koncepcionális alaprajzok, a kapcsolódó építészeti, épületgépészeti és épületvillamossági információkkal kiegészítve, bemeneti adatokat biztosítanak az építészeti tervek kidolgozásához. Az ezen adatokra épülő tervezési folyamat előtt a különböző műszaki és funkcionális követelményeket pontosan rögzíteni kell, így a végleges építészeti tervek-nél már a szükséges technológiai paraméterek és specifikációk is figyelembe vannak véve. Az 1. táblázatban található a technológiával kapcsolatos, a tervezéshez elengedhetetlen, illetve hasznos információk.

<sup>40</sup> IATG 02.30; AASTP-4 Part I.

<sup>41</sup> IATG 02.30.

1. táblázat: Releváns információk listája szobánként és berendezésenként

| Alapadatok                    | Épület azonosítója                                                       | Kiegészítő információ                       |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Szobaméretek                  | Helyiségek azonosítója                                                   | –                                           |
|                               | Alapterület                                                              | m <sup>2</sup>                              |
|                               | A helyiség területének aránya az épületben                               | %                                           |
|                               | Hosszúság                                                                | m                                           |
|                               | Szélesség                                                                | m                                           |
|                               | Magasság                                                                 | m                                           |
| Helyiség funkciója            | Légtérfogat                                                              | m <sup>3</sup>                              |
|                               | Termelési terület                                                        |                                             |
|                               | Logisztikai/raktározási terület                                          |                                             |
|                               | Minőség-ellenőrzési terület                                              |                                             |
|                               | Irodai terület                                                           |                                             |
|                               | Szociális terület                                                        |                                             |
| Jelenlét                      | Épület/technológiai kiszolgáló terület                                   |                                             |
|                               | A helyiségben dolgozók száma (állandó jelenlét)                          | fő                                          |
| Robbanóanyag, releváns adatok | Betárolt max. NEQ                                                        | kg                                          |
|                               | Betárolt robbanóanyagok veszélyességi osztálya                           | pl. 1.1                                     |
|                               | Kifúvó felület szükséges                                                 | igen/nem                                    |
|                               | Minimális nettó kifúvó felületre vonatkozó követelmény                   | m <sup>2</sup>                              |
|                               | Jelen lévő, robbanóanyagot tartalmazó termékek                           | pl. gyújtószerkezet                         |
| Helyiség osztályozása         | DGUV osztály                                                             | pl. E2                                      |
|                               | Veszélyességi típus                                                      | pl. tűz, robbanás, mindkettő, egyik sem     |
|                               | VDE 0166 EX specifikáció                                                 |                                             |
|                               | ATEX osztály                                                             |                                             |
|                               | RV osztály                                                               | pl. RV1                                     |
| Helyiség légkondicionálása    | Hőmérséklet-szabályozás                                                  | hőmérséklet-tartomány (°C)                  |
|                               | Páratartalom-szabályozás                                                 | páratartalom-tartomány (%) /                |
|                               | Szükséges óránkénti légcseré                                             | 1x/nem                                      |
|                               | Légcseré-korlátozás                                                      | pl. finom por miatt max. légsebesség értéke |
|                               | Speciális szűrő, az elszívó ágba csatlakozás szükségessége               | igen/nem; szűrő típusa                      |
| Elszívás                      | Technológiai elszívás szükségessége                                      | igen/nem; elszívás típusa és specifikálása  |
|                               | Technológiai levegőelszívás mennyisége                                   | m <sup>3</sup> /h                           |
|                               | Használati gyakoriság                                                    | folyamatos/szakaszos                        |
|                               | Technológiai elszívási csatlakozási pontok                               |                                             |
|                               | Elszívás ATEX minősítése                                                 | igen/nem                                    |
|                               | VOC, részecsketartalom (szilárd részecskék és anyag)                     | ppm                                         |
|                               | Porszűrő típusa                                                          |                                             |
|                               | Technológiai levegőbeszívás mennyisége                                   | m <sup>3</sup> /h                           |
| Villamosenergia-igény         | A helyiségben lévő berendezések tápellátása                              | kW                                          |
|                               | Helyiségspecifikus elektromos követelmény                                |                                             |
|                               | Technológiai elektromos követelmények                                    |                                             |
|                               | Elektromos fogyasztók és csatlakozási pontok                             |                                             |
|                               | Szünetmentes tápegység/gépekhez szükséges szünetmentes áramellátás-igény | igen/nem, működési idő                      |
|                               | Különálló lekapcsolási zónák száma                                       | db                                          |
| Sűrített levegő               | Sűrített levegő-igény                                                    | m <sup>3</sup> /h                           |
|                               | Sűrített levegő beömlőcső átmérője                                       | átmérő                                      |
|                               | Sűrített levegő csatlakoztatási pontok                                   |                                             |

| Alapadatok                | Épület azonosítója                                                                                                                                                                                                                                                                             | Kiegészítő információ                  |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Víz                       | Ivóvízigény                                                                                                                                                                                                                                                                                    | m <sup>3</sup> /h                      |
|                           | A vízhasználat gyakorisága                                                                                                                                                                                                                                                                     | állandó/időszakos                      |
|                           | Vízcsatlakozási pontok                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                        |
| Szennyvíz                 | Szennyvízgyűjtésigény                                                                                                                                                                                                                                                                          | igen/nem                               |
|                           | Szennyvíz típusa (veszélyes, gyűjtés szükséges stb.)                                                                                                                                                                                                                                           |                                        |
|                           | Spec. technológiai víztisztítási igény                                                                                                                                                                                                                                                         | igen/nem; specifikáció                 |
| Gázok                     | Technológiai gáz-igény                                                                                                                                                                                                                                                                         | specifikáció                           |
|                           | Mennyiség                                                                                                                                                                                                                                                                                      | m <sup>3</sup> /h                      |
| Technológia               | Gázérzékelés-igény                                                                                                                                                                                                                                                                             | igen/nem, gáz típusa                   |
|                           | Technologiaizsomp/akna-igény                                                                                                                                                                                                                                                                   | igen/nem, akna paraméterei             |
|                           | Külön hűtés a technológiai berendezésekhez                                                                                                                                                                                                                                                     | igen/nem                               |
|                           | Speciális külső berendezések, amelyek hatással vannak az épületre                                                                                                                                                                                                                              | specifikáció                           |
|                           | Nem általános hőkibocsátású berendezések                                                                                                                                                                                                                                                       | specifikáció                           |
| Tűzmelegelőzés            | Szemmosó + vészzuhany igénye                                                                                                                                                                                                                                                                   | igen/nem                               |
|                           | Hőkameraigény                                                                                                                                                                                                                                                                                  | igen/nem                               |
|                           | Egyéb tűzérzékelő igény                                                                                                                                                                                                                                                                        | igen/nem, típus                        |
|                           | Vízzel nem oltható anyag jelenléte                                                                                                                                                                                                                                                             | anyag                                  |
|                           | Tűztöltő rendszer                                                                                                                                                                                                                                                                              | igen/nem, típus                        |
| IT- / BMS-követelmények   | LAN-kapcsolat                                                                                                                                                                                                                                                                                  | igen/nem, kábel száma                  |
|                           | Wifi                                                                                                                                                                                                                                                                                           | igen/nem                               |
|                           | Biztonsági kamera és pozíciója                                                                                                                                                                                                                                                                 | db                                     |
|                           | Technológiai kamera és pozíciója                                                                                                                                                                                                                                                               | db                                     |
|                           | Ajtózár rendszer                                                                                                                                                                                                                                                                               | igen/nem, típus                        |
|                           | Egyéb BMS-követelmények                                                                                                                                                                                                                                                                        | specifikáció                           |
| Padló                     | Speciális padlóburkolat                                                                                                                                                                                                                                                                        | specifikáció                           |
|                           | Emelőberendezésekre vonatkozó követelmények: teherbírás/szükséges horogmagasság                                                                                                                                                                                                                |                                        |
|                           | Tárolóállványok specifikálása                                                                                                                                                                                                                                                                  | szintek száma, max. terhelhetőség (kg) |
|                           | Max. padlóterhelés                                                                                                                                                                                                                                                                             | kg                                     |
| Ajtók                     | Ajtó mérete a terelőfalon                                                                                                                                                                                                                                                                      | méret                                  |
|                           | Befelé nyíló ajtó típusa a terelőfalon (robbanásálló/magas/ alacsony nyomásálló/tűzgátló/normál ajtó)                                                                                                                                                                                          | típus                                  |
|                           | Robbanásálló ajtó kategóriája:<br>I. kategória: sérülésmentes<br>II. kategória: a deformáció kis mértékű, továbbra is működőképes/nyitható<br>III. kategória: nagy mértékű deformáció, nem működőképes, nem nyitható, de helyén marad<br>IV. kategória: korlátozott mértékben veszélyt jelentő | kategória                              |
|                           | Ajtóméret a kifúvó falon                                                                                                                                                                                                                                                                       | méret                                  |
|                           | Anyagátadó zsiliblak                                                                                                                                                                                                                                                                           | igen/nem, méret, specifikáció          |
| Csomagolóanyag            | Jelen lévő csomagolóanyag anyaga, típusa                                                                                                                                                                                                                                                       | típus                                  |
|                           | Jelen lévő csomagolóanyag mennyisége                                                                                                                                                                                                                                                           | mennyiség                              |
| Veszélyes/ATEX folyadékok | Passzív tárolási mennyiség                                                                                                                                                                                                                                                                     | igen/nem, mennyiség                    |
|                           | Nem passzív tárolási mennyiség                                                                                                                                                                                                                                                                 | igen/nem, mennyiség                    |
| Egyéb                     | Megjegyzések / további követelmények                                                                                                                                                                                                                                                           |                                        |

Forrás: DGV-113-017; DIN VDE V 0166; TRGS-526; Department of Defense 2020



## Építőipari tervezés

A technológiai tervezési és előkészítő folyamatok eredményeként létrejött dokumentációs csomag előírásainak figyelembevételével elvégezhető az inert, a robbanóanyag-feldolgozó, valamint a robbanóanyag-tároló épületek építészeti tervezése. E dokumentációs csomag tartalmazza az épületek technológiai szempontból releváns koncepcionális alaprajzi elrendezését, a szükséges építészeti védőintézkedéseket (például a terelőfalak kialakítására vonatkozó előírásokat), valamint a helyiségekre vonatkozó részletes követelményeket, figyelembe véve az építészeti, épületgépészeti és épületvillamossági szempontokat.

A koncepcionális alaprajzokban szereplő, helyiségenkénti robbanóanyag-mennyiséget és annak típusát figyelembe véve a telephely elrendezése is meghatározható, biztosítva a szükséges biztonsági távolságokat és védelmi intézkedéseket.

## Összegzés

A robbanóanyag-feldolgozó üzemek technológiai környezetének tervezése egy komplex, iteratív és multidiszciplináris folyamat, amelyben a biztonság, a gazdaságosság és az üzemeltethetőség szoros kölcsönhatásban jelenik meg. Az ismertetett módszertan rámutat arra, hogy a technológiai koncepcionális alaprajzok kialakítása nem tekinthető pusztán térbeli elrendezési feladatnak, hanem a kockázatok tudatos kezelésének egyik legfontosabb eszköze.

A *safety by design* szemlélet alkalmazása lehetővé teszi, hogy a biztonsági követelményeket már a tervezés korai szakaszában integrálják, ezáltal jelentősen csökkentve a későbbi módosítások szükségességét és költségeit.<sup>42</sup> A kockázatelemzési módszerek – különösen a kvalitatív és kvantitatív megközelítések kombinációja – biztosítják a tervezési döntések megalapozottságát, valamint lehetővé teszik a különböző tervezési alternatívák objektív összehasonlítását.<sup>43</sup>

A digitális eszközök és szimulációs módszerek alkalmazása új dimenziót nyit a robbanóanyag-feldolgozó üzemek tervezésében, mivel ezek segítségével a potenciális kockázatok már a kivitelezést megelőzően vizsgálhatók és optimalizálhatók. A digitálisiker-rendszerek és prediktív modellek alkalmazása hozzájárul a létesítmények hosszú távú biztonságának és hatékony működésének fenntartásához.

A bemutatott tervezési megközelítés megfelelő keretet biztosít olyan robbanóanyag-feldolgozó létesítmények kialakításához, amelyek nemcsak megfelelnek a jogszabályi és szabványi követelményeknek, hanem képesek a kockázatok proaktív kezelésére is. A jövőbeni fejlesztések iránya a digitális és adatvezérelt módszerek további integrációja, valamint a rendszerszintű reziliencia növelése lehet.

## Felhasznált irodalom

AASTP-1 Edition C Version 1 NATO Guidelines for the Storage of Military Ammunition and Explosives (STANAG 4440).

<sup>42</sup> IATG 02.30; Department of Defense 2020.

<sup>43</sup> AASTP-4 Part I; STANAG 4442 / AASTP-4.

- AASTP-1.1 Edition A Version 1 Manual for the Development of an Explosives Safety Site Plan Based on AASTP-1.
- AASTP-1.2 Edition A Version 1 Development of NATO Debris and Fragment Distance Curves for AASTP-1.
- AASTP-1.3 Edition A Version 1 Nationally Approved Structures for Explosives Areas.
- AASTP-3 Edition 1 Version 3 Manual of NATO Safety Principles for the Hazard Classification of Military Ammunition and Explosives (STANAG 4123).
- AASTP-4 Vol. PART I Edition 1 Version 4 Explosives Safety Risk Analysis Part I: Guidelines for Risk-Based Decisions.
- AASTP-4 Vol. PART II Edition 1 Version 4 Explosives Safety Risk Analysis Part II: Technical Background. Department of Defense (DoD) (2020): DESR 6055.09 – Defense Explosives Safety Regulation. U.S. Department of Defense. Online: <https://www.denix.osd.mil/ddes/denix-files/sites/32/2024/03/DESR-6055.09-Edition1-Change-1-240227-Final.pdf>
- DGUV-113-017 Tätigkeiten mit Explosivstoffen. Online: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/2598>
- DIN VDE V 0166:2011-04 Errichten elektrischer Anlagen in Bereichen, die durch Stoffe mit explosiven Eigenschaften gefährdet sind.
- HEGEDŰS Gergely – MOLNÁR Péter – DARUKA Norbert (2025): Robbanóanyag feldolgozó üzem létesítésének technológiai előkészítése. *Műszaki Katonai Közlöny*, 35(3–4), 5–24. Online: <http://doi.org/10.32562/mkk.2025.3-4.1>
- International Ammunition Technical Guidelines (IATG) 02.30 – Risk Management (Level 2). Online: [https://data.unsafeguard.org/iatg/en/V3\\_IATG-02.30\\_en.pdf](https://data.unsafeguard.org/iatg/en/V3_IATG-02.30_en.pdf)
- STANAG 4442 Edition 1 (AASTP-4) Application of Risk Analysis to the Storage and Transport of Military Ammunition and Explosives.
- TRGS-526 Technische Regeln für Gefahrstoffe – Laboratorien.
- UFC 3-340-02 (TM5-1300) – Unified Facilities Criteria – Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions.

## Jogi forrás

27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról

Ábel Pálma Roxána<sup>1</sup> 

# A robbantások detektálásának lehetősége ionoszonda alkalmazásával

## The Possibility of Detecting Explosions Using Ionosonde

*Egy robbantás történhet föld alatt, földfelszínen és az atmoszférában is. Egy robbanás során, mint egy földrengéskor, keletkeznek elsődleges, másodlagos, Love és Rayleigh felszíni hullámok, továbbá akusztikus és nehézségi hullámok is. Az akusztikus, nehézségi, akusztikus-nehézségi és a felszíni hullámok mellett az elliptikusan terjedő Rayleigh-hullám vizsgálendő. A felületi hullám által keltett légköri hullám nagy területeket tud végigjárni, és egészen az ionoszféráig is terjedhet. Attól függően, hogy milyen robbanási energiát kapott, akár a legfelső rétegig is el tud jutni. Az ionoszféra a termoszféra részeként 60 km-től 600 km-ig terjed, ahonnan az exoszféra kezdődik, és több alrétegre osztható. Ezek a D, E és F rétegek. Napjainkban az ionoszférát folyamatosan tanulmányozzák, és elsődlegesen a rádiókommunikációs rendszerek használják. Az erre használt eszköz a digiszonda vagy ionoszonda, amely az ionoszféra állapotát vizsgálja. A DPS4D<sup>2</sup> képes az anomáliák detektálására valós időben.*

**Kulcsszavak:** ionoszonda, nehézségi hullám, terjedő ionoszférikus zavar, robbantástechnikai innováció

*An explosion can occur underground, on the surface of the earth and in the atmosphere. During an explosion, primary, secondary, Love and Rayleigh surface waves arise; the same waves are generated during an earthquake. We differentiate acoustic, gravity, acoustic-gravity and surface waves. The elliptically propagating Rayleigh wave is the one which can be examined. The atmospheric wave generated by surface waves can travel long distances, reaching the ionosphere. Depending on how much explosive energy it receives, it can travel all the way to the top layer. The ionosphere, as part of the thermosphere, extends from 60 km up to the exosphere starting at 600 km and*

<sup>1</sup> Okleveles had- és biztonságtechnikai mérnök, robbantástechnikai szakmérnök, e-mail: [palmaroxana1602@gmail.com](mailto:palmaroxana1602@gmail.com)

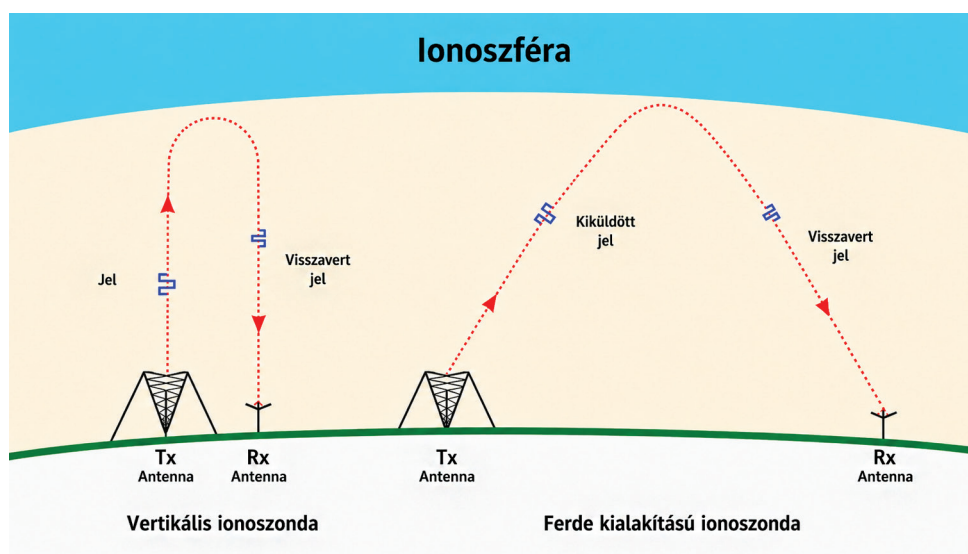
<sup>2</sup> DPS4D – Digital Portable Sounder 4D.

can be divided into several sublayers. Those are the D, E and F layers. Nowadays, the ionosphere is continuously studied, primarily in the field of radio communications. Digisonde or ionosonde can be used to study the layers and examine the state of the ionosphere. The DPS4D is capable of detecting anomalies in real time.

**Keywords:** ionosonde, gravity waves, traveling ionospheric disturbances, explosive innovation

## Bevezetés

Az ionoszonda célja, hogy az ionoszférában bekövetkező plazma mozgását és bizonyos rétegeinek attribútumait, többek között a magasságot és elektronsűrűséget figyelje hosszú hullámú rádiójelekkel. Kétféle TID<sup>3</sup>-t különböztetünk meg. Az egyik esetben az ionoszféra teljes elektrontartalmának változását okozó események következnek be; a másik típusú TID, ahol az ionoszférikus plazmában bekövetkezett anomáliák nem okoznak eltérést a teljes elektrontartalomban. Ilyen esemény lehet például egy kisebb vagy közepes intenzitású robbantás. A digiszondák (DPS4D típusú ionoszondák) összehangolt mérésekre alkalmas eszközök, ezáltal nagy területet tudunk vele lefedni. Kétféle típusú mérési módszer van, az egyik esetében a visszaverődések függőleges irányban történnek, a másik esetben ferdén, ezáltal jól lehet az ionoszférában létrejövő struktúrákat vizsgálni, ezenfelül az anomáliák, TID-ek jellemző attribútumait, mint például a sebesség, a méret és az idő.<sup>4</sup>



1. ábra: Digiszonda-típusok

Forrás: a szerző szerkesztése MENDOZA–RUIZ–JARAMILLO 2017 alapján

<sup>3</sup> TID: travelling ionospheric disturbances – terjedő ionoszférikus zavarok.

<sup>4</sup> HUN-REN 2024.

A vertikális struktúrájú légkörben a radar-visszaverődések a zenit, tetőpont közelében a legerősebbek, és attól távolodva a zenittől eltérő szöggel folyamatosan csökkennek.<sup>5</sup> Az ionoszondák a különböző magasságokból visszaverődő jelek kibocsátási és annak beérkezési idődifferenciálját dolgozzák fel, amelyek szöveges adatok lesznek. Nagyjából 8 és 10 perc közé esik az észrevételi idő, hiszen ennyi perc szükséges ahhoz, hogy a robbanás által keltett hullámok elérjenek az ionoszféraréteghez.<sup>6</sup>

Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy az ionoszondás mérések milyen mértékben alkalmasak különböző típusú robbantások által keltett ionoszférikus zavarok detektálására és jellemzésére. A kutatás középpontjában az akusztikus és akusztikus–nehézségi hullámok ionoszférára gyakorolt hatásának elemzése áll, különös tekintettel a terjedő ionoszférikus zavarok (TID-ek) kialakulására és terjedési sajátosságaira. A vizsgálat célja továbbá annak értékelése, hogy a digiszonda-rendszerek (különösen a DPS4D) milyen hatékonysággal alkalmazhatók robbanási események detektálására, valamint hogy a felszíni változások műholdas megfigyelése és az ionoszférikus adatok együttes elemzése milyen mértékben növeli a detektálás pontosságát. A tanulmány kiterjed a háttérzajok és környezeti tényezők hatásának vizsgálatára is, amelyek befolyásolják a mérési eredmények értelmezhetőségét.

A vizsgálat során a szerző kvalitatív és összehasonlító elemzést alkalmaz, amely különböző robbanási eseményekhez kapcsolódó ionoszférikus megfigyelések feldolgozásán alapul. Az elemzés alapját egyrészt a digiszondák által szolgáltatott ionogramok, másrészt a GNSS-alapú teljes elektron tartalom- (TEC-) mérések, valamint műholdas távérzékelési adatok képezik. A módszertan része továbbá a különböző típusú robbantások (kémiai, nukleáris, valamint természetes eredetű – például vulkáni kitörések) összehasonlító vizsgálata, amely lehetővé teszi az egyes események karakterisztikáinak elkülönítését. A háttérzajok és zavaró tényezők azonosítása során a szerző figyelembe veszi a klimatológiai, geofizikai és űridőjárási hatásokat is.

## Robbantások jellemzői

A robbantások során keletkező légköri és szeizmikus hullámok komplex kölcsönhatásban állnak a légkör különböző rétegeivel, és jelentős hatást gyakorolhatnak az ionoszférára is. A robbanás következtében nemcsak vízszintes irányban terjedő lökeshullámok jönnek létre, hanem felfelé haladó akusztikus és akusztikus–nehézségi hullámok is kialakulnak, amelyek a légköri paraméterek változásával módosulva képesek elérni az ionoszféra különböző rétegeit. A Rayleigh-típusú felületi hullámok különösen fontosak, mivel az ezek által generált légköri zavarok nagy távolságokra is eljuthatnak, és mérhető ionoszférikus anomáliákat hozhatnak létre. A különböző hullámtípusok eltérő terjedési mechanizmusai és sebességtartományai lehetővé teszik a robbanási események részletesebb vizsgálatát. A szeizmikus eredetű zavarok jellemzően 1000–3000 m/s sebességgel terjednek, míg a Rayleigh-típusú felületi hullámok sebessége elérheti a 2000–5000 m/s tartományt. Az akusztikus–nehézségi hullámok ezzel

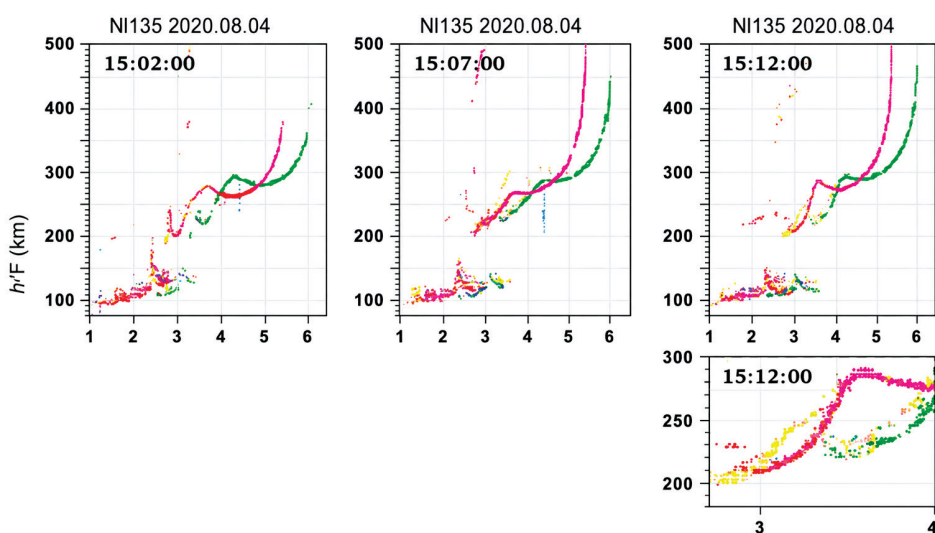
<sup>5</sup> GIANNATTASIO 2022.

<sup>6</sup> BARTA et al. 2019.

szemben alacsonyabb, néhány száz m/s nagyságrendű sebességgel haladnak, ugyanakkor jelentős szerepet játszanak az ionoszférikus zavarok kialakulásában.

Nagyobb energiájú robbanások vagy robbantási sorozatok esetén a különböző hullámok szuperpozíciója komplex ionoszférikus mintázatokat eredményez, amelyek detektálása ionoszonák és GNSS-alapú rendszerek segítségével egyaránt lehetséges. A műholdas jelek frekvenciafüggő késleltetésének vizsgálata lehetőséget biztosít a teljes elektrontartalom meghatározására, amelyből következtetni lehet az adott esemény által kiváltott ionoszférikus zavarokra. Az amerikaiak által üzemeltetett globális műholdak 20 200 km magasan keringenek. Az elektromágneses jelek terjedése frekvenciafüggő. A műholdak két frekvencián sugároznak egyszerre: L1 – 1575,42 MHz és L2 – 1227,60 MHz.<sup>7</sup> A különféle frekvenciájú jelek változó értékű jékkésleltetésen mennek keresztül, amelyből a teljes elektrontartalom meghatározható, és következtetni lehet az adott esemény által okozott hatásokra.

A kapott adatok bináris képi eredményei az ionogramokon olvashatók le, amit a 2. ábra is mutat. Az ionoszféra rétegei kirajzolódnak az elektronsűrűség alapján, vagyis a visszaverődési helyek látszólagos magasságát mutatja, az adott frekvenciának a függvényében. A távolságok látszólagosak, a pontos magasság a kapott magasság frekvencia-nyomvonalaiából határozható meg, ami azt jelenti, hogy az ionogramon a határozottabb ordinárius hullámból számítják ki. A 2. ábra egy ionogramot mutat a bejrúti robbanásról, a nicosiai állomáson rögzített adatok alapján. A nicosiai állomáson jól kimutatható és kétségtávol látszik az anomália, ezzel ellentétben a San Vito-i állomásnál ugyanaz a robbanás már kevésbé következetesen meghatározható.<sup>8</sup>



2. ábra: A nicosiai állomás ionogramja a bejrúti robbanás után

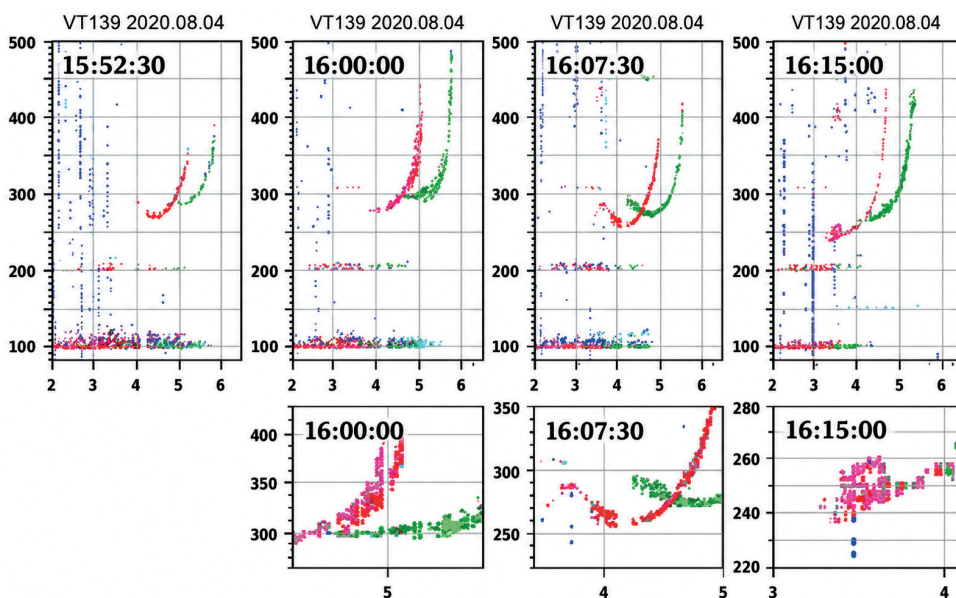
Forrás: a szerző szerkesztése REZY–LAI 2024 alapján

<sup>7</sup> BARTA et al. 2023: 10.

<sup>8</sup> REZY–LAI 2024.

A nicosiai állomáson a robbanás után 4 perccel már érzékelhető volt az anomália, míg a San Vito állomás 52 perces késéssel jelezte a robbantást. A 2. és 3. ábrán a képek ennek az időnek megfelelően vannak ábrázolva. Az alsó képen látható, hogy a terjedés hosszának mértékével az észlelés pontossága is csökken, mivel a hullámok csillapítódnak a távolsággal. A csillapodás mértéke függ a robbanás tömegétől, intenzitásától, és hogy milyen környezeti tényezők járultak hozzá a hullám elnyelődéséhez. Nicosia Bejrúttól 241 km-re van légvonalon, míg a San Vito-i állomás nagyjából 2392 km-re található.<sup>9</sup>

Az ionogramok elemzése lehetőséget biztosít az ionoszférikus zavarok időbeli és térbeli lefolyásának vizsgálatára. A bejrúti robbanás esetében megfigyelhető, hogy a detektálás időbeli késése és az anomália erőssége szoros összefüggést mutat a mérőállomás távolságával. Ez arra utal, hogy a hullámok csillapodása és a terjedési közeg inhomogenitása jelentősen befolyásolja az észlelhetőséget. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a közelebbi állomások esetében a detektálás megbízhatóbb, míg nagyobb távolságok esetén az anomáliák egyre nehezebben azonosíthatók, ami a rendszer érzékenységének korlátaira is rámutat.



3. ábra: A bejrúti robbanás detektálása a San Vito-i állomáson

Forrás: a szerző szerkesztése REZY–LAI 2024 alapján

<sup>9</sup> A távolság meghatározása a következő segítségével történt: <https://www.thedistancenow.com/>; REZY–LAI 2024.

## Vizsgálatra érdemes robbanóanyagok

A robbanás mennyisége függ a robbanóanyag összetételétől, hiszen egy impulzív és nagyobb detonációs sebességű robbanóanyagból kevesebb mennyiség is elegendő, míg egy kevésbé heves reakciójú anyagból nagyobb mennyiség szükséges. Jelenleg TNT-egyenértéket használunk annak érdekében, hogy a robbanáshőt meghatározzuk. Megadja, hogy egy adott robbanóanyag robbanási teljesítménye, munkavégzési képessége hogyan aránylik a TNT-hez. A 27/2022. (I. 31.) SZTH rendelet alapján a TNT-egyenértéket E-vel jelöljük, és úgy határozzuk meg, hogy a vizsgált anyag robbanáshőjét elosztjuk a TNT robbanáshőjével, ami 4564 kJ/kg.<sup>10</sup>

$$E = \frac{\text{a robbanóanyag robbanáshője, kJ/kg-ban}}{\text{a TNT robbanáshője, kJ/kg-ban}}$$

A modern robbanóanyagok nagy erejű és magas detonációs sebességgel rendelkező robbanóanyagok. Magas detonációs sebességgel rendelkezik a CL-20, TKX-50, FOX-7, I-RDX és TEX, amelyeknek a detonációs sebességét az 1. táblázatban foglaltam össze.<sup>11</sup>

1. táblázat: Robbanóanyagok detonációs sebessége

| Robbanóanyag | Detonációs sebesség (m/s) |
|--------------|---------------------------|
| CL-20        | 9380–10 000               |
| TKX-50       | 9687                      |
| FOX-7        | 8869                      |
| I-RDX        | 8750                      |
| TEX          | 8749                      |

Forrás: a szerző szerkesztése

## Háttérzajok

A robbantások ionoszférikus detektálását jelentős mértékben befolyásolják a különböző természetes és mesterséges eredetű háttérzajok, amelyek sok esetben hasonló jelenségeket idéznek elő, mint a robbanási események. Ezek közé tartoznak az időjárási és klimatológiai folyamatok, az évszakos és napszakos változások, valamint az űridőjárás hatásai, különösen a geomágneses viharok és a naptevékenység okozta ionoszférikus zavarok. Emellett a geológiai eredetű események – például földrengések és vulkánkitörések – szintén képesek akusztikus–nehézségi hullámokat generálni, amelyek az ionoszférában a robbantásokhoz hasonló mintázatokat hoznak létre.

A különböző zavarforrások elkülönítése ezért kulcsfontosságú a megbízható detektálás szempontjából. A robbantások által keltett ionoszférikus anomáliák jellemzően rövidebb idejűek és koncentráltabb térbeli eloszlást mutatnak, míg a természetes eredetű jelenségek gyakran hosszabb időtartamúak és komplexebb mintázatot eredményeznek. Ugyanakkor

<sup>10</sup> 27/2022. (I. 31.) SZTH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról.

<sup>11</sup> DARUKA 2023.



a különbségek nem minden esetben egyértelműek, ezért szükséges több paraméter együttes vizsgálata, például az anomália időtartama, intenzitása, terjedési sebessége, valamint az érintett ionoszférikus rétegek jellemzői.

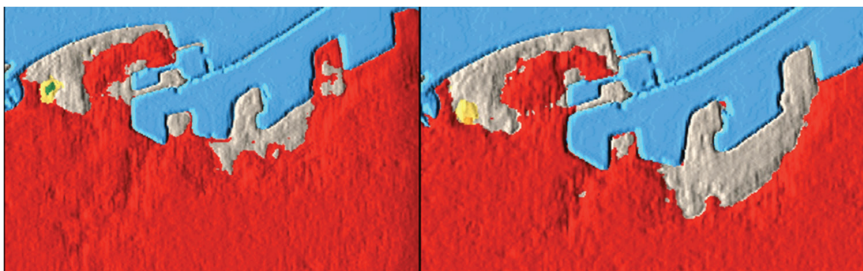
A mérési eredmények értelmezését jelentősen segíti a korábbi adatsorokkal való összehasonlítás, amely lehetővé teszi az adott területre jellemző háttérviszonyok meghatározását. A referenciaadatok hiányában a detektált jelenségek könnyen félreértelmezhetők, különösen olyan régiókban, ahol gyakoriak a természetes ionoszférikus zavarok. Ezen túlmenően figyelembe kell venni az adott terület geopolitikai és biztonsági helyzetét is, mivel egy konfliktus-övezetben nagyobb valószínűséggel fordulhatnak elő robbanási események, ami befolyásolhatja az értelmezési keretet.

A háttérzajok hatásának csökkentésében egyre nagyobb szerepet kapnak a mesterséges intelligencián alapuló modellek, amelyek képesek a nagy mennyiségű mérési adat feldolgozására és a mintázatok automatikus felismerésére. Az ilyen rendszerek segítségével előrejelezhetők a geomágneses eredetű zavarok, valamint elkülöníthetők az ismert természetes jelenségekhez tartozó minták, ezáltal növelve a robbantások detektálásának pontosságát.

A háttérzajok megfelelő kezelése és szűrése alapvető feltétele az ionoszonás robbanás-detektálás megbízható alkalmazásának. A különböző adatforrások integrált elemzése, valamint a korszerű adatfeldolgozási módszerek alkalmazása jelentős mértékben hozzájárulhat a téves riasztások csökkentéséhez és a detektálási képességek fejlesztéséhez.

## A földfelszín vizsgálata

Az ionoszférikus anomáliák detektálását követően lehetőség nyílik a vizsgált terület felszíni változásainak elemzésére is, amely hozzájárulhat az események pontosabb azonosításához. A műholdas távérzékelési adatok – különösen a Sentinel-2 rendszer felvételei – lehetővé teszik a felszínborítás változásainak kvantitatív vizsgálatát. A képfeldolgozási eljárások során a pixelek osztályozása alapján meghatározható a pusztítás mértéke és térbeli kiterjedése, amely összevethető az ionoszférikus mérések eredményeivel. Ez az integrált megközelítés növeli a detektálás megbízhatóságát, különösen olyan esetekben, amikor a helyszíni vizsgálat nem lehetséges.



4. ábra: A bejrúti robbanás előtt és után

Forrás: a szerző szerkesztése <https://dynamicworld.app/> alapján

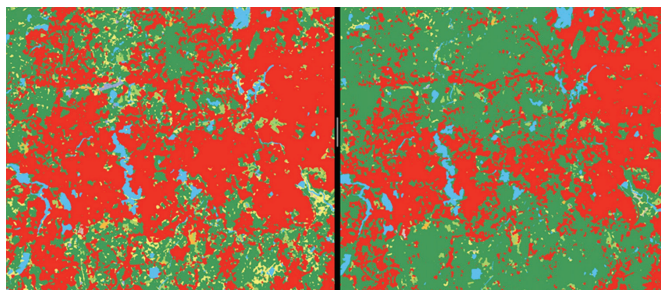
Összehasonlításként, a 4. ábrán a 2020. augusztus 8-ai robbanás eredménye látható a bejrúti kikötőnél, ahol a raktár állt. A bal oldali kép a robbanás előtti állapotot, a jobb oldali kép a robbanás utáni állapotot ábrázolja. A piros részek az ember által beépített területek, a kék a víz, a sárga a cserje, és zöld a minimális növényzet. Észrevehető, hogy a lakott területek hogyan épültek egyik helyről a másikra, miután romba dőltek a régebbi lakhelyek.

A rendszer a Sentinel-2 műholdképre épülő mélytanulási módszert alkalmazza, amely 2–5 naponta frissül jelen állapotban. 10 méteres felbontású, földborítási adatokat nyújt. Képpontonként számol valószínűséget kilenc talajborítási osztályban:<sup>12</sup>

- víz: állandó és időszakos;
- fák, erdő: elsődleges és másodlagos erdők, nagy kiterjedésű növényzet;
- füves mezők: természetes, továbbá legelésre, emberi természetítésre használt területek;
- bozót és bokros, cserjés területek: hiányos, sztyeppés növényzet;
- vetési terület: gabonaföldek;
- elöntött növényzet: vízben honos erdős terület;
- jég borította övezet, hó- és jégképződmények: állandó és szezonális;
- ember lakta beépített terület: ember által kialakított épületek, utak, létesítmények;
- sziklás, csupasz, növényzet nélküli és lakatlan terület: sivatag és sziklás területek.

Az algoritmus a műholdkép minden pixelére megbecsüli az adott terület változásait, beépítettségét, fák arányát és további változásokat. Három fő lépésből áll a program. Először beolvassa az adatokat, megtörténik a vizualizáció és a kompozitkészítés. A következő lépésben kiszámítja a pixelek számát az adott régió földborítási osztályához, és vizsgálja a pixelszám eloszlását az összes osztályra. Végül az idősort kalkulálja, ami lehetővé teszi a valós idejű vizualizációt.<sup>13</sup>

Az 5. ábra az orosz–ukrán háború során kialakult változásokat ábrázolja. A bal oldali 2022-es kép esetében megfigyelhető a piros színnel jelölt, ember által beépített területek nagysága. A jobb oldalon ugyanaz az orosz–ukrán határ menti terület látható, de két évvel később. Az infrastruktúra és lakott övezet erős degradációja látható a folyamatos robbantások következtében.



5. ábra: Kijev és az orosz határ közötti lakott területek aránya 2022-ben és 2024-ben

Forrás: a szerző szerkesztése <https://dynamicworld.app/> alapján

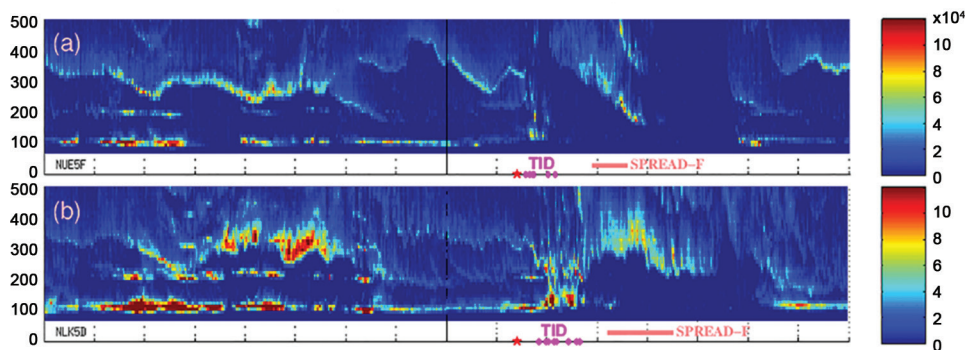
<sup>12</sup> <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/introduction-to-dynamic-world-pt-1>

<sup>13</sup> <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/introduction-to-dynamic-world-pt-3>

## Vulkánkitörés

Annak érdekében, hogy jobban megértsük a robbantásokra jellemző egyes karakterisztikákat, a hozzá legközelebb álló természeti jelenséget szükséges vizsgálni, mégpedig a vulkánkitöréseket. A vulkánkitörés erejében és terjedési idejében teljes mértékben megfelel egy nagy erejű robbantásnak. Továbbá a vulkánkitörés még nagyobb földfelszínváltozást tud eredményezni, mint egy robbanás.

Megállapítható, hogy a robbanásoknak különféle karakterisztikájuk van. Kémiai és nukleáris, amely lehet egyszeri és sorozatos, továbbá történhet föld alatt, földön és a légkörben is. A kémiai robbanás vizsgálatához érdemes elemezni a vulkánok tulajdonságait is, mivel nagy hasonlóság van egy robbanás és egy kitörés között, továbbá jól vizsgálhatók az ionoszférában.



6. ábra: A NUE5F és NLK5D állomás által kirajzolódó tartomány-idő-intenzitás

Forrás: a szerző szerkesztése CARTER et al. 2023 alapján

A 6. ábrán a Hunga Tunga vulkán kitörésének hatása látható. A hullámoknak az iránya és azoknak a sebessége S alakú nyomvonalként jelenik meg a Doppler-spektrogrammon. Az adó és a vevő közötti pályarészen az S alakú nyomoknak az egymáshoz képest történő eltolódásából lehet a sebességet és irányt megállapítani. A középvonaltól balra a 2022/01/14 teljes visszaverődés amplitúdó szám látható, míg a jobb oldal a 2022/01/15 amplitúdó értékeit mutatja. Az (a) ábra a Niue (NUE5F), a (b) ábra pedig a Norfolk Island (NLK5D) állomás értékeit mutatja, ugyanabban az időintervallumban. A jobb oldali színskálából látható, hogy mikor érkezett meg a kitörés hatása. A színek a visszhangoknak a számát jelzik. A TID-k jelenlétét a rózsaszín pontok jelölik. A piros csillag a kitörésnek az időpontját jelenti.

A következő elemi gázok jellemzők egy vulkánkitörésre:<sup>14</sup> elsődleges elemi gázok, Zn, Sn, Bi, Cu és Pb törnek a felszínre. Az elemi gázok mellett különféle vegyületek és keverékek is keletkeznek, amelyek kihatnak a környezetre:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $HCl$ ,  $HBr$  és  $HF$ . A robbanás során keletkező anyagok a  $H_2$ ,  $C$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Cl_2$ ,  $NO$ ,  $CO$ ,  $HCN$ ,  $HCl$ ,  $H_2O$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NH_3$ ,  $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $C_2N_2$ , fém-oxidok, karbonátok, bikarbonátok, cianidok, szulfátok, szulfitok, szulfidok, kloridok.

<sup>14</sup> UCL Earth Sciences 2022.

A felszínre expandált gázok a lávának az összetételétől és annak a hőmérsékletétől függenek. Sok esetben további kürtőkön keresztül törnek a felszínre, a nyomás folyamatos gázkibocsátás mellett kisebb robbanásokat is eredményez. Ebből következik, hogy egy vulkánkitörés egy időben elhúzódó folyamat, ezáltal annak nyomata is hosszabb ideig fog zavart okozni. A törmelékeket akár 10 km magasságig is fel tudja löni. A gázok levegőbe kerülése hatással van a környezetre és az időjárásra is.

## Összefoglalás

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az ionoszondás mérések alkalmasak lehetnek különböző típusú robbanások által keltett ionoszférikus zavarok detektálására, ugyanakkor a módszer megbízhatóságát jelentős mértékben befolyásolják a háttérzajok és a környezeti tényezők. A különböző robbanási események eltérő karakterisztikái – különösen a hullámterjedési sajátosságok és az időbeli lefolyás – lehetőséget adnak az események típus szerinti elkülönítésére. A felszíni és ionoszférikus adatok integrált elemzése ígéretes irányt jelent a jövőbeni kutatások számára, különösen a nem detektált vagy rejtett robbanások azonosítása terén.

A nagy mennyiségű gázok, továbbá az ütköző hamurészecskék kölcsönhatásba lépnek egymással és elektromosan feltöltődnek. Ennek a statikus elektromosságnak az eredménye a vulkánok körül jellegzetes villámlás. Ez egy olyan karakterisztika, amely kémiai robbantásos cselekményeknél nem fordul elő. Az egyes vulkáni tevékenységeket földrengések követik, amelyek cunamikhoz is vezethetnek. A földrengések által keltett hullámok szintén okoznak zavarokat az ionoszférában. Ez egy komplex folyamat, amely események láncolatát indítja el, és térben, időben is elnyúlik. A 2. táblázatban összefoglaltam a fő robbanástípusokat, azok hatásait és főbb karakterisztikáikat.

2. táblázat: Robbanások megkülönböztetése

| Típus              | Időtartam                                                                      | Hatás                                                        | Környezeti hatás                                       | Anyagáramlás                                | Hullámtípus                                                                     |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Kémiai robbanás    | Alacsony frekvencia, hosszabb időtartam, 8–12 perc, mire az ionoszféráig eljut | Fizikai erőhatás, hőhatás, kémiai hatás                      | Felszíni pusztítás; a robbanás erejéig                 | Rövid időtartam, kémiai anyagok             | AG-hullám <sup>15</sup>                                                         |
| Nukleáris robbanás | Gyorsabban jut el az ionoszféráig, mint a kémiai robbanás                      | Fizikai erőhatás, hőhatás, ionizáló sugárzás                 | Felszíni; a robbanás után a sugárzás hosszú ideig tart | Rövid időtartam, sugárzó anyagok            | AG-hullám, 50%-a lökeshullám, a maradék a hősugárzás és a radioaktív kiszóródás |
| Vulkánkitörés      | Hosszan tartó, az összes nyomott gázok lassan haladnak                         | Fizikai erőhatás, kémiai hatás, természetes radioaktív hatás | Környezet elemi pusztítása                             | Hosszantartó, vulkáni villámlók, porviharok | AG-hullám                                                                       |

Forrás: a szerző szerkesztése

<sup>15</sup> AG-hullám: akusztikus és nehézségi hullám.

A 2. táblázatból jól látható, hogy a különféle típusú robbanásoknak jellegzetes karakterisztikái vannak, de a közös jellemző, hogy mind a három robbanás esetében keletkezik nehézségi és akusztikus hullám. A folyamat során keletkeznek térhullámok és felületi hullámok. A primer longitudinális hullámok és a szekunder transzverzális hullámok térhullámok, amelyek közül az utóbbi nem terjed folyadékban. A Rayleigh és Love típusú hullámok a felületi hullámok, de ezek közül a Rayleigh típusú hullámnak van szerepe az ionoszonda-vizsgálat szempontjából.

A módszer alkalmazása különösen előnyös lehet olyan robbanási események esetében, amelyek nem lakott területen történnek, illetve ahol a helyszíni vizsgálat korlátozott vagy nem lehetséges. Ilyen események:

- fegyverek tesztelése;
- robbanóanyagok tesztelése;
- légköri események, anomáliák;
- légkörben történt robbanás;
- víz alatti robbantások észlelése.

A rendszer előnye lenne, hogy nem bejelentett, titkos eseményekről is lehetne adatot gyűjteni, a karakterisztikák meghatározása mellett a digiszonda és a földfelszín adatainak összevetésével.

A tanulmány eredményei elsősorban a különböző detektálási megközelítések összehasonlító elemzésén alapulnak, és alapot nyújtanak a jövőbeni kvantitatív vizsgálatokhoz.

## Felhasznált irodalom

- BARTA Veronika et al. (2019): Digitális ionoszféra radar (DPS4D) a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban: új megfigyelési és kutatási lehetőségek. In BACSÁRDI László – SZÜCS Eszter – WESZTERGOM Viktor (szerk.): *Magyar Űrkutatási Fórum 2019 – Az előadások összefoglalói*. Sopron: Magyar Asztronautikai Társaság, 17.
- BARTA Veronika et al. (2023): Földrengések nyomai a felsőlégkörben? *Fizikai Szemle*, 73(10), 338–342.
- CARTER, B. A. et al. (2023): The Ionospheric Effects of the 2022 Hunga Tonga Volcano Eruption and the Associated Impacts on GPS Precise Point Positioning Across the Australian Region. *Space Weather*, 21(5). Online: <https://doi.org/10.1029/2023SW003476>
- DARUKA Norbert (2023): Érzéketlen robbanóanyagok I. – Célkeresztben a TNT és a Composit B kiváltása. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(2), 5–21. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.2.1>
- GIANNATTASIO, Fabio (2022): Ionosphere Monitoring with Remote Sensing. *Remote Sensing*, 14(21), 5325. Online: <https://doi.org/10.3390/rs14215325>
- HUN-REN Soproni kutatóintézetrel történő személyes interjú, 2024.
- MENDOZA, Jhon J. B. – RUIZ, Carlos F. Q. – JARAMILLO, Carlos R. P. (2017): Implementation of an Electronic Ionosonde to Monitor the Earth's Ionosphere via a Projected Column through USRP. *Sensors*, 17(5). Online: <https://doi.org/10.3390/s17050946>
- REZY, Pradipta – LAI, Pei-Chen (2020): Observations of Ionospheric Disturbances Associated with the 2020 Beirut Explosion by Defense Meteorological Satellite Program and Ground-Based Ionosondes. *Annales Geophysicae*, 42(1), 301–312. Online: <https://doi.org/10.5194/angeo-42-301-2024>
- UCL Earth Sciences (2022): The Chemistry of Volcanic Gases and Their Environmental Impacts. *YouTube*, 2022. április 4. Online: [https://www.youtube.com/watch?v=ia7PcET\\_cCo](https://www.youtube.com/watch?v=ia7PcET_cCo)

## Jogi forrás

27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról



Pap Andrea,<sup>1</sup>  Vég Róbert László<sup>2</sup> 

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

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

A cikksorozat harmadik része bemutatja, hogy a térszemlélet fejlesztése különböző tantárgyakban, változatos oktatási módszerek alkalmazásával valósítható meg, mint például a szemléltetés, projekt módszer, kooperatív tanulás, szimulációk és szerepjátékok. A vizuális és interaktív szemléltetési eszközök, például térképek, 3D-modellek, digitális animációk, valamint a modern digitális technológiák, mint a virtuális és kiterjesztett valóság, jelentősen javítják a térbeli fogalmak megértését és a tanulók aktív részvételét. Emellett hangsúlyos szerepet kapnak a térszemlélet fejlesztését szolgáló szoftverek, a CAD, a modellkészítő és szimulációs programok, amelyek lehetővé teszik a vizuális, interaktív és gyakran játékos tanulási élményt. A technológiai innovációk, mint a VR, AR, haptikus eszközök, valamint a felhőalapú és paraméterezett szoftverek, tovább bővítik a lehetőségeket, ugyanakkor kihívásként jelennek meg a hozzáférhetőség és az eszközigények terén. A cikk összegzi, hogy a különböző oktatási stratégiák és technológiák integrálásával hatékonyabban fejleszthető a térszemlélet, hozzájárulva a térbeli gondolkodás és problémamegoldó képességek erősítéséhez, ami különösen fontos a mérnöki és katonai logisztikai területeken.

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

<sup>1</sup> Egyetemi docens, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: [pap.andrea@uni-nke.hu](mailto:pap.andrea@uni-nke.hu)

<sup>2</sup> Egyetemi docens, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, e-mail: [vegh.robert@uni-nke.hu](mailto:vegh.robert@uni-nke.hu)



*The third part of the series of articles shows that spatial thinking can be developed in various subjects using a variety of teaching methods, such as visualisation, project-based learning, cooperative learning, simulations, and role playing. Visual and interactive tools such as maps, 3D models, digital animations, and modern digital technologies such as virtual and augmented reality significantly increase the understanding of spatial concepts and active participation by learners. In addition, software designed to develop spatial awareness, CAD, modelling and simulation programmes play an important role, enabling a visual, interactive and often playful learning experience. Technological innovations such as VR, AR, haptic devices, and cloud-based and parameterised software further expand the possibilities, but at the same time pose challenges in terms of accessibility and equipment requirements. The article summarises that integrating different educational strategies and technologies can more effectively develop spatial awareness, contributing to the strengthening of spatial thinking and problem-solving skills, which is particularly important in the fields of engineering and military logistics.*

**Keywords:** spatial awareness, spatial perspective, 3D printing, digital modelling

## Bevezetés

A térszemlélet fejlesztése alapvető szerepet játszik a térbeli gondolkodás és a vizuális tájékozódás kialakításában, különösen az oktatás különböző szintjein és tantárgyaiban. Korábbi kutatások és tapasztalatok rámutattak, hogy a hatékony tanulási stratégiák alkalmazásával jelentősen növelhető a tanulók térbeli képességeinek fejlettsége, ami hosszú távon hozzájárulhat a problémamegoldó készségek, a kreativitás és a kritikus gondolkodás erősítéséhez. Az eddigi tapasztalatok szerint a vizuális szemléltetés, a projekt módszer, a kooperatív tanulási formák, valamint az interaktív technológiák – például a virtuális és kiterjesztett valóság – együttes alkalmazása különösen hatékony eszközök a térbeli képességek fejlesztésében. A szemléltetés révén a tanulók vizuális módon, konkrét példákon keresztül ismerhetik meg a térbeli összefüggéseket, amelyek aktivizálják és motiválják a tanulókat. A projekt- és kooperatív módszerek támogatják a mélyebb megértést, a több nézőpontból történő értelmezést, valamint a csapatmunkát, ami a való életben is alapvető készség. Ezen túlmenően a digitális eszközök, mint a 3D-s modellező szoftverek, a VR- és az AR-alkalmazások, lehetővé teszik, hogy a tanulók interaktív módon járjanak körül bonyolult térbeli problémákat, és saját tapasztalatokat szerezzenek a virtuális környezetben. Mindezek a stratégiák és technológiák nemcsak a tanulók térbeli tájékozódását segítik elő, hanem hozzájárulnak az oktatási folyamat élményszerűsítéséhez és hatékonyságának növeléséhez, így megalapozva a térszemlélet fejlesztésének módszertani alapjait a jövőben is.

## A térszemlélet fejlesztését biztosító oktatási stratégiák

A térszemlélet fejlesztése a különböző tantárgyak keretében valósul meg, de ezekhez az eredményesség elérése érdekében más és más oktatási stratégia párosulhat, amelynek fogalmára számos meghatározást lehet találni, ezek közül Falusi megfogalmazásában az alábbi olvasható:



„[A] módszereknek, eszközöknek és szervezési módoknak egy adott cél érdekében a konkrét feltételek figyelembevételével létrehozott egyedi kombinációja.”<sup>3</sup> Egy másik megközelítés szerint: „A stratégia sajátos célok elérésére szolgáló szervezési módok és formák, módszerek, eszközök olyan komplex rendszere, amely koherens elméleti alapokon nyugszik, sajátos szintaxissal (a végrehajtandó lépések meghatározásával és adott sorrendjével) rendelkezik, és jellegzetes tanulási környezetben valósul meg.”<sup>4</sup> A *pedagógia alapjai szakmai pedagógusjelölteknek I.* című kötet szerint a stratégiát a módszer, a munkaforma és a taneszközök harmonikus kapcsolataként értelmezzük. A tanítási stratégia a tanítás során alkalmazott módszer, munkaforma és taneszköz kapcsolatát, a tanulási stratégia a tanulás során alkalmazott módszer, munkaforma és taneszköz összefüggéseit jelenti.<sup>5</sup>

A stratégia részeként említett oktatási módszerek széles választéka ismert és található meg a különböző szakirodalmakban, mint például az előadás, a magyarázat, az elbeszélés, a megbeszélés stb., de ezek közül csak azokat ismertetjük, amelyeknek legnagyobb hatása lehet a térszemlélet fejlesztésére, ilyenek például a szemléltetés, a projektmódszer, a kooperatív oktatási módszerek, a szimuláció, a szerepjáték és a játék.

A szemléltetés mint pedagógiai módszer jelentős szerepet játszik a térszemlélet fejlesztésében, mivel lehetőséget teremt a tanulók számára, hogy vizuális formában, konkrét példákon keresztül ismerjék meg a térbeli összefüggéseket. A szemléltetés, demonstráció olyan oktatási módszer, amelynek során a tanulmányozandó tárgyak, jelenségek, folyamatok észlelése, elemzése történik, lényege pedig, hogy a tananyag komplexitását csökkentve, vizuális eszközök segítségével könnyebben érthetővé és megjegyezhetővé tegye az információkat. A különböző szemléltetési formák, mint például diagramok, modellek vagy digitális animációk segítenek a diákoknak abban, hogy a tanultakat a gyakorlatban is alkalmazni tudják, ezzel elősegítve a figyelem fennmaradását és a tanulási motiváció növelését. A vizuális elemek általában vonzóbbá teszik a tanulási folyamatot, ezáltal aktívabb részvételre ösztönöznek. Lehetőség adnak a differenciált tanulásra is, mivel a különböző képességű tanulók számára eltérő nehézségű és típusú szemléltető eszközök használhatók. A szemléltetés kezdetekor meg kell teremteni a tanulás feltételeit problémafelvetéssel, minden tanuló számára jól követhetőnek kell lennie, fontos eleme a lényeg kiemelése, mindig az adott osztály vagy tanuló előtanulmányaihoz, képességeihez kell igazítani. A szemléltetés nagyobb önállóságot nyújtó típusa a kollaboratív demonstráció, ahol az oktató ismerteti, bemutatja a problémát, és a tanulókat kéri meg, hogy adjanak alternatívákat a megoldásra, tegyenek fel kérdéseket, vagy pedig vonják le a következtetéseket. Ez nem egy elkülönülten alkalmazott módszer, hanem a szóbeli közléssel együtt jelenik meg. Alkalmazásakor meg kell győződni arról, hogy valóban könnyebbé teszi-e az adott ismeret megértését; a bemutatás során elhangzó információk irányítsák a tanulók figyelmét a bemutatott tárgy és az ismeretanyag között.

A szemléltetés számos formában megvalósítható, és a választott eszközök jelentős hatással vannak a térszemlélet fejlesztésére. A térképek segítenek a tanulóknak a helyszínek és azok

<sup>3</sup> FALUS et al. 1989: 16.

<sup>4</sup> FALUS–SZÜCS 2022.

<sup>5</sup> TÓTH 2022.

kapcsolatának megértésében, mert a különböző térképek eltérő aspektusokat emelnek ki. A háromdimenziós modellek (domborművek, alkatrész modellek) lehetővé teszik, hogy a tanulók a térbeli formákat valóságként megfigyeljék, továbbá a modern technológia biztosítja, hogy interaktív 3D-modelleket és virtuálisvalóság-alkalmazásokat használjanak a tanulás során. Ezek az eszközök fokozzák a tanulói élményt és a komplex térbeli összefüggések könnyebb megértését.<sup>6</sup>

A projekt módszer olyan módszer, amely a tanulók érdeklődésére, az oktatók és a tanulók közös tevékenységére épít, az ismeretszerezési folyamatot projektek sorozataként határozza meg. A projekt során a tanulók csapatokban dolgoznak, és közösen tervezik meg a feladatokat, valamint osztják el a munkát. A projekt feladat középpontjában egy valós, gyakorlati természetű feladat áll, ahol a tanulók a témát széles összefüggésében dolgozzák fel. A módszer lépései a célok, a téma kiválasztása és megfogalmazása, a tervezés, a kivitelezés, majd a zárás. A cél nem a tanulás, hanem valamilyen konkrét eredmény, amely az ismeretek elsajátítását indirekt módon biztosítja. Sajátossága a tanulók számára fennálló nagy fokú szabadság a célok kiválasztásában, a tervezésben, a feladat végrehajtásában és az értékelésben. A projekt módszer térszemlélet-fejlesztő hatása kiterjed a kritikai gondolkodásra, a kreativitásra és a problémamegoldó készségre. A tanulók aktívan részt vesznek a tanulási folyamatban, ami növeli a motivációjukat és a tanulás iránti elkötelezettségüket. A módszer hátránya, hogy nehezen illeszthető az általánosan alkalmazott szervezeti formák közé, az oktatóknak precízen meg kell tervezniük a projekteket, hogy azok valóban támogassák a térszemlélet fejlődését. A tanulók képességei közötti eltérések, a változó érdeklődések és munkastílusok is nehezítik a közös munkát.<sup>7</sup>

A kooperatív oktatás olyan pedagógiai megközelítés, amely a tanulók közötti együttműködésre helyezi a hangsúlyt, nemcsak a társas készségek fejlesztésére koncentrál, hanem a kognitív fejlődésre is. A tanulók kis csoportokban (4–6 fős) dolgoznak együtt, megosztva egymás között tudásukat és tapasztalataikat, továbbá a csoportos munka során különböző szerepeket töltenek be, ami elősegíti a felelősségvállalást és a közös tanulást. Ezen módszer esetében a tanulók nemcsak passzív befogadói a tudásnak, hanem aktív résztvevői a tanulási folyamatnak. A tevékenység során képesek jobban megérteni a térbeli viszonyokat, mivel a közös munka különböző nézőpontok és megközelítések megértését teszi lehetővé. Az együttműködésre épülő tanulás során képesek különböző perspektívákból megközelíteni a térbeli problémákat, ami elősegíti a kognitív fejlődést. A munkaerőpiacon a legkeresettebb szakemberek azok, akik képesek másokkal (kollégákkal) együttműködni, és a feladatokat team-munkában elvégezni, vagyis előtérbe került a kooperációban történő munkavégzés. A kooperatív oktatás jól kombinálható más oktatási módszerekkel, mint például a projekt módszer.<sup>8</sup>

<sup>6</sup> LADA 2009.

<sup>7</sup> HOLIK–SANDA–VIOLA 2022: 210; SALÁT–SZIVÁK–RÉNYI 2019.

<sup>8</sup> CSIMÁNE POZSEGOVICS – SCHLICHTER-TAKÁCS 2022; CSAJKA–BENCÉNÉ 2024.

A szimulációk és szerepjátékok olyan interaktív tanulási formák, amelyek lehetővé teszik, hogy a diákok aktívan részt vegyenek a tanulási folyamatban, leegyszerűsítik a valóságot, és a rendszer részletei helyett annak egészére koncentrálnak. A szimulációkban a tanulók virtuális vagy valós környezetben tapasztalhatják meg a tananyagot, míg a szerepjátékok során különböző karaktereket és helyzeteket alakítanak, lehetőséget adva a kreatív gondolkodásra és a problémamegoldásra. A szerepjátékos tanulás folyamán jobban rögzítik az információt, ezáltal jobban képesek alkalmazni a tanultakat valós helyzetekben. A szimulációk és szerepjátékok alkalmával gyakran valós problémákat kell megoldaniuk munkacsoportokban, ami elősegíti a csapatmunkát és a kommunikációt, a különböző nézőpontok megvitatása és a közös döntéshozatal hozzájárul a térbeli gondolkodás fejlesztéséhez.<sup>9</sup>

## A térélmény biztosításának technikai lehetőségei

A térsemlélet számítógéppel támogatott fejlesztése a modern oktatás egyik legdinamikusabban fejlődő területe. A digitális technika innovációja forradalmasította azt a folyamatot, amely lehetővé tette a komplex térbeli adatok feldolgozását és vizualizálását. E módszer egyik legfontosabb aspektusa az adatok vizualizációja, a vizuális reprezentációk (térképek, 3D-modellek, interaktív alkalmazások) segítenek az információk könnyebb feldolgozásában és megértésében.<sup>10</sup> Ez a technológia nemcsak a szakemberek, hanem a diákok számára is elérhetővé vált, segíti őket abban, hogy jobban megértsék a komplex rendszereket.<sup>11</sup> Ezen technológiák használata ösztönzi a kritikai gondolkodást és a problémamegoldó készségeket. A technológiai fejlődés üteme rendkívül gyors, és folyamatosan alkalmazkodni kell az új eszközökhöz és módszerekhez. A digitális technikák fejlődése lehetővé teszi a térbeli adatok hatékonyabb kezelését és vizualizációját, miközben új módszereket kínál a különböző problémák megoldásához.

Mivel látásunk során a két szem ugyanabban az időben két különböző képet ad, ezért ez egyfajta térélményt nyújt a néző személynek, az agy integrálva dolgozza fel a két különböző képet. A számítástechnikai eszközök kijelzője többnyire sík, de még így is tudunk térélményt nyújtani a fények, árnyékok, perspektíva és takarások megfelelő alkalmazásával. Ha a tanuló saját maga tudja a modellt forgatni, a nézőpontját, a mozgatás sebességét és irányát megváltoztatni, akkor az érzékszervei összekapcsolják az élményt.

A térélmény biztosításának technikai lehetőségei közé tartozik a virtuális valóság (*virtual reality*, VR), a kiterjesztett valóság (*augmented reality*, AR),<sup>12</sup> a 3D-modellezés, a haptikus technológiák, valamint a helymeghatározó rendszerek.

A virtuális valóság olyan technológia, amely hozzájárul a felhasználója számára, hogy egy számítógép által generált környezetbe lépjenek be, interakcióba kezdjenek és tapasztalatokat szerezzenek egy háromdimenziós térben. A VR-élményhez általában speciális szemüvegre

<sup>9</sup> DEMETER-KÓVÁRI 2020.

<sup>10</sup> NÉMETH-SZABÓ-BALOG 2020: 225–268.

<sup>11</sup> KOVÁCS 2022; KOVÁCS 2023.

<sup>12</sup> NÉMETH-VIRÁGH 2021.

és érzékelőkre van szükség, amelyek követik a felhasználó fejmozgását (1. ábra). Lehetővé teszi a tanulók számára, hogy különféle interaktív gyakorlatokban vegyenek részt, amelyek a téri képességeket célozzák meg (például navigációs szimulátorok). A virtuális környezet gazdag vizuális ingert nyújt az olyan játékokhoz és alkalmazásokhoz, amelyek a tárgyak azonosítására és a megfelelő mozgások végrehajtására fókuszálnak, elősegítve a vizuális feldolgozást. A VR lehetőséget biztosít arra, hogy a tanulók különböző szituációkban gyakoroljanak, így a tanulás sokkal dinamikusabbá és élvezetesebbé válik. Az ilyen típusú tanulás során a tanulók gyorsan reagálhatnak a változó körülményekre.<sup>13</sup>



1. ábra: Virtuálisvalóság-technológia

Forrás: <https://bytech.hu/vr/>

A kiterjesztett valóság a valós világ digitális elemekkel való kombinálására épül, amely kiegészíti azt digitális információkkal, hogy a felhasználók interakcióba lépjenek a környezetükkel és a digitális tartalmakkal, vagyis valós időben lássák a digitális információkat a fizikai környezetükben. Okostelefonok és táblagépek, valamint AR-szemüvegek segítségével interakciós élményeket élhetnek át (2. ábra). A technológia lehetővé teszi az oktatók számára, hogy interaktív tananyagot készítsenek, amely segíti a tanulókat a téri képességek fejlesztésében. Az olyan alkalmazások, amelyek a geometriai formák és a térbeli kapcsolatok vizualizálására összpontosítanak, segítenek a fogalmak jobb megértésében. Gün és Atasoy (2017) kutatásai bizonyították, hogy az AR segítségével iskolában lehetséges fejleszteni a téri képességeket.<sup>14</sup>

<sup>13</sup> SZABÓ-PŠENÁKOVÁ 2023: 79–89.

<sup>14</sup> GÜN-ATASOY 2017: 30.



2. ábra: Kiterjesztettvalóság-technológia

Forrás: MAINELLI 2023

A VR- és az AR-technika hátránya a hozzáférhetőség, mivel nem mindenki rendelkezik a szükséges eszközökkel és szoftverrel, valamint a túlzottan intenzív élmények kényelmetlenséget vagy akár szédülést is okozhatnak.

A 3D-modellek használatakor a felhasználók vizuálisan és interaktívan tapasztalják meg a környezetet, például a tervezőknek a gépészet tervezési folyamatában segítenek, hogy valószínűbb módon mutassák be elképzeléseiket.

A haptikus technológiák a tapintásos érzékelésre építenek, amely új módja a gépek és az emberek kommunikációjának. A haptikus visszajelzés hasznos lehet a VR- és az AR-alkalmazásokban, mivel fokozza az élményt, és biztosítja, hogy a felhasználók valódi interakciókat éljenek át a virtuális környezettel. Az érintés szimulálására többféle mód létezik, a legelterjedtebb a tapintókesztyű, amely lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy „megérintse” a virtuális objektumokat, ezáltal még élethűbb élményt nyújtva. Létezik olyan technológia is, amely semmilyen beavatkozást nem igényel, mint például a gépjárművezetés, ahol a vezetők egy egyszerű kézmozdulattal megváltoztathatják a hőmérsékletet, a zenét, vagy akár a térképet is megnyithatják, miközben jobban tudnak összpontosítani a vezetésre.<sup>15</sup>

Integrált rendszerben alkalmazva a technológiákat, új komplex élményeket lehet létrehozni. Például egy múzeum interaktív kiállításán a látogatók VR-headsetet viselve bejárhatják a virtuális teret, miközben AR-információkat szereznek a kiállított tárgyakról, és haptikus visszajelzést kapnak a tapasztalataik során.

A jövőbeli fejlesztésekben a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás integrálása a térélménybe új szintre emelheti az interaktivitást és a személyre szabhatóságot, mivel képes lehet a felhasználói szokások elemzésére.

<sup>15</sup> SALTER 2020: 39–42.

## A térszemlélet fejlesztését biztosító szoftverek

A térszemlélet fejlesztését célzó szoftverek többféle formában léteznek, amelyek lehetnek geográfiai információs rendszerek (GIS), 3D-modellező, szimulációs és AR-/VR-szoftverek.

A GIS-szoftverekkel a felhasználók térképeket készíthetnek, adatokat elemezhetnek és vizualizálhatnak, ezáltal kiválóan alkalmazhatók földrajzi típusú tantárgyak oktatásában. A 3D-modellező szoftverek (SketchUp, Blender, különböző CAD-programok stb.) lehetővé teszik, hogy általuk modelleket készítsenek, és különösen hasznosak a gépészeti és építészeti tervezésben, a művészetekben, de szerepet játszhatnak például a matematika oktatása során is, a geometriai formák megértésében.

A SketchUp egy intuitív és felhasználóbarát 3D-modellező szoftver, amelyet elsősorban építésszek, belsőépítésszek, mérnökök és tervezők használnak. A program kiemelkedő jellemzője a könnyű tanulhatóság és a gyors modellezési folyamat, amely lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy szinte azonnal vizuálisan megjelenítsék ötleteiket. A SketchUp széles körű eszközkészlettel rendelkezik, beleértve a formák, textúrák és árnyékok egyszerű kezelését, valamint a 3D-nyomtatásra való előkészítést is. A szoftver online közössége és a kiegészítők gazdag tárháza tovább növeli a felhasználási lehetőségeket.

A Blender egy nyílt forráskódú 3D-modellező, animációs szoftver. A program sokoldalúsága biztosítja a felhasználók számára, hogy különféle területeken, például játékfejlesztés, filmkészítés, vizuális effektek és 3D-nyomtatás terén alkossanak. A Blender számos funkciót kínál, többek között modellezést, textúrázást, animációt és szimulációt, valamint lehetővé teszi a fotorealistikus képek készítését. A felhasználói felület testreszabhatósága és a közösségi támogatás révén a Blender ideális választás mind a kezdő, mind a tapasztalt felhasználók számára.

A szimulációs szoftverek, mint például a GeoGebra, lehetővé teszik a diákok számára, hogy interaktív módon fedezzék fel a matematikai és fizikai fogalmakat. Ez egy dinamikus matematikai szoftver, amely integrálja a geometria, algebra, statisztika eszközeit egy felhasználóbarát környezetben. Az alkalmazás célja, hogy elősegítse a matematikai gondolkodást és a tanulást interaktív módon, lehetővé téve a felhasználók számára, hogy vizuálisan felfedezzék a matematikai fogalmakat. A GeoGebra különösen népszerű az oktatásban, mivel könnyen használható, és támogatja a különböző matematikai szintű tanulókat. A program lehetőséget biztosít grafikus ábrázolások készítésére, egyenletek megoldására, valamint dinamikus modellek létrehozására, így a tanulók és a tanárok számára egyaránt hasznos eszközként szolgál a matematikai ismeretek elmélyítésében, továbbá segíti a térbeli gondolkodás fejlesztését, azáltal, hogy valós idejű visszajelzést ad a felhasználók interakcióira, valamint lehetővé teszi, hogy síkbeli (háromszög, négyzet stb.) vagy térbeli alakzatokat hozzanak létre és manipuláljanak. A GeoGebra lehetőséget ad a diákoknak arra, hogy dinamikusan változtassanak az alakzatok paraméterein, amivel a különböző matematikai helyzetek azonnal vizualizálhatók. Ezzel a megközelítéssel a tanulók fel tudnak fedezni geometriai összefüggéseket és matematikai



törvényszerűségeket, képesek lesznek modellezni különböző térbeli alakzatokat és megérteni azok térfogatát és felszínét.<sup>16</sup>

A GeoGebra AR-változata lehetővé teszi a kiterjesztett valóság bevonását a munkába, amely elősegíti a tanulók térszemlélet-fejlesztését is. A tanulás sokkal szórakoztatóbb az AR-ben, és ha egy olyan összetett tantárgy, mint a matematika, vizuálisan megjeleníthető a való világban, az sokkal világosabbá teheti a fogalmakat. A GeoGebra matematikai objektumokat helyez el a való világban, így különböző szögekből lehet felfedezni őket (3. ábra). A feladatok elvégzéséhez és a szükséges képernyőképek elkészítéséhez fizikailag kell mozogni a virtuális objektumok között.<sup>17</sup>



3. ábra: GeoGebra AR-alkalmazása

Forrás: The Economic Times 2018

A térszemlélet fejlesztését célzó szoftverek interaktív, vizuális és élményszerű tanulási lehetőségeket biztosítanak, ezáltal a tanulók jobban megérthetik a térbeli fogalmakat és összefüggéseket, ugyanakkor lehetőséget adnak az oktatóknak, hogy gazdagítsák a tananyagot és növeljék a tanulók érdeklődését.

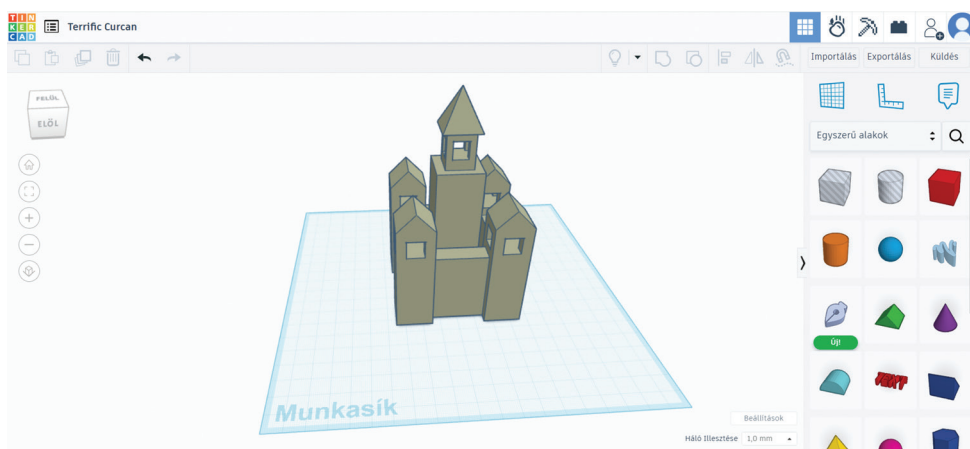
A CAD/CAM (*computer aided design* – számítógéppel segített tervezés, *computer aided manufacturing* – számítógéppel segített gyártás) szoftverek előnye, hogy az elméletet összekapcsolják a gyakorlattal, alkalmasak ipari felhasználásra, tervezésre, síkbeli rajzok készítésére és 3D-modellezésre. Különböző programok találhatók, amelyek közül egyesek nyílt elérhetőségűek, mások fizetős programok, magyar és idegen nyelvűek, vagy pedig gyerekek

<sup>16</sup> PETZ-REIDER 2020: 45.

<sup>17</sup> OSYPOVA-TATOCHENKO 2021.

és felnőttek (munkára) számára készültek. A programok egyenesek, görbék, pontok, felületek és testprimitívek felhasználásával készítik el a rajzokat, képesek kiszámítani a megrajzolt elem tömegét, térfogatát. Az alábbiakban példaként három programot mutatunk be, egy gyerekek számára könnyen elérhető és alkalmazható (TinkerCAD), egy nyílt forrású, magyar nyelvű (FreeCAD) és egy fizetős, angol nyelvű, úgynevezett ipari felhasználású programot.

A TinkerCAD egy online tervező és modellező program, amely ideális választás a tanulók számára, mert lehetővé teszi, hogy gyorsan készítsenek 3D-modelleket. A felhasználók egyszerűen regisztrálhatnak egy ingyenes fiókot, és már kezdhetik is a tervezést. A program felülete világos és rendezett, a különböző eszközök és funkciók könnyen elérhetők. A tervezőfelület középpontjában egy 3D-s vászon áll, ahol a felhasználók a különböző geometriai formákat egyszerűen „fogd és vidd módszerrel” elhelyezhetik (4. ábra). Az eszközök és a funkciók, mint például a méretezés, forgatás és mozgatás egyértelműen láthatók, ami segíti a felhasználót a modellek precíz kialakításában. Az egyes elemek színének és anyagának megváltoztatása is rendkívül egyszerű. A TinkerCAD egyik legnagyobb előnye, hogy már akár teljesen kezdők is, mindenféle előtanulmány nélkül sikereket érhetnek el, és létrehozhatnak 3D-modelleket. A program különböző 3D-s objektumok széles választékát kínálja, amelyeket szabadon lehet kombinálni és módosítani, valamint segítségével a létrehozott modelleket közvetlenül 3D-nyomtatóra<sup>18</sup> lehet exportálni. A TinkerCAD számos oktatóanyagot kínál a felhasználók számára, amelyek lépésről lépésre végigvezetik őket a különböző projektek elkészítésében, így a tanulási folyamat szórakoztató és élvezetes lesz, továbbá lehetőséget ad a kreativitás kibontakoztatására, és hozzájárul a digitális tervezés népszerűsítéséhez.



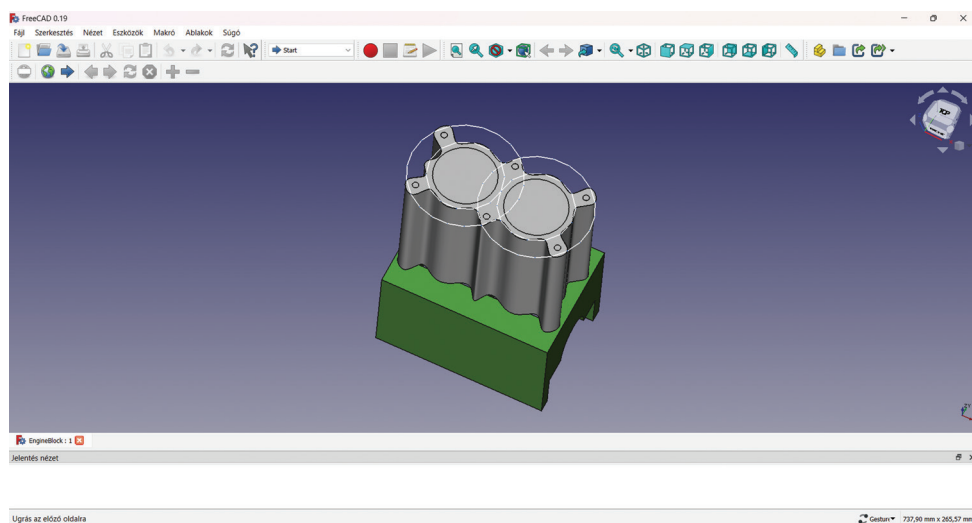
4. ábra: A TinkerCAD program képernyőképe

Forrás: a szerzők szerkesztése

<sup>18</sup> GÁL-NÉMETH 2019: 231–249.



A FreeCAD a nyílt forráskódú modellezőprogramok közé tartozik, ezért bárki hozzájárulhat a fejlesztéshez és testre szabhatja a saját igényei szerint. A program egyik legfontosabb jellemzője a paraméterezett modellezés, amely biztosítja a felhasználók számára, hogy a modellek geometriai elemeit és azok kapcsolatait matematikai formulák segítségével definiálják. Ez a funkció hasznos abban, ha a modelleket a későbbiek során módosítani szeretnék, mert a változások automatikusan frissítik a kapcsolódó elemeket is. A FreeCAD moduláris struktúrával rendelkezik, ami azt jelenti, hogy a felhasználók különböző modulokat telepíthetnek és használhatnak, attól függően, hogy milyen típusú munkát végeznek. A program felhasználói felülete intuitív és testre szabható, lehetővé téve az igényeknek megfelelő munkakörnyezet beállítását (5. ábra). Az elérhető eszközök közé tartozik a 3D-s nézet, a geometriai formák létrehozására szolgáló eszközök, a paraméterek beállítása és a modellek szerkesztése. A FreeCAD sokoldalú és számos területen alkalmazható program. Széles körben használják gépészeti tervezésre, mivel képes precíz geometriai modellek létrehozására és a részegységek paraméterezett kezelésére. Katonai robbantástechnikai alkatrészek megtervezésében is bizonyította már ez a szoftver az alkalmazhatóságát. Kumulatív töltetek és vágótöltetek is készültek vele kutatási célból.<sup>19</sup> A felhasználók könnyen tervezhetnek alkatrészeket, valamint szimulálhatják azok működését.

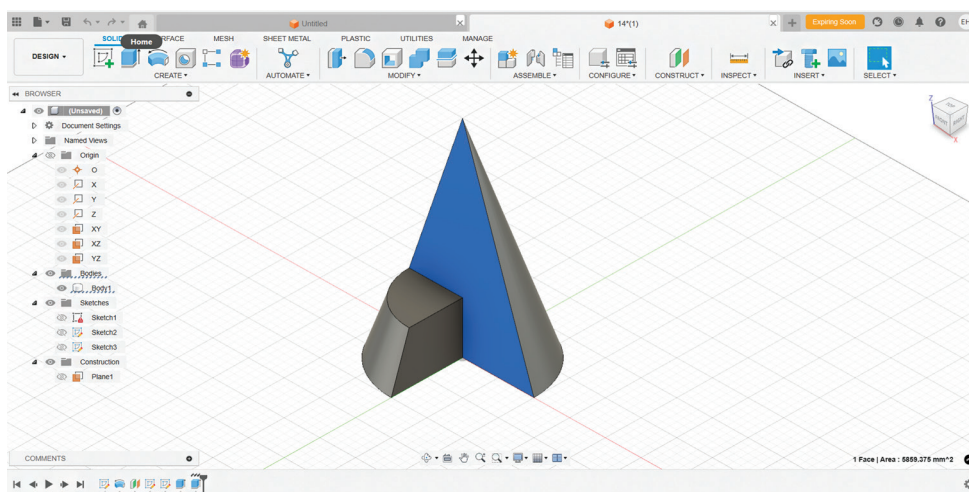


5. ábra: A FreeCAD program képernyőképe

Forrás: a szerzők szerkesztése

<sup>19</sup> ÁDÁM–EMBER 2022: 107; EMBER 2023: 32.

A Fusion360 az Autodesk által kifejlesztett integrált CAD-/CAM-program, amelynek célja, hogy egyesítse a hagyományos tervezési folyamatokat a felhőalapú technológiával, lehetővé téve a felhasználó számára, hogy bárhol és bármikor hozzáférhessen a munkáihoz. A program felhasználói felülete modern és könnyen navigálható. A paraméteres modellezés során a tervezési elemeket paraméterek alapján hozzák létre, így később könnyen módosíthatóvá válnak, továbbá elérhető a történet alapú modellezés is, amely rögzíti a felhasználó minden lépését, így biztosítva a korábbi állapotokhoz való visszatérést. Ez a funkció nagymértékben megkönnyíti a tervezési folyamatok nyomon követését és a kísérletezést. A Fusion360 szimulációs eszközöket is kínál, amelyek segítenek a tervezett modellek viselkedésének előrejelzésében. A program lehetővé teszi a statikus, a dinamikus és a hőmérsékleti szimulációk elvégzését. Legnagyobb előnye a felhőalapú tárolás és a kollaboráció, vagyis hogy a felhasználók könnyedén megoszthatják projektjeiket másokkal, így biztosítva a valós idejű együttműködést. A program automatikusan menti a változtatásokat, ezáltal a felhasználók soha nem veszítenek el fontos adatokat. Az Autodesk lehetővé teszi a tanulók és az oktatási intézmények számára, hogy ingyenesen használhassák a Fusion360 programot, ami jó lehetőséget biztosít az oktatás során, és használata által fejlődhet a tanulók térszemlélete is (6. ábra).



6. ábra: A Fusion360 program képernyőképe

*Forrás: a szerzők szerkesztése*

## Összegzés

A cikk a térszemlélet fejlesztésének oktatási stratégiáit mutatta be, hangsúlyozva, hogy különböző tantárgyakban eltérő módszerek és technológiák alkalmazhatók a térbeli gondolkodás kialakítására. A publikáció kiemeli, hogy a térszemlélet fejlesztésében hatékonyak lehetnek a vizuális, interaktív és kollaboratív módszerek, mint például a szemléltetés, projekt módszer, kooperatív tanulás, szimuláció, szerepjáték és játék. A szemléltetés vizuális eszközökön keresztül segít a térbeli összefüggések megértésében, a diagramok, a modellek, a digitális animációk

aktívalják a tanulók figyelmét és motivációját, valamint támogatják a differenciált tanulást. A projekt módszer a gyakorlati problémák megoldására, aktív részvételre ösztönöz, fejleszt a kritikus gondolkodást és kreativitást, bár szervezési kihívásokat jelent. A kooperatív oktatás a csoportmunka révén erősíti a térbeli viszonyok megértését, a csoportdinamikát és az együttműködést, amelyek fontosak a munkaerőpiaci készségek szempontjából is. A szimulációk és szerepjátékok lehetővé teszik a valós problémák virtuális vagy valós környezetben történő gyakorlatias kezelését, így mélyítve a térbeli tudást.

A digitális technológiák, különösen a számítógépes támogatású vizualizáció, a VR, az AR, a 3D-modellek és a haptikus eszközök forradalmasítják a térsemlélet fejlesztését. A virtuális valóság élményt nyújt, interaktív gyakorlatokat és szimulációkat kínálva, míg az AR a való világba helyez digitális tartalmakat, így élő kapcsolódást teremt a tanulók környezetével. A 3D-modellek és haptikus technológiák pedig biztosítják a fizikai tapasztalat és a vizuális élmény összekapcsolását, tovább növelve a térbeli gondolkodás fejlődését. A szoftveres támogatás szintén kulcsfontosságú a térsemlélet fejlesztésében. A GIS-rendszerek, térképek, a 3D-modellező szoftverek lehetővé teszik a vizuális és paraméteres tervezést, az alkatrészek precíz modellezését. A szimulációs programok interaktív matematikai és fizikai modelleket kínálnak, támogatva a térbeli gondolkodást. Az AR-alapú alkalmazások pedig a matematikai objektumokat a való világban jelenítik meg, így növelve az élményt és a megértést. Összességében a modern technológiák, módszerek és szoftverek gazdagítják az oktatási lehetőségeket, hatékonyabbá téve a térsemlélet fejlesztését. Ezek alkalmazásával a tanulók jobban megértik a térbeli összefüggéseket, miközben az oktatók is gazdagabb, élményszerű tananyagot kínálhatnak, ugyanakkor figyelembe kell venni a hozzáférhetőségi és kényelmi szempontokat is.

## Felhasznált irodalom

- ÁDÁM Balázs – EMBER István (2022): Béléstestek készítésének technikai lehetőségei alacsony sűrűségű anyagból. *Műszaki Katonai Közlöny*, 32(3), 101–111. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2022.3.6>
- CSAJKA Edina – BENCÉNÉ FEKETE Anikó Andrea (2024): Élményalapú oktatási módszerek. In BENCÉNÉ FEKETE Andrea – SCHLICHTER-TAKÁCS Anett (szerk.): *Módszertani eszköztár a felsőoktatásban tanító oktatók számára* 2. Gödöllő: MATE Press, 55–71. Online: <https://doi.org/10.54597/mate.0112>
- CSIMÁNÉ POZSEGOVICS Beáta – SCHLICHTER-TAKÁCS Anett (2022): Együttműködésen alapuló módszerek. In BENCÉNÉ FEKETE Andrea – SCHLICHTER-TAKÁCS Anett (szerk.): *Módszertani eszköztár a felsőoktatásban tanító oktatási számára*. Gödöllő: MATE Press, 45–57. Online: <https://doi.org/10.54597/mate.0004>
- DEMETER Robert – KÖVÁRI Attila (2020): Digitális szimuláció jelentősége meghatározó mérnökök kompetenciafejlesztésében. *Civil Szemle*, 17(2), 89–102. Online: [https://epa.oszk.hu/04100/04123/00002/pdf/EPA04123\\_civil\\_szemle\\_2020\\_02\\_089-102.pdf](https://epa.oszk.hu/04100/04123/00002/pdf/EPA04123_civil_szemle_2020_02_089-102.pdf)
- EMBER István (2023): 3D nyomtatott kumulatív idomtöltetek tesztrobbantása. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(3), 29–40. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.3.3>
- FALUS Iván – SZŰCS Ida (2022): *A didaktika kézikönyve. Elméleti alapok a tanítás tanulásához*. Budapest: Akadémiai Kiadó. Online: [https://mersz.hu/dokumentum/m1037adk\\_249/](https://mersz.hu/dokumentum/m1037adk_249/)
- 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>

- GÜN, Ezgi T. – ATASOY, Bilal (2017): The Effects of Augmented Reality on Elementary School Students' Spatial Ability and Academic Achievement. *Education and Science*, 42(191), 30–51. Online: <https://doi.org/10.15390/EB.2017.7140>
- HOLIK Ildikó Katalin – SANDA István Dániel – VIOLA Attila (2022): A készségfejlesztés lehetőségei STEM területeken. In IVANOVIC Josip – TÖRTELI TELEK Márta – VUKOV RAFFAI Éva (szerk.): *11. Nemzetközi Módszertani Konferencia: Paradigmaváltás az oktatásban és a tudományban*. Tanulmánygyűjtemény. Subotica: University of Novi Sad Hungarian Language Teacher Training Faculty, 210–221. Online: [https://www.researchgate.net/profile/Ildiko-Holik/publication/372187195\\_A\\_KESZSEGFEJLESZTES\\_LEHETOSEGEI\\_STEM\\_TERULETEKEN/links/64a81705c41fb852dd-5b4664/A-KESZSEGFEJLESZTES-LEHETOSEGEI-STEM-TERULETEKEN.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ildiko-Holik/publication/372187195_A_KESZSEGFEJLESZTES_LEHETOSEGEI_STEM_TERULETEKEN/links/64a81705c41fb852dd-5b4664/A-KESZSEGFEJLESZTES-LEHETOSEGEI-STEM-TERULETEKEN.pdf)
- KOVÁCS Zoltán (2022): Robbantás oktatás a katonai BSc. képzésben. In DARUKA Norbert (szerk.): *Fűrés-Robbantástechnika Nemzetközi Szimpózium Különkiadás 2022*. Budapest, Magyar Robbantástechnikai Egyesület, 61–74.
- KOVÁCS Zoltán (2023): 3D nyomtatás és felhasználása a katonai robbantástechnika oktatásában. In DARUKA Norbert – EMBER István – KOVÁCS Zoltán Tibor (szerk.): *II. Fűrés- Robbantástechnika nemzetközi szimpózium különkiadás 2023*. Budapest: Robbantástechnikai Egyesület, 94–103.
- LADA László (2009): Oktatási módszerek. *Oktatókutató és Fejlesztő Intézet*, 2009. június 17. Online: <https://ofi.oh.gov.hu/tudastar/problema-kerdesek/oktatasi-modszerek>
- MAINELLI, Tom (2023): Wie die Einführung von Augmented Reality in der Fertigung die Prozesse verändert. *PTC*, 2023. szeptember 8. Online: <https://www.ptc.com/de/blogs/ar/augmented-reality-adoption-in-manufacturing>
- NÉMETH, András – SZABÓ, András – BALOG, Ferenc (2020): 3D Virtualisation and Visualisation Technologies for Archiving the Results. In HAUSNER, Gábor – NÉMETH, András (szerk.): *Zrínyi-Újvár: A Seventeenth-Century Border Defence System on the Edge of the Ottoman Empire*. Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, 225–268. Online: [https://doi.org/10.36250/00757\\_13](https://doi.org/10.36250/00757_13)
- NÉMETH András – VIRÁGH Krisztián (2021): Virtuális valóság és haderő – fejlődéstörténet I. rész. *Haditechnika*, 55(2), 5–12. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.55.2.02>
- OSYPOVA, Nataliia V. – TATOCHENKO, Volodimir I. (2021): Improving the Learning Environment for Future Mathematics Teachers with the Use Application of the Dynamic Mathematics System GeoGebra AR. In *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on Augmented Reality in Education (AREdu 2021)* Kryvyi Rih, Ukraine, May 11, 2021, 178–196. Online: <https://ceur-ws.org/Vol-2898/paper10.pdf>
- PETZ Tiborné – REIDER József (2020): A tanítóképzés matematika oktatásának fejlesztési útjai a tantervi átalakításkor. In FEHÉR Ágota – GRÓZ Andrea (szerk.): *Tanulói szükségletek – Nevelői válaszok*. Győr: SZE-AK, 45–58.
- SALÁT Magdolna – SZIVÁK Judit – RÉNYI Ágnes (2019): Egy oktatóközösség tanulása és támogatása a projekt alapú tanulás megvalósítása érdekében. In VARGA Aranka – ANDL Helga – MOLNÁR-KOVÁCS Zsófia (szerk.): *Új kutatások a neveléstudományokban 2019*. Pécs: MTA Pedagógiai Tudományos Bizottság PTE BTK Neveléstudományi Intézet.
- SALTER, Chris (2020): Az érzékelés technológiái. Az érzékelés kibővítése az immerzivitás korában. *Játéktér*, 9(1), 39–50.
- SZABÓ Tibor – PŠENÁKOVÁ Ildikó (2023): Téri képességek fejlesztése kiterjesztett valóság segítségével. *OxIPO*, (1), 79–89. Online: <https://doi.org/10.35405/OXIPO.2023.1.79>
- The Economic Times (2018): 6 Amazing Augmented Reality Experiences on iPad that are Free. *The Economic Times*, 2018. május 9. Online: <https://economictimes.indiatimes.com/magazines/panache/6-amazing-augmented-reality-experiences-on-ipad-that-are-free/reality-with-a-different-view/slideshow/64094048.cms>
- TÓTH Péter (2022): *A pedagógia alapjai szakmai pedagógusjelölteknek I*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gazdasági és Társadalomtudományi Kar, Műszaki Pedagógia Tanszék.

Druzsín József<sup>1</sup> 

# A honi légvédelem SzA–75M Dvina és Sz–75M Volhov közepes hatótávolságú légvédelmi rakétarendszerei<sup>2</sup>

The SA–75M Dvina and S–75M Volhov Medium-Range Air Defence Missile Systems of the Hungarian Air Defence Force

Horváth Géza ny. törzsszázlós  
emlékének

*Magyarországon a honi légvédelem rakétafegyverzetét évtizedekre az SzA–75M Dvina és Sz–75M Volhov közepes hatótávolságú rakétakomplexumok (és azok típusváltozatai) határozták meg. A rendelkezésre álló szakirodalom alapján a cikk szerzője e típuscsalád eszközeinek és rakétáinak bemutatása kapcsán kitekint a fegyvernem megszervezésének körülményeire és történeti háttérére is.*

**Kulcsszavak:** honi légvédelem, SzA–75 Dvina, Sz–75 Volhov, légvédelmi rakétakomplexum

*For decades, Hungary's domestic air defence missile arsenal was defined by the SA-75M Dvina and S-75M Volhov medium-range missile complexes (and their variants). By comparing the available literature, the author of this article presents the equipment and missiles of these types and also looks at the circumstances and history of the organisation of this branch of the defence forces.*

**Keywords:** domestic air defence, SA-75 Dvina, S-75 Volhov, air defence missile complex

<sup>1</sup> Repüléstörténeti kutató, e-mail: [druzsин.jozsef@uni-nke.hu](mailto:druzsин.jozsef@uni-nke.hu)

<sup>2</sup> A szerző a szövegek és képek feldolgozása során sem nagy nyelvi modelleket (LLM), sem a mesterséges intelligencia más, specifikus típusait nem alkalmazta.

## Bevezető

A Cserépfaluban 1962 és 1990 között működő 105/3. honi légvédelmi rakétaosztály (MN 4565) SzA–75 Dvina, 1983-tól pedig Sz–75 Volhov technikát üzemeltetett. A település külterületén található bázis a borsodi tűzrendszer részeként évtizedekig védte a Miskolc környéki iparvidéket.

Gáspár István mezőkövesdi és Molnár János cserépfalui lakosok, egykori katonák a légvédelmi rakétás nyugdíjasok képviselőjében 2022 őszén azzal a kéréssel fordultak a szerzőhöz, hogy támogassa a Cserépfaluban felállítani kívánt légvédelmi rakétás emlékmű létesítését. Elmondták, hogy egy hatástalanított Volhov rakétát szeretnének indítóállvánnyal együtt kiállítani. Tudomásuk szerint az országban csak néhány helyen (Nyírtelek, Kecel Haditechnikai Park, Zánka tábor, Győr, Szolnok RepTár) található légvédelmi rakétás emlékmű vagy kiállított rakéta, ezért szeretnének Cserépfaluban is, a nagy múltú harcálláspont közelében egy ilyen emlékművet létrehozni. A 105/3. honi légvédelmi rakétaosztály egykori katonáinak összefogásával 2014. szeptember 27-én – a máig álló tiszti lakótelep sarkán – egy sziklára helyezett márványtáblát avattak, de szeretnének a fegyvernem múltjához méltó, monumentális emléket is állítani egy turisztikailag erősen látogatott helyszínen. Az emlékművel tisztelni kívánnak egykori fegyvernemük és településük katonai múltja előtt, egyben céljuk felhívni a mai ifjúság figyelmét a már-már elfelejtett, de napjainkban újjáéledő fegyvernem fontosságára. Vállalták a létesítendő emlékmű megfelelő és biztonságos elhelyezését, állandó közszemlére tételét a forgalmas bogácsi Hintó-völgyben, őrzött magánterületen. Vállalták továbbá a szükséges alépítmény (alapzat, állványzat) elkészítését, majd a későbbi gondozást és karbantartást is. Hosszas keresés és kiterjedt egyeztetések után kiderült, hogy a Magyar Honvédség tulajdonában (inkurenciában) már nincs kiállítható SzA–75 Dvina vagy Sz–75 Volhov típusú rakéta és indítóállvány. A megmaradt néhány hatástalanított eszköz a kívánt célra nem hozzáférhető.

Felmerült ötletként a rakéta kicsinyített másának elkészítése rozsdamentes anyagból és annak közszemlére tétele, ehhez viszont szükség lett volna a pontos méretek megadására, amelyek nem álltak rendelkezésre. A téma szakirodalmi feldolgozása során nyilvánvalóvá vált, hogy a szigorúan titkos besorolású technika miatt a légvédelmi rakétarendszerek működése alatt szinte alig jelent meg nyilvános, magyar nyelvű tanulmány, később pedig a hadrendből kivont eszközről már kevesen írtak. A fellelt néhány tudományos igényű tanulmány mellett nagy számú (szubjektív jellegű) visszaemlékezés olvasható egykori tisztek és sorkatonák tollából (blogok és magánkiadású visszaemlékezések<sup>3</sup>), de a titoktartási kötelezettség miatt ezek szakmai részletekre a legtrikább esetben térnek ki. A jelen tanulmány célja összefoglalni az Sz–75 légvédelmi rakétakomplexum-család hazai vonatkozású ismereteit a fellelhető szakirodalmi források alapján. Nem vállalkozik azonban a célfelderítés, a tűzelosztás és az osztályok harci munkájának bemutatására.

<sup>3</sup> NAGY-MEZŐ 2024.





1. ábra: A Cserépfaluban megkoszorúzott emléktábla és emlékkő

Forrás: a szerző felvétele

## A Magyar Néphadsereg légvédelmének kezdetei

A II. világháborút lezáró párizsi békeszerződés aláírását követően (1947. február 10.) hamarosan kezdetét vette Magyarország haderejének fejlesztése. Az 1948 júniusában bekövetkezett politikai fordulattal megkezdődött a szovjet minták másolása. A hadsereget megerősítették és politikai irányítás alá helyezték, sőt az alakulatok szervezését is szovjet katonai tanácsadók segítették. 1948. október 15-én alakították meg Szentendrén az 1. honvéd légvédelmi tüzérosztályt. A légvédelem fejlesztésében meghatározó szerepet kapott az 1949. augusztus 1-jén megalakult Bem Légvédelmi Tüzértiszti Iskola (Budapest, Hungária krt. 7–9.) és az 1950-ben létrehozott Honvéd Akadémia (amely 1955-ben Zrínyi Miklós nevét vette fel), ahol légvédelmi tüzér tanszék is működött. 1956–1959 között a fegyvernem újjászervezésének időszaka következett, ami már előrevetítette a kor követelményeinek megfelelő fegyverzet hadrendbe állítását. A világháborút követően kialakult hidegháborús időszakban gyors fejlődésnek indultak a gázturbinás sugárhajtású repülőgépek, amelyek olyan sebességi és magassági paraméterekkel repültek, amelyek miatt ellenük a kor színvonalán álló, hagyományos légvédelmi eszközök hatástalanoknak minősültek. Az atomfegyverek és azok hordozására képes eszközök megjelenése és elterjedése megteremtették az ellenséges célok lehető legnagyobb távolságon történő megsemmisítésének igényét. A Szovjetunióban a légitámadások elhárítása érdekében rakétakomplexumokkal felszerelt csapatokból csoportosításokat, úgynevezett tűzrendszereket hoztak létre a fontosabb városok és ipari létesítmények térségében, a Varsói Szerződés (1955.

május 14.) pedig megteremtette a tagországok közös légvédelmének igényét és feltételeit. A Szovjetunió így a szövetségesek által védett légtérrel növelte saját biztonságát, egyúttal biztosította a tagországok korszerű önvédelmének lehetőségét is, amely közös elvek és eljárásrend mentén valósult meg. Az MSZMP VII. kongresszusán 1959. november 30. és december 5. között a párt vezetése elköteleződését fejezte ki a Néphadsereg fejlesztése, azon belül is a honi légvédelem korszerűsítésének elsősége mellett, amely a légvédelmi rakétafegyverzet telepítését jelentette.

## Az átfegyverzés időszaka

Az új fegyverre való átképzésben először 29 fő részesült 1959-ben egy négy hónapos tanfolyamon a Szovjetunióban.<sup>4</sup> A Magyar Néphadsereg első rakétarendszere kiképzési célra 1959 októberében érkezett Börgöndre. Az új légvédelmi rakéta-tűzrendszereket az 1960 őszen szállított hadfelszereléssel és az 1959–1962 között megalakított „honi” légvédelmi rakéta-csapatokkal hozták létre. Öt-öt rakétaosztállyal és egy-egy technikai osztállyal megalakult a Budapest–dunaújvárosi tűzrendszer (11. ezred: Börgönd, Vértesacsba, Sárbogárd, Úny, Dunaföldvár és a 104. ezred: Isaszeg, Nógrádverőce, Szabadszállás, Vácegres, Gyömrő, Táborfalva), valamint a borsodi légvédelmi rakéta-tűzrendszer (105. ezred: Pingyomtető, Tardona, Cserépfalu, Aszaló, Szakáld). A tűzalegységeket szovjet gyártmányú, SzA–75M Dvina közepes hatótávolságú – akkoriban csúcstechnológiának számító – légvédelmi rakétakomplexumokkal szerelték fel. A korabeli potenciális légi támadóeszközök és azok alkalmazásának szüntelen fejlesztése miatt 1965-től ezeket is többször korszerűsítették. A csapatok velük közel 20 évig láttak el tűzrendszerben készségi szolgálatot.<sup>5</sup>

A légi támadóeszközök kis magasságú repülési képességének növekedésére adott válaszként hamarosan beköszöntött a korszerűsítés időszaka. Az 1965–76 közötti időszak fő feladata lett, hogy a légvédelmi csapatok képesek legyenek a kis és földközeli magasságon támadó ellenséggel szemben hatékony ellentevékenységet folytatni. A harceszközökön különféle átalakításokat, korszerűsítéseket végeztek, növelték a zavarvédelmet, és javították a légvédelmi rakétaosztályok túlélőképességét. Számos magyar kezdeményezés is történt, például idegen-barát felismerőberendezést építettek a komplexumokba.<sup>6</sup>

A Varsói Szerződés tagországaiban a Szovjetunióban kifejlesztett és gyártott automatizált vezetési és adattovábbító rendszert (VOZDUH, oroszul: levegő) alkalmazták több (VOZDUH-1P, majd M) változatban. Hazánkban először az 1960-as évek közepén, majd az 1970-es évek végén rendszerítették ennek alrendszereit (VP-1U és M), amelyek a honi légvédelmi alegység, egység és magasabbegység harcálláspontok harctevékenységének automatizált vezetésére szolgáltak.<sup>7</sup>

<sup>4</sup> VERES 2002: 8–15.

<sup>5</sup> VERES 2000: 8–15.

<sup>6</sup> VERES 2002: 141–143.

<sup>7</sup> PALIK 2011.



1978–1982 között az SzA–75M Dvina rakétakomplexumokat felváltották a korszerűbb, közepes hatótávolságú Sz–75M Volhov típussal, valamint a harci osztályok automatizált tűzvezetésére rendszeresítették a VEKTOR-2 VE és SZENYEZS ME automatizált vezetési rendszereket.<sup>8</sup>

## Építési beruházások

A Dvina és a Volhov rakétaosztályok felépítése nagyon hasonlított egymásra. A vontatható kabinok mozgatásával mindkét rendszert viszonylag könnyű volt áttelepíteni. A Varsói Szerződés országaiban a megerősített betonfedezékekben történő állandó elhelyezés volt a jellemző, de nem kizárólagosan. Magyarországon a Budapest körüli osztályok eszközeinek építettek is ilyen típusú fedezékeket, amelyek támadás esetén nagyban növelték a személyzet és az eszközök túlélési esélyeit.

Az új fegyverek fogadására 1959–60 folyamán új, korábban soha nem látott objektumok építése vált szükségessé, amelyeket az MN Elhelyezési és Beruházási Csoportfőnökség végeztetett különleges építőalakulatokkal. Már az előkészítő munkák is szigorú titoktartás és ellenőrzés mellett folytak. A kijelölt területeket sok helyen magas fallal, kettős kerítéssel vették körül, ahová az építőkön kívül más nem léphetett be. A laktanyai építkezések, a tiszt lakások és a tüzelőállások elkészítése rendkívül nagy jelentőségű és igen sok anyagi ráfordítással járó feladat volt. A csúcstechnológiát képviselő fegyverrendszerek telepítése a legnagyobb titoktartást követelte minden résztvevőtől. Akár építő, akár üzemeltető, hivatásos vagy sorkatona volt is valaki, alá kellett írnia a kötelezvényt, amelynek értelmében soha, senkinek nem beszélhet arról, ami a tudomására jutott a légvédelmi rakétarendszerekkel kapcsolatban.<sup>9</sup> Mind a rakéatechnika telepítése, mind később a gyakorlások (1962–67 között) csak éjszaka történhettek. A gyakorlások során csak meghatározott időtartamban és szektorban sugározhattak antennára kapcsolva.<sup>10</sup> A sok éjszakai esemény jelentős terhelést jelentett az állomány számára, de az álcázás mindennél fontosabb volt a hidegháború évtizedeiben.

A légvédelmi rakétaezred alegységei harcfadataik végrehajtásához meghatározott harcrendet foglaltak el, amelynek legfontosabb elemei: harcálláspont, tartalék harcálláspont, légvédelmi rakétaütegek fő-, tartalék- és színlelt álláskörletei, valamint a kiszolgáló szervezetek települési körletei voltak.

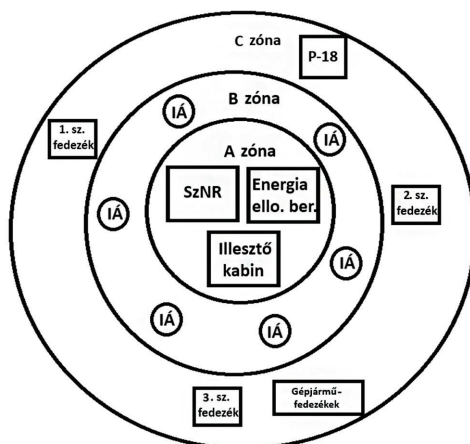
A rakétaosztályok létesítményei többnyire a lakott területektől távol épültek, ahol semmilyen közműszolgáltatás nem állt rendelkezésre. A létesítményeket tehát saját trafóházzal és vízművel (mélyfúrású kutakkal és hidroforházzal) kellett ellátni. Típusúterv alapján épültek meg a kettős kerítéssel körülvett védett objektumok (A és B technikai terület), laktanyák és lakótelepek. Az épületek többnyire félkomfortosak, egy részük kialakítását tekintve kezdetleges volt. Az osztályok tüzelőállása az „A” területen a központi irányítórendszer állásából, 6 db indítóberendezésből, illetve a töltő-szállító járművek nyitott fedezékeiből (3 db) állt.

<sup>8</sup> TÖMBÖL–BÖCZ–JUHANCSIK 2021: 64–65.

<sup>9</sup> Ált/220, 233–235. pont.

<sup>10</sup> NAGY–MEZŐ 2024.

Az Sz–75M3 légvédelmi rakétakomplexummal felszerelt légvédelmi rakétaüteg a harc-feladat végrehajtása érdekében a részére kijelölt álláskörletben az alábbi, 2. ábra szerinti harcrendet foglalta el. A tüzelőállásban A, B és C zónát jelöltek ki.



2. ábra: Az Sz–75M3 légvédelmi rakétakomplexummal felszerelt rakétaüteg harcrendje  
Forrás: TURCSÁNYI–LABANCZ–RÁCZ 1999

Az egymástól 50–80 m távolságra elhelyezett (egy rakétát indító) indítóállványokat hatszög alakban telepítették, középen helyezték el a radarokat és az irányítórendszerek kabinjait. A TZM-pótkocsin tárolt tartalék rakéták elhelyezése is árulkodó volt. A telepítés olyan jellegzetes formát öltött, amelyet a légi fotókon azonnal fel lehetett ismerni (3. ábra).



3. ábra: Az MN 104/2. honi légvédelmi rakétaosztály szabadszállási tüzelőállása 1980-ban  
Forrás: <https://www.fentrol.hu/hu/legifoto/52729?r=1&c=2138841.79215:5924920.534065001:12>

A tüzelőállás építményeit mintegy 3 km hosszúságú, szilárd burkolatú (beton, makadám, aszfalt) úthálózat kötötte össze. A rakétarendszer kabinjait, a harcálláspontot és az indítóállásokat magas földsáncsal vették körül. A katonák védelmét a töltő-szállító gépjárművek fedezékeinek mellvédjébe épített 3 db U elemes, tábori típusú védettséget biztosító szakaszfedezékek jelentették. A „B” technikai területen volt található a betonelemekből épített, és a rakéták tárolására szolgáló, fűthető, szintén földsáncsal védett 7. számú épület. Az „A” és „B” területek létesítményei szovjet tervdokumentációk alapján épültek. Ezek hiányosságai, a magyar szabványoktól való eltérései, valamint az olykor előforduló szélsőséges talajviszonyok miatt az építményeket nem egy esetben lebontották vagy átépítették (4. ábra).<sup>11</sup> A terepviszonyoktól függően, de ahol csak lehetett, a tüzelőállásokat erdős magaslatokon helyezték el. Az álcázást a betonfelületek terepszínű festése és az álcahálók kiterjedt alkalmazása szolgálta (5. ábra).



4. ábra: Az MN 11/1. honi légvédelmi tüzérosztály (MN2124) betonfedezékei az Urak asztalán

Forrás: LÁNCZI 2017: 56



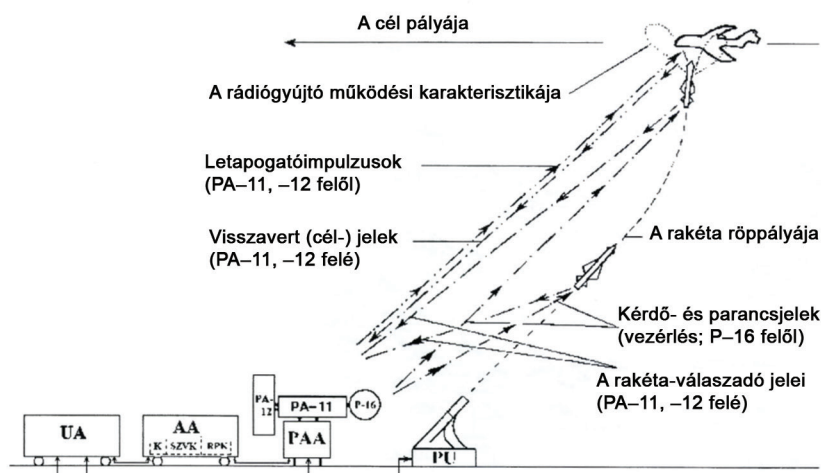
5. ábra: Álcázófestés és álcaháló alkalmazása az Urak asztala hegycsúcson létesült bázison

Forrás: BENEDEK 2014

<sup>11</sup> VERES 2002: 141–143.

## Az SzA–75M Dvina

Az SzA–75M Dvina közepes hatótávolságú légvédelmi rakétarendszer (NATO-kód: SA-2 Guideline, GRAU<sup>12</sup>-kód: 5Ja23) fejlesztése 1953-ban kezdődött Pjotr Dmitrijevics Grusin (1906–1993) akadémikus vezetésével a szovjet Lavocskin tervezőirodánál. A rendszerrel aratott első nyilvános győzelem az 1960. május 1-jén a Francis Gary Powers vezette U–2-es amerikai kémrepülőgép lelövése volt Szverdlovszk térségében. A rendszer ezután világszerte elterjedt, alkalmazta a Varsói Szerződés tagországainak többsége, de például Kína, Észak-Korea, Jugoszlávia és Észak-Vietnám is rendszeresítette (összesen 31 ország).<sup>13</sup>



6. ábra: Az SzA–75M légvédelmi rakétakomplexum működési elve

Forrás: VERES 2000: 8–15

## A rakéta

A Dvina komplexum rakétája a V-750 föld-levegő rakéta volt (изделие 1Д – 1D termék). A közepes hatótávolságú, kétlépcsős, rádióparancs-vezérlésű légvédelmi rakéta a célpontot a harci rész repeszeinek becsapódó hatásával semmisítette meg. A rakétákat a technikai osztályoknál fedezékekben, zárt konténerekben tárolták. A fegyvert TZM PR-11A vagy PR-11B típusú szállító-töltő utánfutón szállították, amelyet egy ZIL-157 típusú nyerges vontató mozgatott.

<sup>12</sup> A GRAU-kód (oroszul: ГРАУ) az orosz védelmi minisztérium egyik főcsoportfőnökségének, a Rakéta és Tüzérségi Eszközök Főcsoportfőnökségének (Главное ракетно-артиллерийское управление МО РФ) a jelölése. A GRAU-kódok a fegyverek és katonai felszerelések azonosítására szolgáltak a Szovjetunióban, és szolgálnak Oroszországban.

<sup>13</sup> BÍMBÓ 1990: 31–69.

A kétfokozatú V-750 típusú rakéta első fokozata a szilárd tüzelőanyagú gyorsítórakéta (твердотопливный ракетный двигатель ПРД – PRD), második fokozata pedig a folyékony tüzelőanyagú hajtóművel (жидкостный ракетный двигатель ЖРД – ZsRD) ellátott utazórész volt. Az 1D V-750 rakétacsalád gyorsítófokozataként a PRD-18 hajtóművet alkalmazták. Fűvókája kritikus keresztmetszetét a környezeti hőmérséklettől függően lehetett állítani a központi test hosszirányú elmozdításával. A hajtómű üzemelési ideje körülbelül 3–5 másodperc volt. Az NMF-2 típusú szilárd hajtóanyagtöltetet a Moszkva közelében található 125. számú kutatóintézetben fejlesztette ki a B. P. Zsukov vezette csapat. A rövid üzemidő érdekében nagy égésfelületet kellett biztosítani a töltet számára, így az 547 kg tömegű hajtóanyag 14 darab, 1800 mm hosszú, 135 mm külső átmérőjű pelletből állt, amelyek 26 mm átmérőjű hengeres, felületnövelő csatornával készültek. A ballisztikus pályán haladó rakéta gyorsítását 3–5 másodpercig az első fokozat biztosította, majd annak leválása után beindult a ZsRD utazóhajtómű, és körülbelül 22 másodpercig működött a második fokozat. Az Isaev–Sevruk S2.711 (S5.711) hajtómű használatához az 1D rakétát három tartállyal kellett felszerelni. Egyet az AK-20K Melanzs oxidálószer (O-anyag), egyet pedig a TG-02 Szamin tüzelőanyag (G-anyag) részére. Az egykamrás, turbószivattyús üzemanyag-befecskendező rendszerrel és 2600 kg maximális tolóerővel rendelkező rakétahajtóművet az OKB-2-ben fejlesztették ki. Az égéstérben centrifugális, kétkomponensű befecskendezőket alkalmaztak az üzemanyag tökéletesebb égése érdekében. A hajtómű izopropil-nitrátot (OT-155, „I” indítófolyadék) használt a turbószivattyú indításához és forgatásához, amely bomlása során forró gázt szabadított fel, ezért volt szükség a fent említett harmadik tartályra is.<sup>14</sup>

Az O-anyag összetétele: 73,1% salétromsav ( $\text{HNO}_3$ ), 17,5–22,5% nitrogén-oxid, dinitrogén-tetroxida számolva ( $\text{N}_2\text{O}_4$ ), 1,00–1,30% orto-foszforsav ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), 0,5–0,7% hidrogén-fluorid (HF), 1,2–2,4% víz, 0,025% mechanikai szennyeződés. A Melanzs (Меланж) 20K-t GOSzt B 26268-84 szabvány szerint gyártották. Szerves anyagokkal és éghető anyagokkal érintkezve meggyulladt, vízzel érintkezve hevesen forrt. A G-anyag összetétele: 48–50% trietil-amin, 48–50% xilidin, 1,6% dietil-amin, 0,5% víz, 0,01% mechanikai szennyeződés. A Szamin összetételét Németországban fejlesztették ki Tonka-250 néven, amely izomer xilidinek és trietil-amin 1 : 1 tömegarányú keveréke. A TG-02 Szamint (TG-02 Топливо ГИПХ-02 Самин) GOSzt 17147-80 szabvány szerint gyártották. A bőrön keresztül is felszívódni képes idegméreg és a rendkívül agresszív oxidálószer-keverék miatt mindkét összetevő csak speciális berendezésekkel és védőöltözetben volt kezelhető. A rakéta hajtóművében nem kellett gyújtást alkalmazni, a reakció a két anyag találkozásakor spontán (öngyulladás) végbement.<sup>15</sup> Az I-anyag összetétele: izopropil-nitrát ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_3$ ), amely egy szintelen folyadék, exoterm módon bomlik külön oxidálószer nélkül, tehát olyan alacsony intenzitású robbanóanyag, amelynek detonációs sebessége körülbelül 5400 m/s.

A második fokozat kiégésekor a rakéta elérte a hangsebesség háromszorosa (Mach 3) körüli sebességet. Az első fokozatra négy nagy stabilizátort (deltaszárny) építettek, amelyek

<sup>14</sup> Ганин et al. 2003: 2–9.

<sup>15</sup> НІВЇСЬКО 2011; Фатина et al. 2017.



a kezdeti, irányítatlan repülési szakaszban stabilizálták a rakéta hossz tengely körüli forgását. A második fokozaton hátul kisebb méretű kormánylapátok, középen nagyobb szárnyak, elöl pedig destabilizátorok helyezkedtek el. A rakéta mozgáskoordinációjáért giroszkóp felelt, a manőverezést pedig 270–350 bar nyomású sűrített levegővel működő, pneumatikus motorokkal oldották meg. A rakétákat 10 cm hullámhosszúságú (A-hullámsávú) rádióadással a három vezérlő rádiócsatorna egyikén vezérelték. Az úgynevezett K1-es és K2-es parancsok az 1–3 és 2–4 kormánylapátokat vezérelték, a K3-as parancs a rádiógyújtót aktiválta. Az SzA–75 irányítórendszere egy időben egy célt volt képes követni, de ugyanarra a célra egyidejűleg három rakéta is indítható volt 6 másodperces időközökkel (6. ábra).<sup>16</sup>

A rakétát jellemzően 195 kg-os, kétdetonátoros, repesz harci résszel szerelték, amelyet közelségi vagy távirányításos gyújtással hoztak működésbe. A két detonátor eltérő élesítése – attól függően, hogy közeledő vagy távolodó volt a cél – később lehetővé tette a modernebb V-755-ös rakétánál (K4-es parancs), hogy a repeszek szórási képe megváltozzon. A megsemmisítési zóna kis magasságon mintegy 65 m átmérőjű gömb, amely nagy magasságban (ritkább levegőben) akár 250 m átmérőjű is lehetett. A cél leküzdésére általában két rakétát indítottak.

A rakéta hatótávolsága 45 km, a radar- és irányítórendszernek köszönhetően az élesítési magasság mintegy 500 m volt, így a rakétát évszaktól, napszaktól és időjárási viszonyoktól függetlenül alacsonyan repülő célok ellen is be lehetett vetni. Ezt a követelményt a háromkabinos komplexumok 2000 m-től 27 ezer m-ig terjedő magasságokon, 5 és 34 km-es ferde távolságok között maximum 520 m/s sebességgel tevékenykedő célok esetén biztosították.

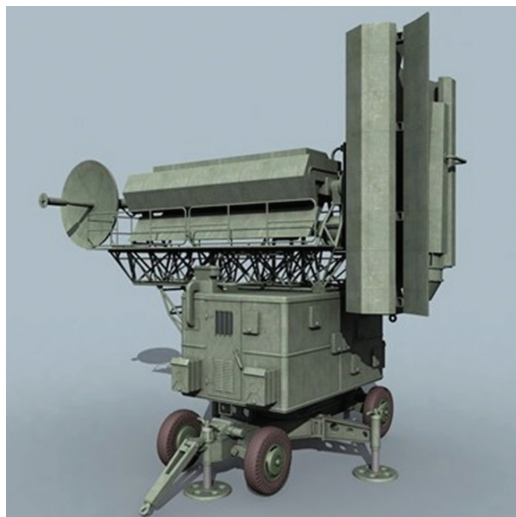
A Dvina-rendszert hatszögalakban telepítették, a PU (*пусковая установка*) rakétaindító állványok hat különböző irányba néztek. Egy indítóállvány méretei menethelyzetben: hossza 10 m, szélessége 2,65 m, magassága 3,75 m, tömege 12,3 t. A hatszög közepén helyezték el a rendszer kabinjait, míg a P-12 célfelderítő radar (GRAU: 1RL14) és a PRV-11 magasságmérő radar (GRAU: 1RL119) a hatszögön kívül kaptak helyet. Minden indítóállványon egy rakéta volt, további hat rakéta a TZM (*транспортно-заряжающая машина*) szállító-rakodó utánfutókon várta az újratöltés parancsát. Egy állvány újratöltése 3–4 percet vett igénybe. A tartalék rakétákat a légvédelmi rakétaezred technikai osztályának raktáraiból szállították a rakétaosztályokhoz a PR-11A (vagy B) típusú speciális szállító-töltő utánfutóval, amelynek hossza 14,62 m.<sup>17</sup>

## A kabinok

Az UA- (*управляющая аппаратура*) vezérlőkabin az osztály harcálláspontja volt, ahonnan a parancsnok irányította az osztály harci munkáját. A kabin hossza 9,5 m, szélessége 2,5 m, magassága 3,49 m, tömege 11 t. Az AA-műszerkabinban helyezték el többek között a céljel- és rakétajel-követő rendszert, a parancskidolgozó SzVK (*система выработки команд*) analóg számítógépet és a rádióparancs-közlő RPK (*радиопередатчик команд*) berendezéseket. A kabin hossza 9,5 m, szélessége 2,5 m, magassága 3,49 m, tömege 14 t.

<sup>16</sup> KHL/33.

<sup>17</sup> VERES 2000: 8–15.



7. ábra: SzNR-75 rakétaravezető állomás makettje

Forrás: <https://www.turbosquid.com/3d-models/fan-song-a-502786>

A PAA-kabinban (RSzNA–75M) helyezkedett el a cm-es hullámtartományú lokátorrendszer adó-vevő része és a kabinra szerelt antennák (PA-11 jelű, 10 cm-es hullámhosszú  $\beta$  szélessávú oldalszögantenna, PA-12 jelű, 10 cm-es hullámhosszú  $\epsilon$  szélessávú helyszögantenna és a P-16 jelű, dm-es hullámhosszú, rádió-parancsközlő antenna). Telepített helyzetben a kabin a löveg talpon elfordulhatott (a forgás átmérője 10 m). Menethelyzetben a kabin hossza 6,7 m, szélessége 2,35 m, magassága 3,5 m, tömege 11,81 t. Az antenna legmagasabb pontjának a földtől mért magassága 7,95 m.

Az elektromos energia átalakítása 400 Hz-re és elosztása az RMA kabinban történt. (A 3 db DESz-100 aggregátort 1-1 kabinban helyezték el.)<sup>18</sup>

## PRV–11 magasságmérő radar

A PRV–11 magasságmérő radar (GRAU: 1RL119) (ПРВ-11 Помехозащищенного Радиовысотомера „Вершина”) biztosította a célok észlelését 230 km-es távolságban közepes és nagy magasságban (34 km-ig), valamint 60 km-es távolságban kis magasságban (0,5 km) 0,5–30° közötti magassági szektorban. A passzív interferencia elleni védelmet koherens kompenzációjú SDC-rendszerrel végezték (dupla interferencia frekvenciaszabályozással a potencioszkópokon). A berendezést három kabinban helyezték el. Az adó-vevő kabinra szerelt parabolaantennát egy magaslatra állított KZU-16 típusú forgó állványra helyezték.<sup>19</sup>

<sup>18</sup> VERES 2000: 8–15.

<sup>19</sup> Петухов–Шестов 1999.



1. táblázat: A PRV–11 magasságmérő radar és a P-12 célfelderítő radar főbb műszaki jellemzői

| Jellemzők                          | PRV–11           | P-12              |
|------------------------------------|------------------|-------------------|
| Frekvencia                         | 2,7 GHz          | 150–170 MHz       |
| Impulzusismétlési idő (PRT)        | 3 és 1,3 ms      | 2,77 ms           |
| Impulzusismétlési frekvencia (PRF) | 330 és 730 Hz    | 345 Hz $\pm 10\%$ |
| Impulzusszélesség ( $\tau$ )       | 3 és 1,5 $\mu$ s | 6 $\mu$ s         |
| Csúcsteljesítmény                  | 1,2 MW           | 160–250 kW        |
| Átlagos teljesítmény               | 1,3 kW           | 540 W             |
| Hatótávolság                       | 400 km           | 200–250 km        |
| Nyalábszélesség (azimut)           | 2°               | 8°                |
| Nyalábszélesség (magasság)         | 1,2°             | –                 |

Forrás: a szerző szerkesztése Петухов–шестов 1999 és a [radartutorial.eu](http://radartutorial.eu) adatai alapján

## A P-12 célfelderítő radar

A P-12 (GRAU: 1RL14) célfelderítő, gyors telepítésű, VHF-sávú radarcsalád. A gépjárműre telepített nagy hatótávolságú, méteres tartományú korai figyelmeztető radar 1958 óta állt szolgálatban, számos variációban (M, MA, MP, NP, NA, NM). A P-12 radar számos zavaróberendezéssel (többcsatornás digitális információs rendszerrel és frekvenciahangoló berendezéssel) és egy földi radarlekérdező eszközzel rendelkezett. Az állomás csatolóberendezés segítségével szinkronizálható volt egy másik radarral, és így mindkét radar visszhangját megjeleníthette. Az állomás hatékony zavarvédelmi rendszerrel rendelkezett, az interferenciavédelmi rendszert közeli és távoli tartományban másképp lehetett konfigurálni.<sup>20</sup> A PRV–11 magasságmérő és a P-12 célfelderítő radar főbb műszaki jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

## Az újabb átfegyverzés időszaka

A Volhov rakétakomplexumokat 1978-ban rendszeresítették a Magyar Néphadsereg honi légvédelmi rakétacsapatainál a Dvina-rendszerek leváltására. Az átfegyverzést először a 11. légvédelmi rakétadandár 1., 2., 3. és 4. osztályai hajtották végre, a teljes folyamat 1982-ig tartott. Az új komplexum telepítését és beüzemelését az ezred technikai üzemeltető szolgálat (TÜSZ) főtechnikusai és a Szovjetunióból érkezett rakétamérnökök segítették, majd a komplexumműködést egy évig (garanciális időszak alatt) felügyelték. Az első rakéta-éleslövészetre 1979-ben került sor a Szovjetunióban, az Asztrahánnyal közeli fekvő asuluki lőtérén. A rakétakomplexumok egészen 2001-ig, a Magyar Honvédség 11. Duna vegyes légvédelmi rakétaezred megszüntetéséig álltak szolgálatban.

A Dvina-rendszer magyarországi elhelyezkedéséhez képest 1978 után az alábbi szervezeti és diszlokációs változtatások történtek.

A 11. ezred dandárrá alakult, harcálláspontja Érden, tartalék harcálláspontja Vértesacsán települt. A Budapest körüli tűzrendszer osztályai Pilisszentlászlón (laktanyája Szentendrén), Pilisszentkereszten, Zsámbékon és Etyeken (laktanyája Vértesacsán) települtek. A pesti oldalon

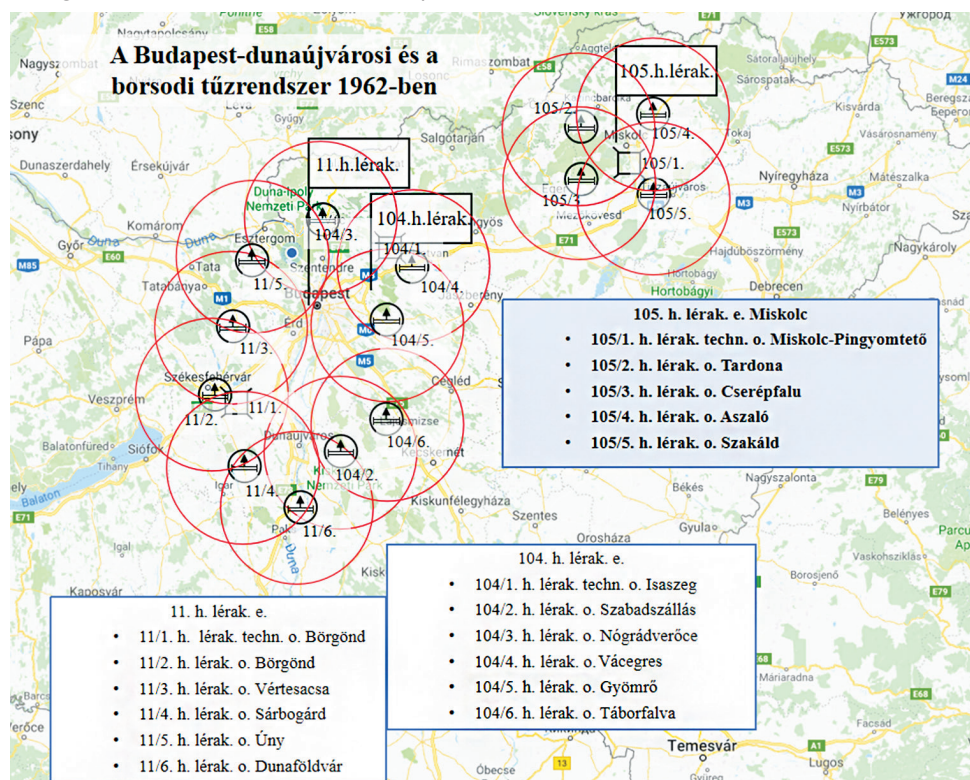
<sup>20</sup> Петухов–шестов 1999.

a két Volhov-osztály Felsőpakonyban (laktanyája Gyálon) és Fóton (laktanyája Vácegresen) települt. Hadrendi számaik 1., 2., 3., 4., 7. és 8. voltak. A Budapest körüli gyűrűt alkotó hat Nyeva-osztály (Sz-125) sorszámaikat 9-től 14-ig osztották ki, a két technikai osztály 15-ös és 16-os sorszámmal Börgöndön, illetve Gyömrőn települt. Az 5. és 6. osztályok sorszámai az Sz–300PMU osztályoké lettek volna, de ezeket nem szerezték be.

Dunaújvárost és Paksot a 104. Légvédelmi Rakétaezred (MN 3011) védte, amelynek harcálláspontja Sárbogárdon, tartalék harcálláspontja Dunaföldváron volt, osztályai pedig Sárbogárdon, Szabadszálláson és Dunaföldváron települtek. A technikai osztály szintén Sárbogárdon kapott helyet.

Miskolcot és a borsodi iparvidéket a 105. Légvédelmi Rakétaezred (MN 4105) védte. Harcálláspontja Lillafüreden, tartalék harcálláspontja Szakáldon volt, míg az osztályok Tardonán, Cserépfaluban és Szakáldon, a technikai osztály Pingymtetőn települt.

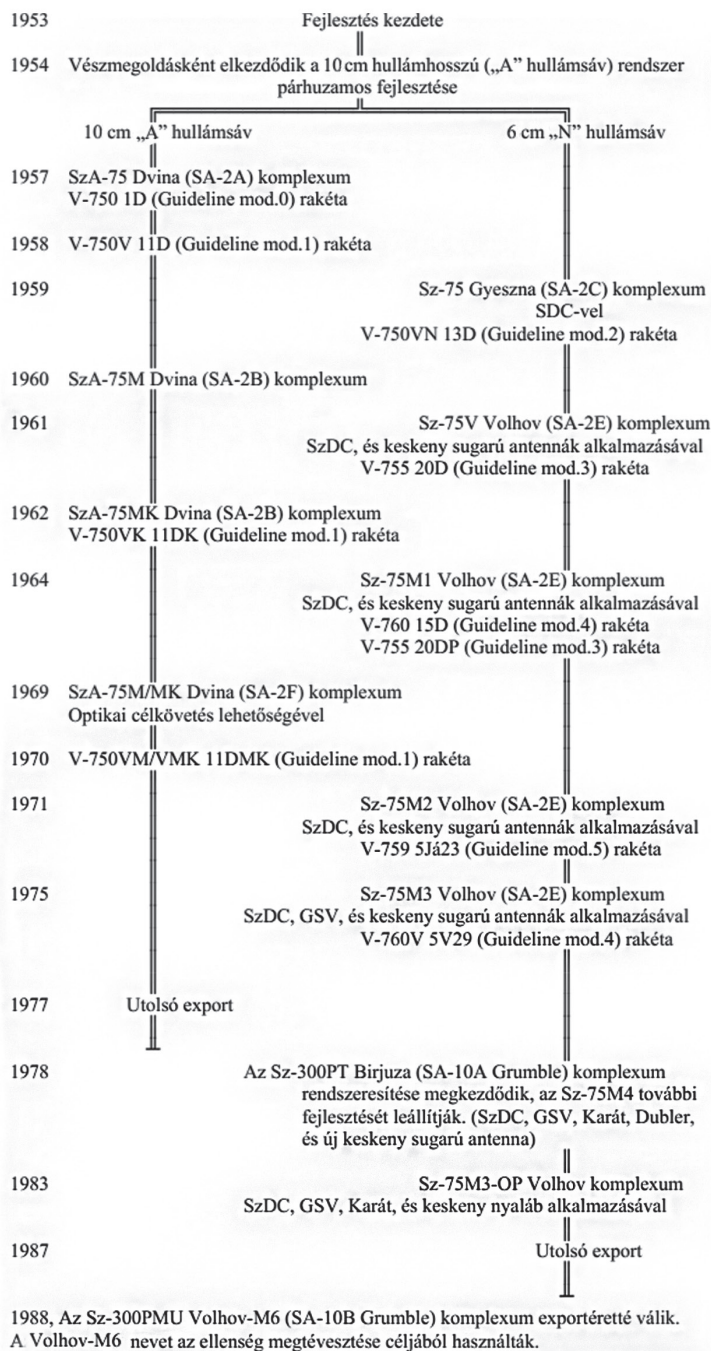
A fejlesztések során a katonai vezetés törekedett a Dvina-rendszer számára kiépített infrastruktúrát hasznosítani. A 105. ezred vezetési pontjai nem változtak. A 104. ezrednél a meglévő tüzelőállások közelében telepítették azokat.<sup>21</sup>



8. ábra: A Budapest-dunaújvárosi és borsodi tűzrendszer elemei 1962-ben

Forrás: a szerző gyűjteményéből

<sup>21</sup> VERES 2002; TURCSÁNYI–LABANCZ–RÁCZ 1999: 72–84.



9. ábra: Az SzA–75 és Sz–75 komplexumok fejlesztésének idővonala

Forrás: a szerző gyűjteményéből

A P-12-es lokátort nagyobb hatótávolságú P-18 típusú lokátor váltotta. A rakéták hajtóanyag-gal való feltöltéséhez pedig új töltőállomást és speciális töltőkocsikat telepítettek. A gépjárműtechnikai eszközöket is modernizálták, a régi „csőrös” ZIL-157-es nyerges vontatókat ZIL-131-es nyerges vontatók váltották fel, a CS-705-ös rakétaszállító vontatókat RÁBA típusú nyerges szállító gépjárművekre, a TATRA vontatókat pedig KRAZ-255 típusúakra cserélték.

A Dvina-rendszer továbbfejlesztett változatai az Sz-75 Gyeszna, Sz-75V/M1/M2/M3 Volhov rakétarendszerek voltak, amelyek harcászati-technikai jellemzői jobbakként, rendelkeztek zavarászó berendezéssel és idegen-barát felismerőrendszerrel. Felépítésük és működésük azonban hasonló volt, mint a Dvina-komplexumé (9. ábra). A rakétákat 295 kg-os robbanófejjel szerelték, amely lehetett hagyományos, illetve 15 kilotonnás nukleáris robbanófej<sup>22</sup> is. A fejlesztések eredményeként a rendszer passzív hatótávolsága 56 km-re, a maximálisan elérhető magasság 35 km-re nőtt. A légi célokat 100 m-től 30 ezer m-ig terjedő magasságokon volt képes megsemmisíteni 7 és 43 (a rakéta repülésének passzív szakaszán 55) km ferde távolságok között, és akár földfelszíni vagy vízfelszíni célok ellen is bevethető volt maximum 1000 m/s-os célrepülési sebességig.<sup>23</sup>

## Az Sz-75M Volhov

Az Sz-75M Volhov közepes hatótávolságú légvédelmi rakétarendszer (NATO-kód: SA-2E Guideline) a Dvina-rendszer továbbfejlesztett változatának tekinthető. Légvédelmi rakéta-osztályonként három javadalmazás, azaz 36 darab V-755 rakétát rendszeresítettek, amely hasonló volt a Dvina-rendszer V-750-es rakétájához, de korszerűbb hajtóművel és harci fejjel látták el. Az indítórendszer továbbra is három tűzcsoporthoz állt, hat indítóállvánnyal, valamint rakéta-előkészítő és szerelő-töltő csoporttal. A Volhov-komplexummal felszerelt osztályok rendszeresített állománya 13 tiszt, 21 tiszthelyettes, 217 sorállományú katona és két fő polgári alkalmazott volt. A típuscsalád a magyar légvédelemnél 1978 és 2001 között állt szolgálatban. A rakéta szállítását TZM PR-11B típusú szállító-töltő utánfutóval és ZIL-131 nyerges vontatóval végezték. A komplexum részei: SzNR-75 (*Станция наведения ракеты*) rakétarávezető állomás (UV-kabin, ahonnan a parancsnok a komplexum harctevékenységét irányította; AV-műszerkabin cél- és koordináta-meghatározó berendezéssel, parancskidolgozó és parancsközlő berendezéssel; PV adó-vevő kabin PA-11 oldalszög- és PA-12 helyszögantennával); PU-indítóállvány (SzM-90).<sup>24</sup>

<sup>22</sup> A nukleáris robbanófejjel felszerelt légvédelmi rakéták a hidegháború korának sajátos eszközei voltak, amelyeket arra terveztek, hogy nagy magasságban és nagy hatótávolságon semmisítsenek meg ellenséges bombázókötevényeket vagy ballisztikus rakétákat. A nukleáris robbanás sugárzása és lökéshulláma miatt a célzás pontossága kevésbé számított, mint a hagyományos, repeszromboló tölteteknél.

<sup>23</sup> VERES 2000; TURCSÁNYI-LABANCS-RÁCS 1999: 72–84.

<sup>24</sup> TURCSÁNYI-LABANCS-RÁCS 1999: 72–84.

## Az RSzN-75 tűzvezető radar

Az RSzN-75 (GRAU-kód: 1Sh11) tűzvezető radarrendszer (*Радиолокационную станцию сопровождения и наведения PCH-75B*) elnevezése RSzN és SzNR formában is megtalálható.<sup>25</sup> A leginkább szembetűnő eltérés a Volhov- és a Dvina-rendszer között az eltérő tűzvezető radar és a célfelderítő radarok, hiszen a P-12 helyébe a P-18 típus lépett (2. táblázat). Az RSzN-75 tűzvezető radar két további parabolaantennát kapott, amelyek 6 cm-es hullámhosszon 1000 kW impulzus csúcsteljesítménnyel üzemeltek. A vízszintes Lewis-szkenner tetején elhelyezett antennák közül az egyik függőlegesen, a másik vízszintesen polarizált (10. ábra). A rakétákat 6 cm hullámhosszúságú (N-hullámsávú) rádióadással vezérelték. További fontos fejlesztés volt, hogy a radarimpulzus csúcsteljesítménye 600 kW-ról 1 MW-ra nőtt. A nyalábok körülbelül 7,5° szélesek voltak legyezőirányban és 1,5° pásztázási irányban. A szűkebb nyalábnak és nagyobb kisugárzott teljesítménynek köszönhetően a radar felderítési képessége 33%-kal nőtt a Dvinához képest. Ez tette lehetővé a nagy sebességű célok nagyobb távolságon történő felderítését.



10. ábra: A „Fan Song E” NATO-kódú, G-sávú tűzvezető radarállomás a lengyel Haditechnikai Múzeumban (Muzeum Polskiej Techniki Wojskowej w Warszawie)

Forrás: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sadyba31\\_DSC0712.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sadyba31_DSC0712.JPG)

<sup>25</sup> Internet Archive [é. n.].



A tűzvezető radar fő elemei: P-12V széles sugarú, helyszög- ( $\epsilon$ -epszilon) antenna; P-11V széles sugarú, oldalszög- ( $\beta$ -béta) antenna; P-16 dm-es hullámhosszú rádió-parancsközlő antenna a rakéták távirányítására; P-14V keskeny sugarú, helyszög- ( $\epsilon$ -epszilon) antenna; P-13V keskeny sugarú, oldalszög ( $\beta$ -béta) antenna.

A két új parabolaantenna újfajta célfelderítést és célkövetést tett lehetővé, az úgynevezett „Keskeny nyaláb” módot. A Volhov továbbra is képes volt a szélesnyalábú célkövetésre, ahogy a Dvina is, csak a kisugárzás és a letapogatás az új üzemmódban kisebb térrészben történt. A fejlesztések következtében a tűzvezető radar egy további, új üzemmóddal, az „Alávilágítás” móddal is rendelkezett.<sup>26</sup>

2. táblázat: P-18 „Spoon Rest D” NATO-kódú (GRAU-kód: 1RL131) Tepek, VHF-sávban működő, korai előrejelző, célfelderítő radar főbb műszaki jellemzői

| Jellemzők                          | P-18        |
|------------------------------------|-------------|
| Frekvencia                         | 150–170 MHz |
| Impulzusismétlési idő (PRT)        | 2,77 ms     |
| Impulzusismétlési frekvencia (PRF) | 360 Hz      |
| Impulzusszélesség ( $\tau$ )       | 6 $\mu$ s   |
| Csúcs teljesítmény                 | 160–260 kW  |
| Átlagos teljesítmény               | 540 W       |
| Hatótávolság                       | 360 km      |
| Nyalábszélesség (azimut)           | 6°          |
| Nyalábszélesség (magasság)         | –           |

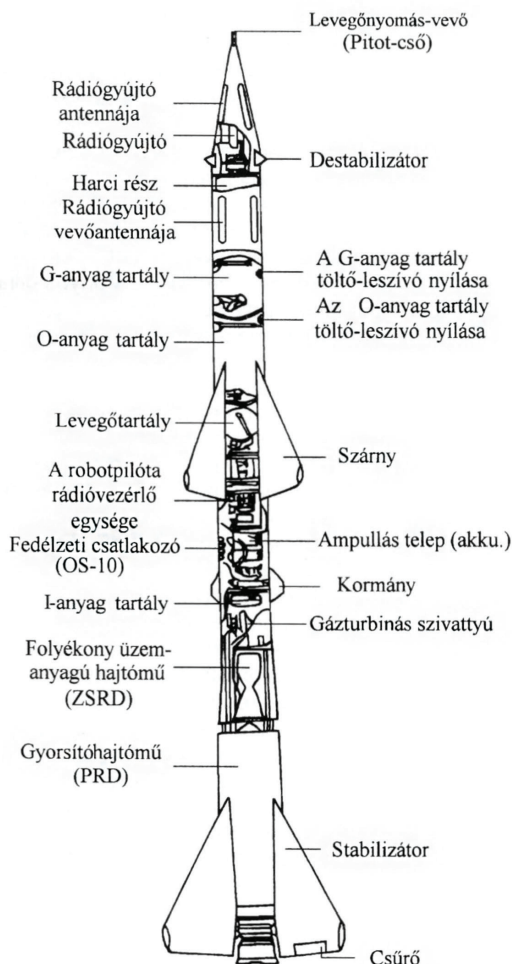
Forrás: a szerző szerkesztése

## A rakéták

A Volhov-rendszer az Sz–75 Gyesznához és az SzA–75 Dvinához nagymértékben hasonló rakétaváltozatokkal rendelkezett. A legfőbb eltérés, hogy a rakéta válaszeladó 6 cm hullámhosszon üzemelt 10 cm helyett. A Volhov-sorozat több évtizedes szolgálata alatt azok rakétáit többször is korszerűsítették, hasonlóan a Dvináéhoz. Három fő rakétageneráció különböztethető meg.

Az első generációt a V-750VN 13D képviseli, amely kétperces felkészítési idővel rendelkezett és 30 percig volt felkészített állapotban tartható. A maximális megsemmisítési távolság 34 km, a minimális 5 km, míg a minimális magasság 3 km, a maximális 27 km volt. Ez a változat még nem rendelkezett a nagyobb és változtatható tolóerejű hajtóművel (11. ábra).

<sup>26</sup> A két üzemmód részletes leírása megtalálható: Militavia 2021.



11. ábra: A V-750V típusú rakéta szerkezeti felépítése

Forrás: VERES 2000: 8–15

A második generációt a V-755 20D rakétacsalád képviselte, amelynek szintén számtalan továbbfejlesztett alváltozata volt. A rakéta 43 km távolsáig volt már hatásos, a minimális megsemmisítési magasság 300 m-re csökkent, ezt új, jobb közelségi gyújtó használatával érték el. A típuscsaládba tartozott a V-755A 20DA, a V-755P 20DP és a V-755Sz 20DSz változat is. A V-755SzU 20DSzU továbbfejlesztett giroszkópot kapott. Ennek felpörgetési ideje 2 percről 30 másodperce csökkent, de emiatt a rakétát 25 perc helyett csak 5 percig lehetett felkészített állapotban tartani a túlmelegedés miatt. A V-755U 20DU változat a család valamennyi fejlesztését tartalmazta, kivéve az 5E11 közelségi gyújtót, ami miatt a minimális megsemmisítési magasság 300 m-re volt korlátozva. Repülési sebesség: 1050 m/s. A megsemmisítési valószínűség 3 (2) rakétával: 0,99 (12. ábra).





12. ábra: Az Sz–75 légvédelmi rakétarendszer V-755 típusú rakétája és indítóállványa

Forrás: Varga Attila felvétele

A V-759 23D 5Já23 képviselte a rakéták harmadik generációját, amely teljesen új tervezésű rakéta volt. Elődei összes képességével rendelkezett, sőt, a rakéta manőverező képességét tovább növelték. 10 km magasság alatt a korábbi rakéták 6,5 g gyorsuláértékével szemben képes volt 9 g túlterhelésű fordulók végrehajtására is. A rakéták eltérő fizikai paramétereik miatt a komplexum vezérlésében is történtek módosítások, így lehetőség nyílt egy adott célra különböző típusú rakéták egy sorozatban történő indítására is. A V-750 és V-755 család 196 kg tömegű harci részében 8200 repeszt helyeztek el, míg a V-759 típus 201 kg-os harci részében már 29 ezer db, de kisebb méretű repesz volt.

## A hazai rendszerek múltja és jövője

Magyarországra 1978-ban érkezett az első 4 db Sz–75M2 Volhov-komplexum és 133 db V-755DSzU 20DSzU rakéta, majd ezeket 1980-ban további 32 db követte. 1982-ben 2 db Sz–75M3 Volhov-komplexum érkezett Karát kamera és a GSV-áramkör nélkül, valamint 116 db V-755DSzU rakéta. Az 1983-ban érkezett 3 db Sz–75M3 Volhov-komplexum már Karát kamerával is rendelkezett, de GSV-áramkörökkel nem. Az új komplexumokhoz 90 db V-759 rakéta érkezett. 1984-ben érkezett az utolsó 3 db Sz–75M3 Volhov-komplexum Karáttal és GSV-vel, illetve további 142 db V-759 rakéta beszerzése történt meg. Ezeket a Miskolc védelmét ellátó gyűrű mentén telepítették. 1984–85-ben a Budapest körüli védelmi gyűrűt alkotó 6 db M2/M3 változatú osztályok az időszakos középjavításon megkapták a Karát kamerát és a GSV-áramköröket is. Az utolsó rakétabeszerzés 1986-ban történt, 24 db V-759 típusú rakéta formájában. A hidegháború végén megszűnt a Varsói Szerződés, a korábbi tagországok fegyverzetcsökkentésbe kezdtek. A légvédelmi rakétafegyvernem 1990–2000 közötti időszaka idején először megszűnt a 105., majd a 104. ezred, csak a Budapest körüli gyűrű maradt aktív,

kivéve a sárbogárdi Volhov-osztályt. 1995-ben az osztályokat kiléptették a készletügyi szolgálatból. Bár a komplexumok továbbra is hadrendben voltak, a tüzelőállásokból tartós tárolásba kerültek, végül kivonták őket a rendszerből. 2000-ben a 11. Duna Légvédelmi Rakétaezredet is felszámolták, így a honi légvédelem, a nagy és közepes hatótávolságú, önálló nemzeti oltalmazási képesség megszűnt (13. ábra). Az 1990-es évek közepétől a csapatlégvédelmet és a pontszerű objektumok védelmét a KUB- és a MISTRAL-rendszerek látták el. Az 1999-es NATO-csatlakozással lehetővé vált, hogy hazánk is része legyen a NATO Integrált Lég- és Rakétavédelmi Rendszerének (NATO Integrated Air Defense System, NATINADS). A Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretében a földi telepítésű légvédelem korszerű, kis- és közepes hatótávolságú aktív tűzeszközöket kapott. A beszerzésre vonatkozó szerződést 2020. november 30-án írták alá, a rendszerbe állítás 2023-ban megkezdődött. Az új rakétarendszer a norvég Kongsberg Defence & Aerospace és az USA Raytheon Technologies által közösen fejlesztett NASAMS (National Advanced Surface to Air Missile System – Nemzeti Fejlett Felszín-Levegő Rakétarendszer). Ezzel a nemzeti légvédelem a 21. század szintjén építheti újjá a korábban elvesztett nagy magasságú és közepes hatótávolságú oltalmazási képességét.<sup>27</sup>



13. ábra: V-750V közepes hatótávolságú légvédelmi rakéta TSzSzT szállító targoncán a szolnoki RepTárban  
Forrás: a szerző felvétele

## Összefoglalás

A szerző az egykori légvédelmi rakétás katonák által Cserépfaluban felállítani kívánt emlékmű létesítése során került kapcsolatba az SzA–75M Dvina és Sz–75M Volhov közepes hatótávolságú légvédelmi rakétakomplexumokkal. Bár ezek az eszközök (és azok típusváltozatai) három évtizeden át meghatározó fegyverek voltak a honi légvédelem és a Varsói Szerződés tagállamainak kezében, azokról – államtitok minősítésük miatt – viszonylag kevés nyílt szakirodalmi forrás áll rendelkezésre. A rendelkezésre álló szakanyagok és visszaemlékezések egybevetésével a szerző a két típuscsalád telepítésének, eszközeinek és rakétáinak általános bemutatására

<sup>27</sup> TÖMBÖL–JUHANCSIK 2021: 40–45.

vállalkozott. Az eszközök ismertetése során szándékosan nem tért ki a harceljárásokra és azok technikai hátterére, a harcvezetés rendszerére és összefüggéseire.

Az emlékmű végül kompromisszumos megoldással, az anyagi erőforrások és a lehetőségek figyelembevételével valósult meg. A szerző segítségével időjárás- és UV-álló, PVC-re kasírozott óriásplakát készült, amely fémkeretbe helyezett fatáblára került a korábbi márványtábla közelében (1. ábra). Az emlékmű avatására 2024. május 18-án került sor Zopcsák László ny. ezredes, egykori parancsnok és nagyszámú érdeklődő – korábban Cserépfaluban szolgáló hivatásos és sorkatona, valamint polgári alkalmazott – jelenlétében.

## Felhasznált irodalom

- Ált/220 A Magyar Népköztársaság Fegyveres Erőinek Szolgálati szabályzata (1987). Honvédelmi Minisztérium.
- BIMBÓ József (1990): *Légvédelem korunk háborúiban*. Budapest: Zrínyi Katonai Könyv- és Lapkiadó.
- BENEDEK Levente (2014): MN2124, 11/1. honi légvédelmi rakétaosztály, Urak-Asztala. *Benedek Levente fotó és utazó blog*, 2014. február 19. Online: [https://kameraaltal.blog.hu/2014/02/19/mn2124\\_11\\_1\\_honi\\_legvedelmi\\_raketaosztaly\\_urak-asztala](https://kameraaltal.blog.hu/2014/02/19/mn2124_11_1_honi_legvedelmi_raketaosztaly_urak-asztala)
- ФАТИНА, А. А. – ЛЕБЕДЕВ, В. Н. – КИСЕЛЕВ, А. П. – МАСЛОБОВ, Д. С. (2017): *Работа с опасными веществами и компонентами ракетного топлива*. Практическое пособие Санкт-Петербурга: УДК. Online: <https://n9.cl/0e862>
- ГАНИН, С. – КОРОВИН, В. – КАРПЕНКО, А. – АНГЕЛЬСКИЙ, Р. (2003): Система-75. *Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра (Москва)*, № 03. 16–22., № 04.
- HIVÁCSKÓ Ferenc (2011): Fogalmak, definíciók, rövidítések, források. Budapest légvédelme anno [Hozzászólások]. *AZso.net*, 2011. január 19. Online: <https://azso.net/budapest-legvedelme-anno/fogalmak-definiciok-roviditesek-forrasok/>
- Internet Archive [é. n.]: 'Fan Song' Missile Control Radars (Russian Federation), Battlefield, Missile Control and Ground Surveillance Radar Systems. Online: <https://web.archive.org/web/20110815051824/http://articles.janes.com/articles/Janes-Radar-and-Electronic-Warfare-Systems/Fan-Song-missile-control-radars-Russian-Federation.html>
- KHL/33 Szakutasítás az SZ-75 és SZ-75M3 VOLHOV-3 technikai osztály harci munkájára (1987). Honvédelmi Minisztérium.
- LÁNCZI Péter (2017): Rakéták a Pilisben. *Turista Magazin*, (6), 54–65.
- Militavia (2021): Sz-75M Volhov (SA-2E Guideline). *Militavia*, 2021. október 9. Online: [https://militavia.blog.hu/2021/10/09/sz-75m\\_volhov\\_sa-2e\\_guideline](https://militavia.blog.hu/2021/10/09/sz-75m_volhov_sa-2e_guideline)
- NAGY László – MEZŐ László szerk. (2024): *Honi légvédelem Miskolcon és környékén 1. (1951–1990)*. Miskolc: Budai Nyomda Kft.
- PALIK Mátyás Csaba (2011): Vadászpilóta gépek automatizált rávezetése VOZDUH-1M rendszerben I. rész. *Repüléstudományi Közlemények*, 23(3). Online: [https://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2011\\_3/Palik\\_M-Cs\\_Vozduh\\_1.pdf](https://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2011_3/Palik_M-Cs_Vozduh_1.pdf)
- ПЕТУХОВ, С. – ШЕСТОВ, И. (1999): *История создания и развития вооружения и военной техники ПВО сухопутных войск России*. [h. n.]: ВПК. Online: <https://kpov.ru/books/petuhov-shes-tov.htm>
- TÖMBÖL László – BÖCZ Lajos L. – JUHANCSIK János (2021): A földi telepítésű légvédelem új vezetési rendszere. *Haditechnika*, 55(3). Online: <https://doi.org/10.23713/HT.55.3.11>
- TÖMBÖL László – JUHANCSIK János (2021): *NASAMS – Légvédelem a XXI. században*. [h. n.]: HM Zrínyi Kiadó.

- TURCSÁNYI Károly – LABANCZ Sándor – RÁCZ János (1999): A haditechnikai biztosítás meghatározó tényezői a vegyes légvédelmi rakétaezrednél. *Katonai Logisztika*, 7(2), 72–84. Online: [https://epa.oszk.hu/02700/02735/00029/pdf/EPA02735\\_katonai\\_logisztika\\_1999\\_2\\_072-084.pdf](https://epa.oszk.hu/02700/02735/00029/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_1999_2_072-084.pdf)
- VERES Mihály (2000): Légvédelmi rakétafegyverek légterünk védelmében. *Haditechnika*, 34(3), 8–15.
- VERES Mihály (2002): *Légvédelmi tüzei és rakétások*. Veszprém: Szerzői magánkiadás.

Horváth Krisztián<sup>1</sup> 

# Vízi és víz alatti járművek csatolt vibroakusztikai modellezése

A víz alatti kisugárzott zaj fizikai alapjai, multifizikai predikciója és validációs kérdései

## Coupled Vibroacoustic Modelling of Surface and Underwater Vehicles

Physical Foundations, Multiphysics Prediction, and Validation Aspects of Underwater Radiated Noise

A víz alatti kisugárzott zaj (underwater radiated noise, URN) predikciója a haditechnikai alkalmazásokban és a tengeri környezet védelmében egyaránt stratégiai jelentőségű. A szakirodalom és a szabványosítási gyakorlat alapján az URN nem értelmezhető pusztán hidrodinamikai jelenségként: a gerjesztések, a szerkezeti rezgések és a vízterhelés csatolt vibroakusztikai multifizikai (multiphysics) rendszerként határozzák meg a távoli térben mérhető hangnyomásszintet. Az áttekintés a víz alatti hangterjedés releváns fizikai alapjait, az URN fő forrásmechanizmusait (propellerkavitáció, szerkezet által terjesztett zaj, áramlás okozta zaj), a csatolt modellezési módszereket (strukturális végeselemes modell, folyadék–szerkezet kölcsönhatás, CFD-alapú áramlásmodellezés, akusztikai analógia, FEM–BEM csatolás), továbbá a prediktív modellek hierarchiáját és a számítási költség–pontosság kompromisszumait tárgyalja. Központi elemként részletesen bemutatok egy, URN-predikcióra alkalmas vibroakusztikai multifizikai munkafolyamatot (workflow), valamint a validáció és a tengeri mérések bizonytalanságait az ISO 17208 szabványsorozat kontextusában.

**Kulcsszavak:** víz alatti kisugárzott zaj, vibroakusztika, multifizika, folyadék–szerkezet kölcsönhatás, propellerkavitáció, ISO 17208, hidrofon, validáció

<sup>1</sup> Széchenyi István Egyetem Audi Hungária Járműmérnöki Kar Járműfejlesztési Tanszék, e-mail: [horvath.krisztian@sze.hu](mailto:horvath.krisztian@sze.hu)

*The prediction of underwater radiated noise (URN) is of strategic importance both in military applications and in the protection of the marine environment. Based on the scientific literature and current standardisation practice, URN cannot be interpreted as a purely hydrodynamic phenomenon. Instead, excitation mechanisms, structural vibrations, and hydrodynamic loading jointly determine the far-field sound pressure level through a coupled vibroacoustic multiphysics system. This review discusses the relevant physical foundations of underwater sound propagation, the principal source mechanisms of URN (propeller cavitation, structure-borne noise, and flow-induced noise), and the associated coupled modelling approaches, including structural finite element modelling, fluid–structure interaction, CFD-based flow modelling, acoustic analogy methods, and FEM–BEM coupling. Furthermore, the hierarchy of predictive models and the trade-off between computational cost and predictive accuracy are examined. As a central element, a detailed vibroacoustic multiphysics workflow suitable for URN prediction is presented, together with a discussion of validation strategies and the uncertainties of sea trial measurements in the context of the ISO 17208 standard series.*

**Keywords:** *underwater radiated noise, vibroacoustics, multiphysics, fluid–structure interaction, propeller cavitation, ISO 17208, hydrophone, validation*

## Bevezetés

A vízi és víz alatti járművek által keltett víz alatti kisugárzott zaj olyan összetett fizikai „akusztikai aláírás”, amely egyszerre függ a hajtás- és segédberendezések dinamikus gerjesztéseitől, a szerkezetek rezgésátvitelétől és sugárzásától, valamint a vízközeg hangterjedési sajátosságaitól. A tengeri platform zajkibocsátásának gyakorlati leírása ezért eleve több, egymástól eltérő fizikai forráscsaládot választ szét (gépegységek, hajtómű/propulzor, áramlási jelenségek), és a katonai szakirodalomban is ez a hármas felosztás jelenik meg a passzív akusztikai *signature* elemzésének kiindulópontjaként.<sup>2</sup> A szabványok és iparági iránymutatások már definíciószinten rögzítik, hogy a víz alatti zaj nem kizárólag a propeller és a hajótest körüli áramlás „hidrodinamikai mellékterméke”. Például a hajók víz alatti kisugárzott zaját tárgyaló irányelvek a sugárzott zajt azokra az akusztikai energiakomponensekre vezetik vissza, amelyek a fedélzeti gépek rezgésein keresztül a hajótest–víz határfelületre jutnak, továbbá a csővezetékek és kapcsolódó rendszerek folyadékoldali gerjesztéseire és a hajótest hidrodinamikai zajára.<sup>3</sup>

A modern URN-predikációs feladat ennek megfelelően csatolt vibroakusztikai multifizikai problémaként írható le. A csatolás kétirányú: a szerkezet rezgései akusztikai nyomásmezőt gerjesztenek a vízben, miközben a vízterhelés (hozzáadott tömeg, sugárzási csillapítás, impedanciahatások) visszahat a szerkezeti dinamikára. A fluidumterhelés ilyen jellegű mechanizmusait már a klasszikus rezgés–akusztika irodalom is a „virtuális tömeg” és a sugárzási csillapítás ekvivalenciájával értelmezi, és kimutatja, hogy a hatás erősen frekvenciafüggő:

<sup>2</sup> MOORE 2019.

<sup>3</sup> Indian Register of Shipping 2025.

alacsonyabb frekvenciákon dominánsan tömegterhelésként, magasabb frekvenciákon inkább csillapító jelleggel jelenik meg.<sup>4</sup>

A bevezető tézis így a következőképpen fogalmazható meg: az URN predikciója nem garantálható pusztán a CFD-alapú áramlásszimuláció „felfelé skálázásával”, mert a hajó vagy víz alatti jármű zajkibocsátása alapvetően a gerjesztések–szerkezeti dinamika–akusztikai sugárzás–hangterjedés láncolatában áll elő. E tézis összhangban van azzal a gyakorlati tapasztalattal is, hogy a nagy felbontású hidrodinamikai modellek önmagukban sem szükségszerűen javítják az URN-illeszkedést: több összehasonlító tanulmány a nyomásimpulzusok jó egyezése mellett is jelentős szintkülönbségeket talál az URN spektrumban, és a különbségeket részben modellválasztási és numerikus okokra vezeti vissza.<sup>5</sup>

## Kritikai összegzés

A vonatkozó definíciók és mérési standardok implicit módon is a csatolt vibroakusztikai szemléletet kényszerítik ki, ugyanakkor a „multiphysics” jelző a gyakorlatban gyakran csak részleges csatolást jelent (például CFD + utólagos akusztikai analógia). Ez a részlegesség – különösen a szerkezeti modell hiányában vagy egyszerűsítése esetén – a predikciók rendszerszintű torzulásához vezethet, amelyet a pusztán hidrodinamikai finomítás nem feltétlenül kompenzál.<sup>6</sup>

Jelen tanulmány célja, hogy áttekintse a vízi és víz alatti járművek víz alatti kisugárzott zajának fő fizikai mechanizmusait, valamint bemutassa azokat a csatolt vibroakusztikai és multifizikai modellezési megközelítéseket, amelyek a zaj predikcióját és validációját támogatják. A tanulmány külön figyelmet fordít arra, hogy a haditechnikai alkalmazások szempontjából mely modellezési, mérési és értelmezési kérdések tekinthetők kritikusnak.

## A víz alatti kisugárzott zaj katonai jelentősége

A víz alatti kisugárzott zaj katonai jelentőségét elsősorban az határozza meg, hogy közvetlenül befolyásolja a haditengerészeti platformok passzív detektálhatóságát és ezáltal túlélőképességét. A fejezet áttekinti az akusztikai rejtettség (*stealth*) alapelveit, a szonárrendszerekkel kapcsolatos detektálhatósági összefüggéseket, valamint bemutatja a forrás-átviteli út–vevő szemlélet szerepét a katonai alkalmazásokban.

## Akusztikai rejtettség és *stealth* koncepció

A katonai platformok – különösen a tengeralattjárók – esetében az akusztikai rejtettség elsődleges célja a vízbe kisugárzott zaj minimalizálása annak érdekében, hogy a platform passzív módon ne legyen könnyen detektálható. A tengeralattjárók zaj- és rezgéscsillapító technológiáit összefoglaló szakirodalom egyértelműen úgy fogalmaz, hogy a *stealth* képesség

<sup>4</sup> LENIOWSKA 2008.

<sup>5</sup> KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

<sup>6</sup> Indian Register of Shipping 2025.



eléréséhez a platformnak a vízbe „kiszórt” akusztikai zajt kell csökkentenie, és ehhez a forrás-átviteli út-vevő (*source-path-receiver*) szemlélet a gyakorlati elemzések alapja.<sup>7</sup>

A platformok passzív akusztikai *signature*-je tipikusan tonális és szélessávú komponensek együttese. Nyílt irodalmi összefoglalók szerint alacsony frekvenciákon a tonális összetevők (például forgógépek, fogaskerekek, villanymotorok harmonikusai) meghatározóbbak, míg néhány száz Hz felett a spektrum jellemzően szélessávúbb jellegűvé válik, a jármű sebességének növelésével pedig a propulzor és az áramlás okozta zajkomponensek szerepe felerősödik. A katonai adatok jelentős része minősített, ezért az abszolút szintek nyílt publikálása ritka, de az elérhető áttekintések a trendekre és a komponensek relatív szerepére megbízható kvalitatív képet adnak.<sup>8</sup>

A katonai jelentőség nem csupán a detektálhatóság kérdésében jelenik meg, hanem a tervezési és üzemeltetési döntésekben is. A zajcsökkentés tipikus eszköztára (forráscsökkentés, rugalmas beépítés, többlépcsős izoláció, aktív/adaptív rendszerek) lényegében vibroakusztikai beavatkozások összessége, amelyek a szerkezeti rezgésátvitelt és a hajótest sugárzását célozzák. Ebből következik, hogy a csatolt modellezésnek közvetlen „haditechnikai haszna” van: lehetővé teszi a kritikus átviteli utak azonosítását és a zajcsillapító intézkedések célzott optimalizálását.

## Szonár és detektálhatósági összefüggések

A szonárrendszerek teljesítményét a gyakorlatban gyakran a szonáregyenletek logaritmikus mérlegével közelítik, ahol a detektálhatóságot a cél által kisugárzott jel „forrásszintje”, a hangterjedési veszteség, a háttérzaj, a vevődirektivitás és a detektálási küszöb határozza meg. A passzív szonár elve szerint a vevő nem sugároz, hanem a cél által radiált hangokat hallgatja; a szonáregyenletek ezen a ponton közvetlen hidat képeznek az URN és a felderíthetőség között.<sup>9</sup>

A detektálhatóság azonban nem csak a cél által generált spektrum abszolút szintje; legalább ennyire meghatározó, hogy az adott műveleti környezetben (sekély tenger, parti zóna, mélytenger) a hang milyen módon terjed és hogyan alakul a jel-zaj viszony. Sekély vízben a fenékről visszaverődő és többszörösen szóródó komponensek jelentősen módosíthatják a mérhető hangnyomásszintet, miközben a fenék akusztikai tulajdonságai gyakran csak korlátozott pontossággal ismertek. Ezzel szemben mélyvízi környezetben a *repeatable* mérési konfigurációk egyszerűbbek, mert a közvetlen és a felszíni visszaverődés dominanciája jobban kontrollálható paraméter.<sup>10</sup>

## Forrás-átviteli út-vevő modell katonai kontextusban

A katonai URN-kontextus ezért szükségszerűen összekapcsolja a) a forrásoldali vibroakusztikai csatolást (mi és hogyan sugárzik), b) a mérési metrikák és szabványok világát (mit nevezünk

<sup>7</sup> HOWARD 2011.

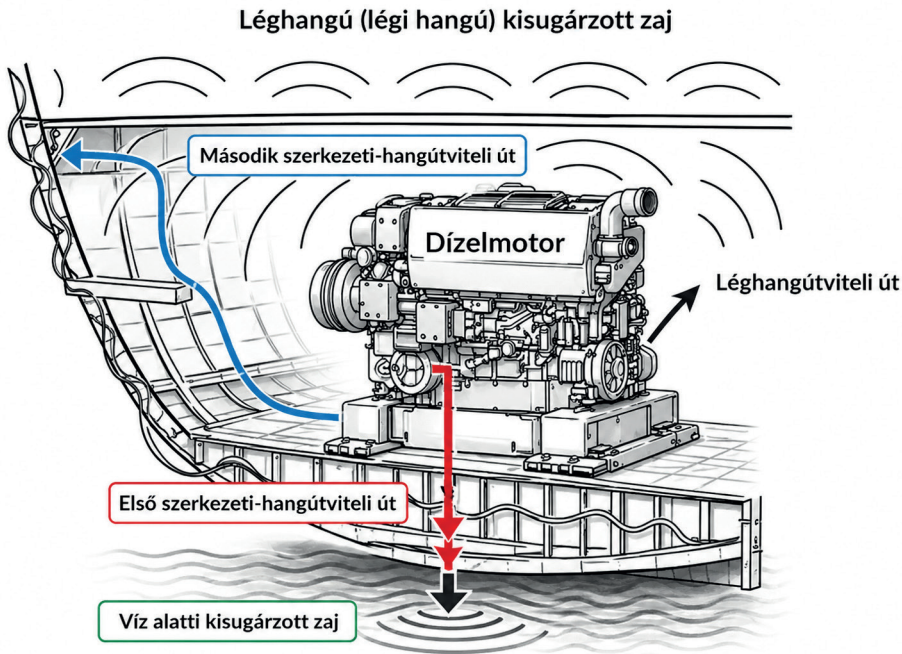
<sup>8</sup> MOORE 2019.

<sup>9</sup> AINSLIE–LEIGHTON 2015.

<sup>10</sup> AINSLIE et al. 2022.

összehasonlítható „aláírás”-nak), valamint c) a hangterjedési modell kiválasztását (hogyan térképeződik át az URN lokális mérőpontból műveleti detektálási távolságokra). E hármas láncolat bármely elemének gyengesége stratégiai szinten torzíthatja a detektálhatósági következtetéseket.<sup>11</sup>

Az 1. ábra a hajótest forrás-átviteli-lesugárzási modelljét mutatja be, kiemelve a szerkezeti és léghangú hangátviteli útvonalakat.



1. ábra: A hajótest forrás-átviteli-lesugárzási akusztikai modellje

Megjegyzés: A dízelmotor által keltett mechanikai gerjesztés szerkezeti úton a hajótesten keresztül a vízbe sugárzódik (structure-borne path), míg a léghangú komponens a fedélzet feletti térben terjed. Az ábra az elsődleges és másodlagos szerkezeti hangátviteli útvonalakat, valamint a víz alatti kisugárzott zaj kialakulását szemlélteti.

Forrás: a szerző szerkesztése SPENCE 2007 alapján

## Kritikai összegzés

A katonai motiváció erős „validációs paradoxont” hoz létre: éppen a legrelevánsabb (alacsony szintű, taktikai környezetben mért) URN-adatok a legnehezebben hozzáférhetők, ami a nyílt irodalomban felnagyítja a skálázási és extrapolációs bizonytalanságokat. A szonáregyenleti gondolkodás ugyanakkor egyértelműen kijelöli, hogy a mérnöki szintű vibroakusztikai modellezés és a hangterjedési modellezés integrációja nélkül a „csendes platform” követelménye csak részlegesen támasztható alá.

<sup>11</sup> International Organization for Standardization 2025.

## A víz alatti hangterjedés fizikai alapjai

### A víz alatti hangterjedés fizikai alapjai

A víz alatti akusztika egyik alapvető sajátossága, hogy a hangsebesség és a közeg sűrűsége nagyságrendekkel eltér a levegőétől; a hullámhossz ugyanazon frekvencián ennek megfelelően nagyobb, a közeg karakterisztikus akusztikai impedanciája pedig lényegesen „keményebb”. Oktatási célú, de mérnöki pontosságú összefoglalók szerint a hangsebesség folyadékban a rugalmassági modulus és sűrűség hányadosának gyökeként értelmezhető; vízben tipikus paraméterek mellett körülbelül 1500 m/s nagyságrendű. Ugyanitt a karakterisztikus impedancia vízre nagyjából  $1,5 \times 10^6$  Rayl, míg levegőre körülbelül 500 Rayl – ez a különbség közvetlenül befolyásolja a szerkezet–víz csatolás „erősségét”.<sup>12</sup>

A hangsebesség nem konstans: a hőmérséklet, a sótartalom és a mélység (nyomás) függvényében változik. A mérnöki gyakorlatban széles körben használt empirikus összefüggések (például Mackenzie-típusú egyenletek) és a nemzetközi standard algoritmusok (UNESCO/Chen–Millero) is ezt a függést írják le, explicit érvényességi tartományokkal. A hangsebességprofil (*sound speed profile*) ezért az akusztikai terjedési modellezés egyik legfontosabb bemenete.<sup>13</sup>

### Frekvenciatartomány és abszorpció

Az URN vizsgálata jellemzően széles frekvenciasávon történik: iparági iránymutatások szerint a kereskedelmi hajók értékelési sávja 10 Hz–50 kHz, kutatóhajók esetében akár 100 kHz-ig is terjedhet. Ez a széles sáv részben azért indokolt, mert a különböző forrásmechanizmusok eltérő frekvenciasávokban dominálnak, részben pedig azért, mert a terjedési veszteség és az abszorpció frekvenciafüggése lényegesen módosítja a detektálható jeltartományt.<sup>14</sup>

A mérési és jelentési gyakorlatban a hangnyomásszintet gyakran harmadoktáv-sávokban, illetve döntő szerepet kapó szabványokban decidekád-sávokban adják meg. Az ISO 17208-1 mélyvízi összehasonlító mérésekhez például konkrétan rögzíti, hogy a távoli térben mért hangnyomásszintet 1 m-re normalizálva, sávonként kell jelenteni, és a kapott mennyiséget a szabvány *radiated noise level*-ként kezeli.<sup>15</sup>

### Sekély- és mélyvízi sajátosságok

A mélyvízi hangterjedés egyik klasszikus jelensége a minimális hangsebességű zóna mentén kialakuló hangcsatorna (SOFAR), amelyben a hang refrakció révén csapdázódhat és nagy távolságokra eljuthat. A jelenség lényege, hogy a nyomás–hőmérséklet–sótartalom kombinációja

<sup>12</sup> Massachusetts Institute of Technology 2009.

<sup>13</sup> National Physical Laboratory 2000.

<sup>14</sup> Indian Register of Shipping 2025.

<sup>15</sup> International Organization for Standardization 2016.

körülbelül 800–1000 m mélységben gyakran hangsebesség-minimumot eredményez, amelyhez a hangnyalábok visszahajlanak.<sup>16</sup>

Sekély vízben ezzel szemben a vízoszlop „hullámvezető” jellege a felszín és a fenék közötti többszörös visszaverődésekből, interferenciából és módusos terjedésből adódik; a közeg határfületei és a fenék tulajdonságai a terjedés alapvető részévé válnak. A sekélyvízi akusztika áttekintései hangsúlyozzák, hogy a terjedés erősen környezetfüggő, és a jelfeldolgozási/antennatechnikai megoldások (például tömbfeldolgozás) is a változékony interferencia- és reverberációs környezethez igazodnak.<sup>17</sup>

## ISO 17208 szabványi keret

A mélyvízi összehasonlító URN-mérések fogalmi keretét az ISO 17208-1 adja, míg a sekélyvízi mérésekre a 2025-ben publikált ISO 17208-3 külön eljárásokat rögzít, és kifejezetten előírja, hogy a sekély vízben végzett hangnyomásmérésekből a releváns sekélyvízi terjedési jelenségek figyelembevételével kell forrásszámításokat végezni. A szabványtervezet (FDIS) egyben definiálja a „mély víz” határát is: a vízmélységnek nagyobbnak kell lennie 150 m-nél, illetve az összhossz 1,5-szeresénél vett maximumértéknél.<sup>18</sup>

## Kritikai összegzés

A hangterjedés fizikai leírása önmagában is többszintű modellhierarchiát igényel, de az URN-tervezés szempontjából a legnagyobb kockázat az, hogy a terjedési bizonytalanságokat a forrásmodellek „hibájaként” értelmezik. A mélyvízi és sekélyvízi mérések eltérő standardjai éppen azt jelzik, hogy a terjedési modell és a mérési geometria nem periferikus részlet, hanem az URN-metrika definíciójának része.

## A víz alatti kisugárzott zaj forrásmechanizmusai

A víz alatti kisugárzott zaj nem egyetlen, izolált fizikai folyamat következménye, hanem több, eltérő eredetű gerjesztési mechanizmus együttes hatásaként jelenik meg. A vízi és víz alatti járművek esetében a zajkibocsátás alapvetően három fő forráscsaládra vezethető vissza: a fedélzeti gépegységek és hajtásrendszerek által keltett, szerkezet által terjesztett zajra, a propulzorok – különösen kavitációval terhelt – működéséből származó zajkomponensekre, valamint a hajótest és a környező víz kölcsönhatásából eredő áramlás okozta zajra. E mechanizmusok nem függetlenek egymástól: az áramlási tér módosítja a propeller terhelését és kavitációs viszonyait, a szerkezeti rezgések pedig befolyásolják a sugárzási viselkedést. A víz alatti kisugárzott zaj spektruma ezért a különböző források szuperpozíciójaként értelmezhető,

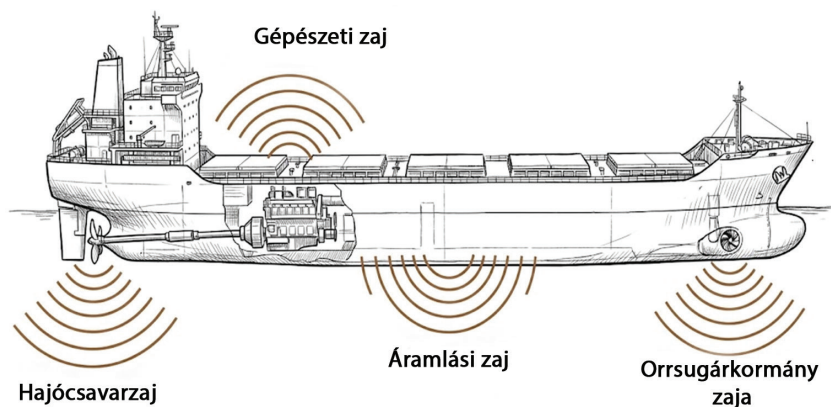
<sup>16</sup> Britannica 2012.

<sup>17</sup> KUPERMAN–LYNCH 2004.

<sup>18</sup> International Organization for Standardization 2025.

amelynek relatív összetétele az üzemállapottól, a sebességtől és a vizsgált frekvenciatartománytól függően változik.

A 2. ábra szemlélteti, hogy a víz alatti kisugárzott zaj nem egyetlen domináns forrás eredménye, hanem több, eltérő fizikai eredetű komponens szuperpozíciója.



2. ábra: A víz alatti kisugárzott zaj fő forrásmechanizmusai hajóplatform esetén

Forrás: a szerző szerkesztése SMITH–RIGBY 2022 alapján

## Propellerkavitáció

A propellerkavitáció az URN egyik legkritikusabb, üzemállapot-függő forrásmechanizmusa. A kavitáció kialakulása és fejlődése erősen nemlineáris, többfázisú jelenség, amelynek akusztikai következményei a tonális komponensek felerősödésétől a magas frekvenciás szélessávú komponensekig terjedhetnek. Az iparági mérési ajánlások kifejezetten a kavitáló propellerek zajmérésére fókuszálnak, és célként a teljes méretű (*full-scale*) akusztikai forrásjellemzők előrejelzését nevezik meg.<sup>19</sup>

A kavitációs zaj vizsgálatának egyik szűk keresztmetszete a modellkísérlet–teljes méret skálázás. A kavitációs alagútban végzett mérések és CFD-alapú előrejelzések között a vízminőség, a Reynolds-szám és a kavitációdinamika különbségei miatt jelentős eltérések adódhatnak. Nyílt hozzáférésű összehasonlító tanulmányok szerint a kavitációt kiváltó alagútgeometriai blokkolás a kavitációdinamikát és az URN-szinteket érdemben befolyásolhatja, miközben a nyomásimpulzusok predikciója akár kielégítő is lehet, az URN spektrumokban mégis számottevő diszkrepanciák maradhatnak.<sup>20</sup>

<sup>19</sup> ALVES PERREIRA et al. 2024.

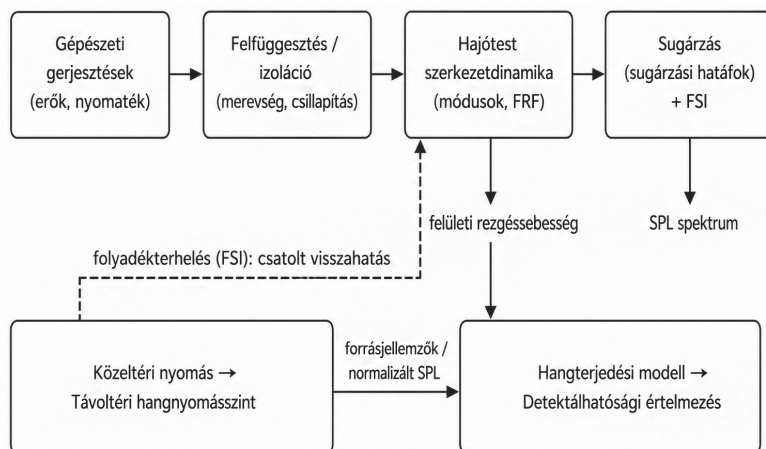
<sup>20</sup> KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

## Szerkezet által terjesztett zaj

A szerkezet által terjesztett zaj forrásoldalon a fedélzeti gépek és tartószerkezeteik dinamikus gerjesztéseiből, útoldalon a gépalapok, bekötések, hossztartók és közbenső szerkezeti elemek rezgésátviteléből, vevőoldalon pedig a hajótest–víz határfelület sugárzó viselkedéséből áll össze. Az átviteliút-elemzés (*transfer-path analysis*) típusú megközelítések kifejezetten úgy tekintenek erre a folyamatra, mint *input–output* kapcsolatra a szerkezeti gerjesztések és a vízbe sugárzott hangnyomásszint között, és a módszert előzetes tervezési becslésekre, illetve zajcsökkentő megoldások hatásosságának értékelésére javasolják.<sup>21</sup>

A szerkezeti sugárzás hatásosságát a sugárzási hatásfok fogalma ragadja meg: azonos rezgésebbesség/rezgésenergia mellett a különböző szerkezeti módusok és panelgeometriák eltérő mértékben sugároznak a vízbe. A hajótest-panelrezgésekből történő URN-becslések egyik iránya a gyors, mérésalapú átviteli függvények használata, ahol a hajótesten mért gyorsulásokból és a hidrofonos mérésekből származtatott transzferfüggvény (a szerkezet–akusztika „átviteli útja”) képes kis hibával visszaadni a sugárzott komponenseket, legalábbis a vizsgált konfigurációk és zajviszonyok mellett.<sup>22</sup>

A szerkezet által terjesztett zaj esetében a mechanikai gerjesztések a hajótest dinamikai válaszan keresztül jutnak el a vízbe történő akusztikai sugárzásig, amint azt a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra: A szerkezet által terjesztett zaj átviteli útja: gépészeti gerjesztések – hajótest szerkezetdinamika – vízbe történő sugárzás

Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy a folyadék–szerkezet kölcsönhatás nem csupán a sugárzás hatásfokát befolyásolja, hanem visszahat a szerkezeti dinamikai válaszra is.

<sup>21</sup> SMITH – LA ROSA – WOOD 2024.

<sup>22</sup> RODRIGO S. et al. 2023.

## Áramlás okozta zaj

Az áramlás okozta zaj a hajótest menti határréteg, örvénykeltés, leválás, turbulens nyomás-fluktuációk és egyéb hidrodinamikai jelenségek következménye. A platform sebességének növekedésével a propulzor és áramlási zajok tipikusan gyorsan emelkednek; nyílt katonai áttekintések hivatkozási lánc alapján a sebességfüggés akár ötödik–hatodik hatványú trendet is mutathat, ami a nagyobb sebességtartományokban a gépzajhoz képest dominanciaváltást eredményezhet.<sup>23</sup>

A gyakorlatban az áramlási és kavitációs zaj szorosan összekapcsolódik, mert a hajótest-propeller kölcsönhatás (*wake* mező) és a turbulens struktúrák befolyásolják a kavitáció kialakulását is. Ez az összefonódás különösen nehezé teszi a „tisztán hidrodinamikai” és a „tisztán vibroakusztikai” komponensek szétválasztását, és megerősíti azt a módszertani igényt, hogy a forrásmodellekben a nemlineáris áramlási zajforrások (például örvénykeltés) kezelése ne pusztán utófeldolgozási kérdés legyen.<sup>24</sup>

Az áramlás okozta zaj egyik speciális formája az úgynevezett „éneklő hajócsavar” jelenség, amikor a lapát kilépő éle és az áramlási instabilitások kölcsönhatása keskenysávú, tonális zajt eredményez. A jelenség nem feltétlenül kapcsolódik kavitációhoz, hanem aero-/hidroelasztikus kölcsönhatásból származik

## Tonális és szélessávú komponensek

A tonális komponensek tipikusan periodikus gerjesztésekhez (forgógépek rendjei, fogazott kapcsolatok, lapátfrekvenciák) köthetők, míg a szélessávú komponensek turbulens és többfázisú folyamatokból (határréteg, kavitációbuborékok) keletkeznek. A katonai *signature* szemléletben ez a felosztás operatív szempontból is fontos: a tonális „vonalak” detektálhatósága és azonosíthatósága eltér a szélessávú háttértől, ezért zajcsökkentési stratégiák gyakran célzottan a vonalspektrum elfedésére vagy átalakítására is irányulnak.<sup>25</sup>

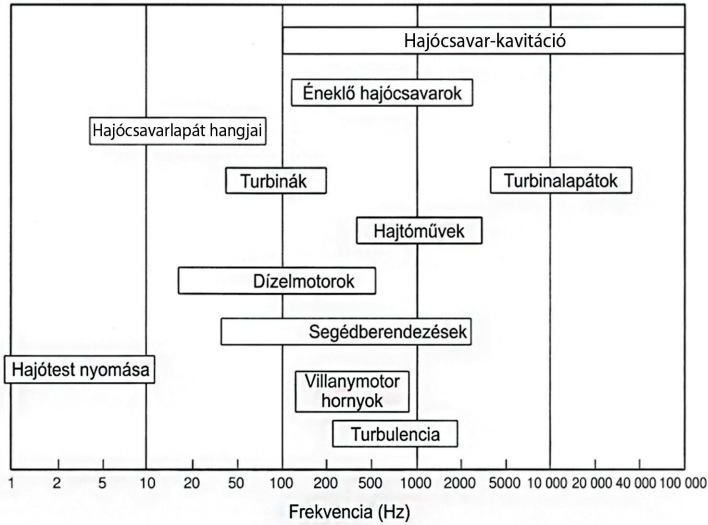
A különböző zajforrások relatív hozzájárulása erősen frekvenciafüggő, amint azt a 4. ábra szemlélteti.

<sup>23</sup> MOORE 2019.

<sup>24</sup> SEZEN–ATLAR 2022.

<sup>25</sup> HOWARD 2011.





4. ábra: A vízi járművek víz alatti kisugárzott zajának fő forrásai és azok jellemző frekvenciatartományai  
Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy az alacsony frekvenciatartományban a nagy tömegű gépegységek és hajtásrendszerek dominálnak, míg magasabb frekvenciákon a propellerkavitáció és az áramlási jelenségek válnak meghatározóvá.

## Kritikai összegzés

A forrásmechanizmusok közötti határvonalak a valós járműveken gyakran elmosódnak: a kavitáció és az áramlás, illetve a géprezgések és a sugárzás közötti visszacsatolások miatt a „domináns forrás” az üzemállapottól és a vizsgált frekvenciasávtól függően változik. Mindez arra utal, hogy az URN-tervezésben nem elegendő egyetlen kiemelt forrásra optimalizálni; a csatolt vibroakusztikai modell akkor tekinthető hitelesnek, ha képes a dominanciaváltások reprodukálására és a komponensek közötti keveredés kezelésére.

## Vibroakusztikai multifizikai modellezési módszerek

### Szstrukturális végelelemes modellezés

A szerkezeti végelelemes modellezés (FEM) az URN-predikció „mechanikai gerince”: a gépegységek gerjesztései által keltett erőket (vagy gyorsulásokat, illetve frekvenciatartományú gerjesztéseket) a hajótest és alrendszerei dinamikus válaszává kell fordítani. A FEM előnye, hogy a bonyolult geometriák, heterogén anyagok és szerkezeti kapcsolatok (merevítőbordák, csomópontok, alapok, rugalmas bakok) explicit módon kezelhetők. A korlát ugyanakkor

a frekvenciával növekvő szabadságfok és az ismeretlen/nehéz paraméterezés: csillapítás, kontaktok, rögzítések, valamint a gépek és csőhálózatok növekvő részletezettségi igénye.<sup>26</sup>

A strukturális modell prediktív határai különösen akkor élesek, amikor a cél nem csupán a lokális rezgési válasz, hanem a vízbe sugárzott akusztikai teljesítmény. Ehhez a szerkezet felületi rezgéssebesség-eloszlása és módusstruktúrája a kritikus. A sugárzási hatások frekvenciafüggő, és általános szerkezet-akusztika elmélet alapján a közegterhelés megváltoztatja a rezonanciacsúcsok helyét és fázisát; meghatározó, hogy a rendszer a tömegterhelés dominálta vagy a sugárzási csillapítás dominálta tartományban működik.

## Folyadék-szerkezet kölcsönhatás

A folyadék-szerkezet kölcsönhatás az URN-probléma legszorosabb értelemben vett „csatolása”: a szerkezeti rezgések akusztikai teret keltenek, az akusztikai nyomás pedig terhelésként visszahat a szerkezetre. A klasszikus leírás szerint a fluidum reakciója ekvivalens hozzáadott tömeg és sugárzási csillapítás formájában. Konkrét, fluidumterhelt lemezeket vizsgáló modellek rámutatnak, hogy a hatás frekvenciaspektruma nem egynemű: egy határfrekvencia alatt a folyadék dominánsan tömegterhel, felette a hatás csillapító jellegűvé válik. Ez a megfigyelés közvetlenül releváns hajótestpanel-sugárzásnál, mert jelzi, hogy a vibroakusztikai csatolás tipikusan az alacsony-középfrekvenciás tartományban a legerősebb.

Módszertanilag a csatolás megvalósítható monolit (egyidejű) vagy partícionált (iteratív) eljárásokkal, idő- vagy frekvenciatartományban. Hajószerkezeti alkalmazásokban gyakori a frekvenciatartományú lineárisítás (harmadoktáv/decidekád vagy keskenysáv) és a strukturális-akusztikai csatolás BEM/FEM hibridjével történő kezelése. A választás meghatározza a számítási költséget is: a csatolt rendszerekben a mátrixok rossz kondíciója és a sűrű (BEM) operátorok számottevő erőforrást igényelnek.<sup>27</sup>

## CFD-alapú áramlásmodellezés

A CFD (különösen RANS/DES/LES) a propeller-hajótest-kormány kölcsönhatás és a kavitációdinamika leírásában megkerülhetetlen, ha a cél a nemlineáris áramlási eredetű gerjesztések és akusztikai források explicit kezelése. A *high-fidelity* CFD azonban nem jelent automatikus pontosságnövekedést: a turbulenciamodel, a hálófelbontás, az időlépés, a kavitációs tömegátadás modellje és a határfeltételek (*wake* mező, fal/légfelszín, forgó-álló interfész) mind domináns bizonytalansági forrás lehet. Egy teljes méretű propeller-URN tanulmány például kiemeli, hogy az LES nagyobb turbulenciafelbontást adhat, ugyanakkor teljes méretben rendkívül költséges; ezért a DES költség-pontosság kompromisszumként értelmezhető, de még így is előfordulhat URN-alulbecslés, ha például a tip-vortex kavitáció dinamikája nem jelenik meg megfelelően.<sup>28</sup>

<sup>26</sup> International Maritime Organization 2019.

<sup>27</sup> LIANG et al. 2019.

<sup>28</sup> SEZEN-ATLAR 2022.

A CFD-alapú előrejelzések validációs korlátja, hogy a „köztes” mennyiségek (nyomásimpulzusok, tolóerő-ingadozás) illeszkedése nem garantálja az URN spektrumok illeszkedését. Nyílt hozzáférésű, modell- és teljes méretű összehasonlításokat végző cikkek szerint a nyomásimpulzusok predikciója lehet kielégítő, mégis jelentős URN-eltérések maradhatnak, és ezek egy része a permeábilis integrálási felület választására, illetve a numerikus *spurious* zajokra vezethető vissza.<sup>29</sup>

## Akusztikai analógia

Az akusztikai analógia (a gyakorlatban gyakran Ffowcs Williams–Hawkins típusú formulációkkal) a CFD és az akusztikai tér összekapcsolásának elterjedt eszköze. A módszer lényege, hogy az áramlási megoldásból származtatott felületi és térfogati források alapján számítja az akusztikai nyomást; a számítás jellemzően frekvenciatartománybeli spektrumok előállítására irányul. A permeábilis megfogalmazások számításlag előnyösek, mert bizonyos nemlineáris hozzájárulásokat a térfogati integrálokról felületi integrálokra transzformálnak, ugyanakkor a felület választása, a forgó–álló interfészek és az *end-cap* jellegű problémák érzékenyen tehetnek az eredményt.

Itt válik különösen láthatóvá, miért nem garantál a teljes nagy részletességű CFD-modell (*high-fidelity CFD*) nagyobb pontosságot minden esetben. Ha az akusztikai analógia bemeneti felülete vagy a kavitációs modell bizonytalan, akkor a CFD felbontásának növelése akár a numerikus zajt is felerősítheti. A gyakorlatban ezért az URN-predikció a CFD „komponens” mellett erős módszertani fegyelmet igényel: a felületválasztás, a spektrális konvergencia, a háló- és időlépés konvergencia, valamint a mérési geometriával való kompatibilitás igazolása nélkül a pontosság látszólagos.

## FEM–BEM csatolás

A BEM különösen alkalmas a külső (szabadtéri) akusztikai sugárzás leírására, mert a problémát a határfelületre redukálja; ezzel a térdimenzió eggyel csökken, ami elméleti előny. Ugyanakkor a diszkretizált BEM operátorok sűrű mátrixokat eredményeznek, ami memória- és időigényt okoz, főként magas frekvencián, ahol a hullámosság miatt a diszkretizációs sűrűség nő. A gyorsított BEM (például *fast multipole*) és az iteratív megoldók csökkenthetik a per-iterációs költséget, de a konvergenciát és a kondicionálást a formuláció és az előkonkondicionálás határozza meg.<sup>30</sup>

A hajószerkezeti URN esetében a FEM–BEM csatolás tipikusan úgy jelenik meg, hogy a FEM adja a szerkezeti felületi rezgéssebességet, a BEM pedig a vízben kialakuló nyomásmezőt és a távoli térbe sugárzott hangot. A csatolás előnye a fizikai „helyesség”: a hajótest lokális módusai és a vízközeg sugárzási feltételei egy keretben kezelhetők. A korlát a modellépítési

<sup>29</sup> KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

<sup>30</sup> IULIANO – CASUSCELLI – DE ANGELIS 2025.

költség és a csillapítás/határfeltételek bizonytalansága, ami a predikciót gyakran „kalibráció-függővé” teszi.<sup>31</sup>

## Prediktív modellek hierarchiája és számítási kompromisszumok

A gyakorlati URN-tervezés ritkán engedheti meg magának, hogy minden projektfázisban „full-scale CFD + akusztikai analógia + csatolt szerkezeti sugárzás + terjedési modell” láncot futtasson. Ezért a prediktív modellek hierarchiája széles: empirikus és félempirikus módszerek, determinisztikus (alacsony frekvenciás) FE/BE modellek, közép- és magas frekvencián SEA vagy hibrid FE/BE/SEA megközelítések, illetve nagy felbontású CFD-alapú komponensek kombinációi. Nemzetközi technikai jelentések és iparági mátrixok kifejezetten úgy fogalmaznak, hogy FE és BE alacsony frekvencián jellemző, magasabb frekvencián hibrid módszerek, míg a legmagasabb frekvencián SEA dominál, és mindehhez jelentős szakértői tudás szükséges.

A hierarchia „kritikai” eleme, hogy a számítási igény és a prediktív pontosság nem monoton kapcsolatban áll. Az empirikus/félempirikus módszerek gyorsak, de paraméterérzékenyek, és a skálázási bizonytalanságok magasak lehetnek; a CFD-alapú módszerek részletesek, de a modellválasztás és numerika miatt akár az URN-illeszkedést is ronthatják, ha a validáció nem kielégítő. A legjobb gyakorlat ezért iteratív: a korai fázisban gyors, robusztus becslések, a kritikus átviteli utak azonosítása, majd a fókuszált *high-fidelity* számítások a leginkább zajdomináns jelenségek köré szűkítve.<sup>32</sup>

Az 5. ábrán bemutatott predikciós lánc bal oldalán a gerjesztő erők jelennek meg, amelyek a hajó fedélzeti gépegységeiből és a propeller működéséből származnak. Ide tartoznak a géperők és nyomatékingadozások, a fogaskerék-kapcsolódásból eredő komponensek, a propellerlapátokra ható hidrodinamikai terhelések, valamint a kavitáció térfogatdinamikájából és CFD-számításokból származó nyomásfluktuációk. Ezek a bemenetek időtartományban (például tranziens jelként) és frekvenciatartományban (rend-spektrum, keskenysávú felbontás) egyaránt értelmezhetők. A modul kimeneteként a szerkezeti csomópontokra redukált erővektorok, illetve a hajótest felületein ébredő nyomásmezők adódnak.

A következő lépcsőben a strukturális rezgések meghatározása történik, jellemzően véges-elemes modell segítségével, szükség esetén modellcsökkentési eljárásokkal kiegészítve. A gerjesztések hatására a hajótest és a gépalapok elmozdulás-, sebesség- és gyorsulásmezői számíthatók, továbbá meghatározhatók a modális jellemzők és az átviteli utak leírásához szükséges frekvenciaátviteli függvények (FRF). Ezen a ponton külön figyelmet igényel a csillapítás, a rögzítési feltételek és az izolátorok paraméterezése, mivel ezek alapvetően befolyásolják a rezgésenergia továbbadását.

<sup>31</sup> International Maritime Organization 2019.

<sup>32</sup> KHRAISAT–PERSSON–BENSOW 2026.

A szerkezeti válasz ismeretében a sugárzási határfok, illetve az akusztikai sugárzási impedancia határozható meg. A bemenet itt a hajótest egyes paneljeinek vagy teljes felületének rezgésebség-eloszlása. A számítás történhet analitikus vagy empirikus közelítésekkel a korai tervezési fázisban, numerikus módszerekkel (például határelem- vagy végeelem-eljárással) részletes vizsgálatok esetén, illetve mérésalapú átviteli függvények alkalmazásával.

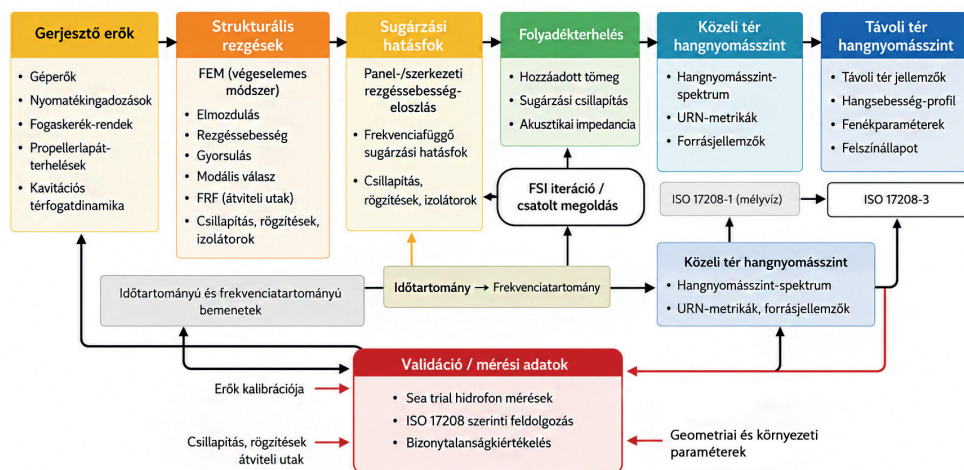
A folyadékterhelés figyelembevétele a folyadék–szerkezet kölcsönhatási modell keretében történik. Ebben a lépésben a hozzáadott tömeg, a sugárzási csillapítás és az akusztikai impedancia szerepe jelenik meg. A szerkezeti felületmozgás és adott esetben a CFD-ből származó nyomásmezők alapján meghatározható a víz visszaható nyomásterhelése, amely visszacsatol a strukturális modellhez. Ez az iteratív kapcsolat – az FSI-csatolás – biztosítja, hogy a szerkezet és a folyadék kölcsönhatása konzisztensen jelenjen meg a megoldásban.

A következő modul a közeli tér akusztikai nyomásának meghatározása. Itt a felületi rezgések, a sugárzási paraméterek, valamint a kavitációs és áramlási források együttesen szolgálnak bemenetként. A számítás végezhető akusztikai végeelemes vagy határelemes eljárással, illetve propeller esetén akusztikai analógia alkalmazásával. E lépésben történik meg az esetleges tartományváltás is: ha a kiinduló adatok időtartományúak, itt hajtják végre a spektrális transzformációt (FFT), valamint a sávositást, például harmadoktávós bontásban.

A távoli tér hangnyomásszintje a közeli térben meghatározott nyomásmező extrapolációjával állítható elő, a mérési geometriának megfelelő normalizálással. Az eredmény a távoli térbeli hangnyomásszint-spektrum, illetve az URN-metrikák – például normalizált forrásjellemzők – formájában jelenik meg. Ezen a ponton biztosítani kell az alkalmazott szabványokkal való kompatibilitást, külön kezelve a mélyvízi (ISO 17208-1) és a sekélyvízi (ISO 17208-3) számítási ágakat.

A lánc jobb szélén a hangterjedési modell helyezkedik el, amely a forrásjellemzőket a környezeti paraméterek – például hangsebességprofil, fenékszerkezet, felszíni állapot – figyelembevételével műveleti pontokra vetíti. A kimenet a terjedési veszteség, valamint a detektálhatóság szempontjából releváns mennyiségek, például a jel–zaj viszonyhoz kapcsolódó paraméterek. A modell különböző változatokban alkalmazható sekély- és mélyvízi környezetre.

Az 5. ábra alsó részén külön validációs visszacsatolási hurok jelenik meg. A távoli térbeli eredményekből és a terjedési modell kimenetéből származó adatok egy „Validáció / mérési adatok” blokkba futnak be, amely a tengeri próbák során végzett hidrofonos mérésekre, az ISO 17208 szerinti feldolgozásra és a bizonytalanság-kiértékelésre utal. E validációs blokk visszacsatolást biztosít a gerjesztési bemenetek kalibrálásához, a strukturális modell paramétereinek finomításához, valamint az akusztikai és terjedési modulok geometriai és környezeti beállításainak pontosításához. Így a predikciós lánc nem lineáris, egyszeri számításaként értelmezendő, hanem iteratív módon finomított, mérési adatokkal alátámasztott rendszerként.



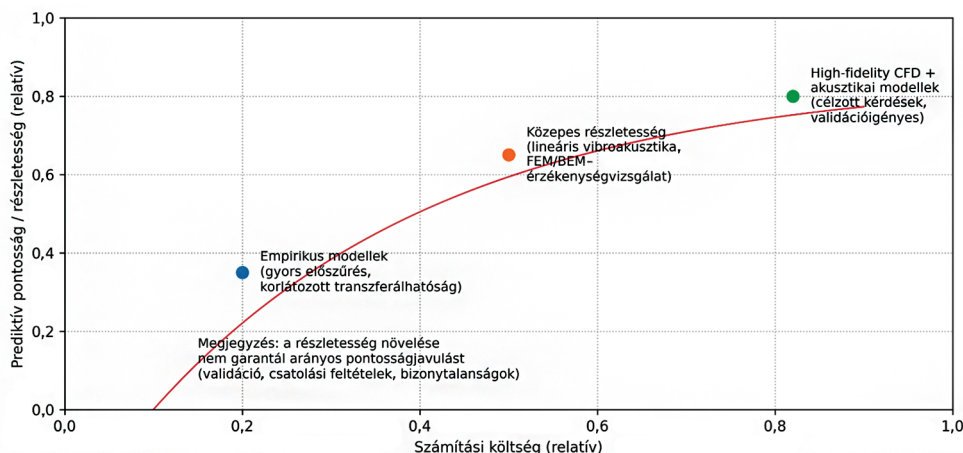
5. ábra: Vibroakusztikai multifizikai URN-predikciós workflow

Forrás: a szerző szerkesztése

Az ábra célja egy olyan, grafikai kivitelezésre alkalmas, csatolt predikciós lánc szemléltetése, amelyben a mechanikai gerjesztésekből a távoli térben értelmezett URN-metrikákig (hangnyomásszint, illetve szükség esetén forrásjellemzők) vezető út egyértelműen követhető.

A javasolt ábra vízszintes, balról jobbra haladó főfolyamot tartalmaz, hét egymás utáni, téglalap alakú modulblokkal, a modulok között egyirányú nyilakkal. A blokkok alatt (kisebb betűmérettel) megadandók a tipikus bemeneti/kimeneti mennyiségek és a domináns tartomány (időtartomány / frekvenciatartomány).

A különböző prediktív megközelítések eltérő számítási költséggel és eltérő transzferálhatósággal rendelkeznek, amint azt a 6. ábra koncepcionális módon szemlélteti.



6. ábra: Prediktív modellek hierarchiája

Forrás: a szerző szerkesztése

Látható, hogy a nagy részletességű modellek nem lineárisan javítják a prediktív pontosságot, mivel a validáció, a csatolási feltételek és a környezeti bizonytalanságok korlátozó tényezőt jelentenek.

## Kritikai összegzés

A multifizikai módszerek valódi hozzáadott értéke nem az, hogy „mindent számolnak”, hanem hogy a domináns csatolási mechanizmusokat helyesen rangsorolják, és a validáció felé zárják a modellt. A túlzottan részletes CFD önmagában – szerkezeti integráció és standard-kompatibilis metrikaképzés nélkül – könnyen „precízen téves” eredményeket adhat, míg egy jól paraméterezett, hierarchikusan felépített vibroakusztikai *workflow* a tervezési döntésekhez gyorsabb és robusztusabb út.

## Validáció és mérési kihívások

### Tengeri próbamérések és hidrofon elrendezés

A tengeri próbamérések (*sea trial*) az URN-modellek alapvető validációs referenciái, ugyanakkor költségesek, logisztikailag összetettek, és katonai környezetben gyakran korlátozott hozzáférésűek. A nyílt szakirodalom is hangsúlyozza, hogy teljes méretű URN-mérések sok esetben katonai vagy kutatási célból történnek, ami a validációs adatbázisok szűkösségéhez vezet. Ezzel párhuzamosan ugyanakkor akadnak nyílt projektek és adatbázisok, amelyek kifejezetten a teljes méretű adat-szimuláció összevetést támogatják.<sup>33</sup>

Az ISO 17208-1:2016 a mélyvízi, összehasonlító célú mérésekre standardizált eljárást ad: a távoli térben, tipikusan *beam aspect* geometriában mért hangnyomásszintet a legkisebb megközelítési pont távolságával (CPA) normalizálja, és a kapott eredményt *radiated noise level*-ként jelenti. A szabvány rögzíti, hogy a módszer a felszíni tükörkép-interferenciából (Lloyd-tükörhatás) eredő variabilitást „simítja”, de nem tünteti el teljesen, és azt is jelzi, hogy az aljzat-visszaverődés, refrakció és abszorpció hatásaira nem ad explicit számítási korrekciót.<sup>34</sup>

Iparági irányelvek a mérési terminológiát kiegészítik a közeli tér/távoli tér fogalmi definícióival, és számszerű támpontot is adnak: a közeli tér jellemző határa a hanghullámhossz, illetve a forrás legnagyobb méretének többszöröse. Ugyanezen dokumentumok a mérési terv részeként kezelik az „akusztikai középpont” fogalmát, amelyhez a normalizálás történik.

### Hidrofon elrendezés

A hidrofon elrendezés (távolság, mélység, többcsatornás vagy egycsatornás geometria, aspektus) alapvetően meghatározza, hogy a mérés mennyire tekinthető távoli térnek, mennyire érintett a felszíni és fenékreflexiók interferenciájában, és milyen pontossággal invertálható

<sup>33</sup> SEZEN–ATLAR 2022.

<sup>34</sup> International Organization for Standardization 2016.



a forrásjellemző. A műszaki ajánlások ezért részletesen tárgyalják a mérési geometriát, a sávos feldolgozást és az üzemi feltételek stabilizálását (ITTC 2017/2021).

## ISO 17208 és sekélyvízi bizonytalanságok

A sekély vízben végzett URN-mérés lényegesen nagyobb bizonytalanságot hordoz, mert a fenék hatása és a többszörös visszaverődések a mért hangnyomásszintet és az ebből származtatott metrikákat erősen módosítják. Ezt a problémát a szakirodalom a standardizáció szintjén is hangsúlyozta: a mélyvízi eljárások ismételhetőbbek, mert a közvetlen és a felszíni komponens kezelése elégséges, míg sekély vízben a fenék tulajdonságai és a többszörös reflexiók domináns szerepet kapnak, miközben a fenékparaméterek gyakran pontatlanul ismertek.<sup>35</sup>

A 2025-ben publikált ISO 17208-3 erre válaszként kifejezetten sekélyvízi mérési és számítási eljárásokat rögzít, és előírja a forrásszint számítását a sekélyvízi terjedési jelenségek figyelembevételével. A szabványtervezetben ráadásul megjelenik az a gyakorlati motiváció is, hogy a mélyvízi mérőterületek a hajók üzemenélől olykor távol esnek, ezért a sekélyvízi standard szükségszerű.<sup>36</sup>

A validációt tovább bonyolítja, hogy a mérés-szimuláció összevetés nem pusztán „spektrumok illesztése”: a mért URN anyagában hordozza a mérési geometria, a tengerszíni állapot és a Lloyd-tükörhatás lenyomatát. Nyílt szakirodalmi példák szerint az URN-mérések egyik legfontosabb torzító jelensége éppen a Lloyd-tükör interferencia, amely megbízható eljárásokat követel meg a jel-zaj viszony, a háttérzaj és a geometriai normalizálás értelmezésében.

## A *broadband* validáció problémái

A *broadband* validáció hiánya több szinten jelentkezik. Egyrészt a teljes méretű mérések szűkösek és részben korlátozott hozzáférésűek, másrészt a kavitációs zaj és áramlási zaj szélessávú komponensei különösen érzékenyek a modellválasztásra és a numerikus beállításokra. Egy friss, nyílt hozzáférésű összehasonlító tanulmány kifejezetten azt találja, hogy bár a kavitációdinamika és nyomásimpulzusok egyezése jó lehet, az URN-szintekben jelentős eltérések maradnak, és több nyitott kérdés fennáll.

Harmadrészt a víz alatti akusztikai mérés jelenleg erősen „hangnyomásközpontú”. A mérési ajánlás jellegű mérési útmutatók kiemelik, hogy a részecskemozgás (sebesség/gyorsulás) és fenékrengés mérése – bár biológiai és fizikai szempontból is releváns lehet – jelenleg technológiailag és kalibrációs standardok hiánya miatt éretlenebb; emiatt a szélesebb vibroakusztikai validációs kép gyakran hiányos.<sup>37</sup>

<sup>35</sup> AINSLIE et al. 2022.

<sup>36</sup> International Organization for Standardization 2025.

<sup>37</sup> ROBINSON–LEPPER–HAZELWOOD 2014.

## Kritikai összegzés

A validációs kihívások nem „mellékes” problémák, hanem a predikciós módszer érvényességi tartományának definíciói. Az ISO 17208 szigorú metrikái és geometriai előírásai azt jelzik, hogy a mérés és a modell összehasonlítása csak standard-kompatibilis módon értelmezhető; enélkül a modell kalibrációja könnyen a mérési artefaktumokra illeszkedik. A *broadband* validáció hiánya pedig azt valószínűsíti, hogy a következő évek kutatási fókusza a bizonytalanságkezelés és a skálázási/terjedési korrekciók integrációja lesz.

## Katonai alkalmazások és rendszerintegráció

### Tengeralattjárók és UUV/USV rendszerek

A tengeralattjárók URN-követelményei a *stealth* filozófiából fakadnak: a zaj- és rezgéskezelés célja elsődlegesen a vízbe kisugárzott akusztikai zaj minimalizálása, ami közvetlenül a passzív detektálhatóságra hat. A nyílt áttekintések hangsúlyozzák, hogy a tengeralattjárók számos zaj- és rezgésforrással rendelkeznek (hajtás, segédgépek, propeller, áramlás), és az izolációs technológiák részben az átviteli utak megszakítására épülnek.

Az UUV/USV rendszerek esetében az URN kettős jelentőségű: egyrészt saját rejtettségi kérdés, másrészt a fedélzeti érzékelők (szonár, kommunikáció) számára a *self-noise* limitáló tényező lehet. Nyílt tudományos publikációk bizonyítják, hogy UUV-k passzív módon követhetők a motorok magasabb frekvenciás zajkomponenseiből, különösen sekélyvízi tömbkörnyezetben. Ez a tény a „kis méretű, elektromos és elvileg csendes” platformoknál is indokolja a teljes vibroakusztikai lánc elemzését.<sup>38</sup>

### Akusztikai *signature* management

Az akusztikai *signature* management a katonai gyakorlatban olyan rendszerszintű tervezési és üzemeltetési keret, amely a források, átviteli utak és sugárzó felületek együttes optimalizálását célozza. A nyílt szakirodalom azt is kiemeli, hogy a *signature control* technológiák haditechnikai részletei jellemzően minősítettek, emiatt a publikálható kutatás gyakran alapvető és módszertani szinten marad. Módszertani következtetésként ugyanakkor egyértelmű: a legnagyobb hatású beavatkozások többnyire a szerkezeti rezgésátvitel és a sugárzás csökkentésére irányulnak, vagyis a vibroakusztikai integráció nem opcionális, hanem a *signature management* „fizikai hordozója”.

## Kutatási hiányosságok

A kutatási hiányosságok egyik központi eleme a bizonytalanságkezelés. A sekélyvízi standardizáció történetében kifejezetten megjelent az a probléma, hogy a megismételhető

<sup>38</sup> KITA et al. 2022.

mérésekhez a szenzorgeometria és elemzés kombinációinak hiánya akadályozta a fejlődést; a fenék- és terjedési paraméterek bizonytalansága pedig a metrikák összehasonlíthatóságát gyengítette. Bár az ISO 17208-3 publikálása részben választ ad, a gyakorlati alkalmazhatóság továbbra is adat- és környezetfüggő marad.<sup>39</sup>

A digitális-alkalmazások az URN kontextusában két irányban formálódnak. Az egyik irány a hajózás/útvonaltervezés és a zajkitettség operatív csökkentése, ahol kiszámítható, „valós idejű” URN-becslések szükségesek. Nyílt hozzáférésű 2026-os munka például digitális iker alapú döntéstámogató rendszert mutat be hajóútvonal-tervezéshez, URN-minimalizálási céllal.<sup>40</sup>

A másik irány kifejezetten a valós idejű predikció gépi tanulásos/online módszerekkel, különösen problémás adatkorlátok mellett. Friss tanulmányok fogalmaznak úgy, hogy a vibroakusztikai energiaátviteli mechanizmusok összetettsége, a korlátozott rezgésmonitoring és a kevés próbaminta miatt *ensemble*- és *feature*-optimalizáló online predikciós keretekre van szükség. E megközelítések ígéretesek, de egyértelmű haditechnikai korlátjuk, hogy generalizációjuk tipikusan az elérhető tanítóadatokra és üzemállapotokra korlátozódik; a fizikai interpretálhatóság és a „transzfer” új platformokra nem automatikus.<sup>41</sup>

A valós idejű predikció legkeményebb határa végső soron a számítási költség és a bemeneti paraméterek bizonytalansága. A csatolt FEM–BEM, illetve CFD + akusztikai analógia láncok sok esetben nagyságrendekkel meghaladják a fedélzeti vagy operatív időkereteket. Ezért a digitális iker és *real-time* célok felé vezető út várhatóan modellcsökkentéssel, *surrogates* megoldásokon és a kritikus átviteli utak szenzoros monitorozásán keresztül halad – de mindezt csak akkor lehet haditechnikailag releváns módon alkalmazni, ha a modellek bizonytalanságát explicit módon kezelik, és a standard-kompatibilis validáció nem marad el.<sup>42</sup>

## Kritikai összegzés

A katonai alkalmazásokban az URN-modellezés legnagyobb korlátja nem feltétlenül a numerikus módszerek hiánya, hanem a validációs adatok és a környezeti paraméterek kontrollálhatósága. A digitális iker és valós idejű predikció iránya stratégiaileg vonzó, de jelenleg többnyire a terjedési oldal és az empirikus URN-becslések felől közelít; a teljes vibroakusztikai multifizikai lánc *real-time* integrációja csak modellcsökkentéssel és szisztematikus bizonytalanságkezeléssel képzelhető el.

## Összegzés

A víz alatti kisugárzott zaj predikciója a vízi és víz alatti járművek esetén szükségszerűen csatolt vibroakusztikai multifizikai feladat. A források (propellerkavitáció, szerkezet által terjesztett zaj, áramlás okozta zaj) és a terjedési környezet (sekély vs. mély víz) egymással szoros

<sup>39</sup> AINSLIE et al. 2022.

<sup>40</sup> VENKATESHWARAN et al. 2026.

<sup>41</sup> HUANG–XU–LI 2025.

<sup>42</sup> CHAILLAT – DARBAS – LE LOUËR 2017.

kölcsönhatásban határozzák meg a mérhető URN-metrikákat. A szabványosítás – különösen az ISO 17208-1 és az ISO 17208-3 – azt jelzi, hogy a mérési geometria és a terjedési jelenségek figyelembevétele a metrika definíciójának része, nem pedig utólagos korrekció.

A vibroakusztikai modellezési módszerek palettája a gyors empirikus becslésektől a csatolt FEM-BEM és CFD + akusztikai analógia láncokig terjed. A módszertani összehasonlítás legfontosabb tanulsága, hogy a számítási részletesség növelése nem garantál automatikus pontosságnövekedést: a kavitációs és akusztikai bemeneti felületek, a numerikus hibák, valamint a validációs adatok szűkössége miatt a *high-fidelity* modellek is jelentős URN-diszkrépanciákat mutathatnak. Emiatt a tervezési *workflow*-ban a prediktív hierarchia és a validációs visszacsatolás központi szerepe megkerülhetetlen.

A kutatási hiányosságok a *broadband* validáció, a bizonytalanságkezelés és a digitális iker/valós idejű predikció irányában koncentrálnak. E területek fejlődése várhatóan a standardizált mérési gyakorlat bővülésével, a terjedési modellezés és a vibroakusztika integrált kezelésével, valamint a csatolt rendszerek számítási csökkentésével érheti el azt a szintet, ahol a haditechnikai alkalmazhatóság a tervezési ciklusokban is megbízhatóan megjelenik.

A tanulmány eredményei a haditechnikai és hajóakusztikai területen dolgozó szakemberek számára elsősorban abban nyújthatnak támogatást, hogy rendszerszinten értelmezhetővé teszik a víz alatti kisugárzott zaj fő forrásait, a kapcsolódó predikciós láncokat és a validáció korlátait. Ez különösen hasznos lehet korai tervezési döntések, mérési kampányok előkészítése, valamint zajcsökkentő beavatkozások rangsorolása során. A kutatás folytatásának fő irányai közé tartozik a teljes méretű, szabványkompatibilis validációs adatbázisok bővítése, a sekélyvízi bizonytalanságok pontosabb kezelése, a modellcsökkentési eljárások fejlesztése, valamint a digitális iker alapú, részben valós idejű predikciós keretek kialakítása.

## Felhasznált irodalom

- AINSLIE, Michael A. et al. (2022): International Harmonization of Procedures for Measuring and Analyzing of Vessel Underwater Radiated Noise. *Marine Pollution Bulletin*, 174. Online: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113124>
- AINSLIE, Michael A. – LEIGHTON, Timothy G. (2015): Sonar Equations for Planets and Moons. In *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Congress on Sound and Vibration (ICSV22)*, Florence Italy 12–16 July 2015. Online: [https://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/AinslieLeighton2015\\_Forence.pdf](https://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/AinslieLeighton2015_Forence.pdf)
- ALVES PEREIRA, F. et al. (2024): *ITTC Recommended Procedures and Guidelines. Model-Scale Propeller Cavitation Noise Measurements*. International Towing Tank Conference. Online: <https://www.ittc.info/media/11828/75-02-03-039.pdf>
- Britannica (2012): SOFAR Channel. *Encyclopædia Britannica*, 2012. szeptember 6. Online: <https://www.britannica.com/science/SOFAR-channel>
- CHAILLAT, Stéphanie – DARBAS, Marion – LE LOUËR, Frédérique (2017): Fast Iterative Boundary Element Methods for High-Frequency Scattering Problems in 3D Elastodynamics. *Journal of Computational Physics*, 341, 429–446. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.04.020>
- HOWARD, Carl Q. (2011): Recent Developments in Submarine Vibration Isolation and Noise Control. In *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Submarine Science Technology and Engineering Conference* (Adelaide 8–10 November 2011), 283–288. University of Adelaide Digital Library. Online: <https://digital.library.adelaide.edu.au/items/818df72b-a66a-477e-a50b-f84dd144ff70>

- HUANG, Xin – XU, Rongwu – LI, Ruibiao (2025): An Online Prediction Method for Ship Underwater Radiated Noise Based on Differential Evolution Feature Optimization and Ensemble Method. *Ocean Engineering*, 333. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121517>
- IULIANO, Andrea – CASUSCELLI, Francesca – DE ANGELIS, Emilio (2025): Vibro-Acoustic Simulations for Prediction of Underwater Radiated Noise from Onboard Machinery. In *Technology and Science for the Ships of the Future*, NAV 2025 Proceedings. Online: <https://doi.org/10.3233/PMST250020>
- Indian Register of Shipping (2025): *Guidelines on Underwater Radiated Noise and Measurements*. Revision 1. March 2025. IRS-G-DES-15. Indian Register of Shipping. Online: [https://www.irclass.org/media/7786/irs-guidelines-on-underwater-radiated-noise\\_rev-1\\_march-2025.pdf](https://www.irclass.org/media/7786/irs-guidelines-on-underwater-radiated-noise_rev-1_march-2025.pdf)
- International Maritime Organization (2019): *MEPC 74/INF.28 Ship Underwater Radiated Noise Technical Report and Matrix (Canada)*. Marine Environment Protection Committee 74<sup>th</sup> session 8 March 2019. International Maritime Organization, London. Online: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/NOISE/MEPC%2074-INF.28%20-%20Ship%20underwater%20radiated%20noise%20technical%20report%20and%20matrix%20%28Canada%29.pdf>
- International Organization for Standardization (2016): ISO 17208-1:2016 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization (2025): ISO 17208-3:2025 Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 3: Requirements for measurements in shallow water. Geneva: ISO.
- KHRAISAT, Qais Shehadeh – PERSSON, Martin – BENSOW, Rickard E. (2026): Cavitation Underwater Radiated Noise Methodology Applied to a Propeller Operating In-Behind Condition. *Ocean Engineering*, 349. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124084>
- KITA, Kristen R. – RANDENI, Supun – DIBIASO, Dino – SCHMIDT, Henrik (2022): Passive Acoustic Tracking of an Unmanned Underwater Vehicle Using Bearing-Doppler-Speed Measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*, 151(2), 1311–1324. Online: <https://doi.org/10.1121/10.0009568>
- KUPERMAN, William A. – LYNCH, James F. (2004): Shallow-Water Acoustics. *Physics Today*, 2004. október 1. Online: <https://doi.org/10.1063/1.1825269>
- LENIOWSKA, Lucyna (2008): Influence of Damping and Fluid Loading on the Plate Vibration Control. *Archives of Acoustics*, 33(4), 531–540. Online: <https://distantreader.org/stacks/journals/aa/aa-550.pdf>
- LIANG, Tengfei – WANG, Junpeng – XIAO, Jinyou – WEN, Lihua (2019): Coupled BE–FE Based Vibro-acoustic Modal Analysis and Frequency Sweep Using a Generalized Resolvent Sampling Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345, 518–538. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.09.038>
- Massachusetts Institute of Technology (2009): *Basic Physics of Underwater Acoustics*. MIT OpenCourseWare 2.017J Design of Electromechanical Robotic Systems. Online: [https://ocw.mit.edu/courses/2-017j-design-of-electromechanical-robotic-systems-fall-2009/9647b0bb5dbe2f570cb14fe0a4c58d0a\\_MIT2\\_017JF09\\_acoustics.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/2-017j-design-of-electromechanical-robotic-systems-fall-2009/9647b0bb5dbe2f570cb14fe0a4c58d0a_MIT2_017JF09_acoustics.pdf)
- MOORE, Stephen (2019): Acoustic Signature Control on Maritime Platforms. In *Proceedings of Acoustics 2019: Sound Decisions – Moving Forward with Acoustics*. Australian Acoustical Society Annual Conference Cape Schanck Victoria Australia, 1–12. Online: [https://acoustics.asn.au/conference\\_proceedings/AAS2019/papers/p72.pdf](https://acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2019/papers/p72.pdf)
- National Physical Laboratory (2000): *Technical Guides – Speed of Sound in Sea-Water: Effects of Salinity Temperature and Pressure*. Online: [https://www.comm-tec.com/library/technical\\_papers/speedsw.pdf](https://www.comm-tec.com/library/technical_papers/speedsw.pdf)
- ROBINSON, Stephen P. – LEPPER, Paul A. – HAZELWOOD, Richard A. (2014): *Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement*. NPL Good Practice Guide No. 133. National Physical Laboratory. Online: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/gpg133underwater.pdf>

- RODRIGO S., F. Javier et al. (2023): Analysis of the Underwater Radiated Noise Generated by Hull Vibrations of the Ships. *Sensors*, 23(2). Online: <https://doi.org/10.3390/s23021035>
- SEZEN, Savas – ATLAR, Mehmet (2022): Marine Propeller Underwater Radiated Noise Prediction with the FWH Acoustic Analogy Part 3: Assessment of Full-Scale Propeller Hydroacoustic Performance versus Sea Trial Data. *Ocean Engineering*, 266. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112712>
- SMITH, Tom A. – LA ROSA, Andrea G. – WOOD, Bill (2024): Underwater Radiated Noise from Small Craft in Shallow Water: Effects of Speed and Running Attitude. *Ocean Engineering*, 306. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118040>
- SMITH, Tom A. – RIGBY, Jake (2022): Underwater Radiated Noise from Marine Vessels: A Review of Noise Reduction Methods and Technology. *Ocean Engineering*, 266. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112863>
- SPENCE, Jesse et al. (2007): A Summerx of Existing and Future Potential Treatments for Reducing Underwater Sound from Oil and Gas Industry Activities (NCE Report 07-001). Noise Control Engineering, Inc. Online: <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2007.4449420>
- VENKATESHWARAN, Akash – DEO, Indu K. – JAIMAN, Rajeev K. (2026): MUTE-DSS: A Digital-Twin-Based Decision Support System for Minimizing Underwater Radiated Noise in Ship Voyage Planning. *Ocean Engineering*, 343. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123343>

## Rövidítésjegyzék és fontosabb fogalmak

URN – *underwater radiated noise*, víz alatti kisugárzott zaj  
 FSI – *fluid–structure interaction*, folyadék–szerkezet kölcsönhatás  
 FEM – *finite element method*, végelelemes módszer  
 BEM – *boundary element method*, határelemes módszer  
 CFD – *computational fluid dynamics*, számítógépes áramlástani szimuláció  
 RANS/DES/LES – eltérő részletességű turbulenciamodellek  
 FRF – *frequency response function*, frekvenciaátviteli függvény  
 SPL – *sound pressure level*, hangnyomásszint  
 CPA – *closest point of approach*, legkisebb megközelítési távolság  
 Broadband validáció – szélessávú validáció, vagyis a modell és a mérés egyezésének vizsgálata nemcsak egyes tonális csúcsoknál, hanem a teljes szélessávú spektrum mentén is  
 Workflow – munkafolyamat vagy számítási lánc  
 High-fidelity modell – nagy részletességű, nagy számítási igényű modell





Mészáros Zalán,<sup>1</sup>  Berek Tamás<sup>2</sup> 

# A 2M39 Poszeidón nukleáris fegyverrendszer hatásainak vizsgálata víz alatti nukleáris robbantások eredményei alapján

## Assessment of the Effects of the 2M39 "Poseidon" Nuclear-Armed UUV Based on Underwater Nuclear Explosions

*A tanulmány a nukleáris meghajtású víz alatti autonóm eszközök, különösen az orosz 2M39 Poszeidón rendszer működési elvét és várható hatásait vizsgálja. Az elemzés amerikai és szovjet nukleáris kísérletek eredményeire támaszkodik, különös tekintettel az Operation Crossroads, Operation Wigwam és Operation Hardtack tesztekre. A vizsgálat kimutatja, hogy a víz alatti nukleáris robbantások esetén a lökéshullám és a gázbuborék-oszcilláció kulcsszerepet játszik a romboló hatás kialakulásában. A víz közegében a túlnyomás lassabban csökken, így a robbanások hatása nagyobb térfogatban érvényesül, mint légköri robbanások esetén. Az eredmények ugyanakkor nem támasztják alá a „radioaktív cunami” koncepció realitását. A leghatékonyabb alkalmazás inkább haditengerészeti kötelékek és kikötői infrastruktúrák ellen valószínűsíthető. A tanulmány megállapítja, hogy a Poszeidón rendszer a hidegháborús nukleáris torpedókoncepciók modern továbbfejlesztésének tekinthető, amely jelentős, de körülményfüggő katonai képességekkel rendelkezik.*

**Kulcsszavak:** víz alatti nukleáris robbantás, nukleáris torpedó, Poszeidón (2M39)

*This study examines the operational concept and potential effects of nuclear-powered underwater autonomous vehicles, with particular focus on the Russian 2M39 "Poseidon" system.*

<sup>1</sup> Doktori hallgató, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi Doktori Iskola, e-mail: [ssgtzalan@gmail.com](mailto:ssgtzalan@gmail.com)

<sup>2</sup> Egyetemi tanár, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Harctámogató Tanszék, e-mail: [berek.tamas@uni-nke.hu](mailto:berek.tamas@uni-nke.hu)

*Using historical nuclear test data as an analytical baseline, the paper evaluates the destructive mechanisms and realistic capabilities of underwater nuclear detonations. The analysis draws on documented results from U.S. and Soviet underwater nuclear test programmes, including Operation Crossroads (Baker), Operation Wigwam, and Operation Hardtack. These experiments provide empirical evidence on shock wave propagation, gas bubble dynamics, and radiological contamination in maritime environments. Findings indicate that underwater nuclear explosions produce significantly higher peak pressures and more efficient energy transfer to submerged targets compared to air bursts. The primary destructive mechanisms include the initial shock wave and subsequent gas bubble oscillations, both of which can cause severe structural and functional damage to naval vessels, even without direct contact. However, the study also demonstrates that widely cited concepts such as "nuclear tsunami" effects are not supported by historical test data. Instead, the most effective application of such weapons would likely be against naval formations and port infrastructure within confined or shallow-water environments. The paper concludes that systems such as Poseidon represent a continuation of Cold War-era concepts adapted to modern technological frameworks, offering significant but context-dependent military capabilities.*

**Keywords:** underwater nuclear explosion, nuclear torpedo, Poseidon (2M39)

## Bevezetés

Legutóbb 2025 őszén tesztelte Oroszország a Poszeidón (NATO-kód: Kanyon) interkontinentális hatótávolságú, nukleáris meghajtású, pilóta nélküli víz alatti járművet (UUV), amelynek tényét 2025. október 29-én Vlagyimir Putyin, az Orosz Föderáció elnöke hivatalosan is bejelentette.

Mintegy 7 évvel korábban, 2018. március 1-jén évértékelő beszédében Vlagyimir Putyin hat új fegyverrendszert mutatott be, amelyeket az orosz hadsereg fejlesztett, tesztelt, és a tervek szerint rendszerbe kíván állítani. A bemutatott rendszerek a következők voltak:<sup>3</sup>

- RS–28 Sarmat: több robbanófejes, nagy hatótávolságú interkontinentális ballisztikus rakéta;
- Avangard: hiperszonikus sikló harci egység, amely interkontinentális ballisztikus rakétáról indítva, nagy sebességgel és manőverezőképeséggel közelíti meg célját;
- A H–47M2 Kinzsal – repülőről indítható, hiperszonikus ballisztikus rakéta, amelyet már a szíriai polgárháborúban<sup>4</sup> és az orosz–ukrán háborúban is alkalmaztak;
- 9M730 Burevesztnyik: nukleáris meghajtású robotrepülőgép, amelynek tervezett hatótávolsága elméletileg korlátlan;
- 2M39 Poszeidón (korábban Status–6): nukleáris meghajtású, nagy hatótávolságú víz alatti autonóm eszköz;
- Pereszvet: harci lézerkomplexum.

<sup>3</sup> TASS 2018a.

<sup>4</sup> Avia 2021.

A fegyverek fő célja, hogy képesek legyenek kikerülni az amerikai rakétavédelmi rendszereket.<sup>5</sup> A program indoklásában szerepelt többek között a Lengyelországban és Romániában telepített rakétaelhárító rendszerek, az amerikai haditengerészet ballisztikusrakéta-elhárító képessége, valamint az Egyesült Államok kilépése az 1972-es ballisztikusrakéta-elhárító egyezményből.

A 2018-as bejelentést követően több szakértő kétségét fejezte ki a bemutatott rendszerek tényleges fejlettségi szintjével kapcsolatban. A későbbi, nyilvánosságra hozott teszteredmények ugyanakkor arra utalnak, hogy egyes fegyverek – különösen a 2M39 Poszeidón és a 9M730 Burevesztnyik – fejlesztése valóban előrehaladott állapotban van.

A Poszeidónt a tesztkísérleteket követően a 2022-ben üzembe helyezett Belgorod nukleáris tengeralattjárón tervezik telepíteni, de 2025-ben már vízre szállt a kifejezetten Poszeidón hordozására tervezett nukleáris tengeralattjáró, a Habarovszk is, amely a Belgoroddal ellentétben hat torpedó szállítására képes, ugyanakkor egy harmadik tengeralattjáró-terv – a 09853-as projekt – is fejlesztés alatt áll. A jelentések szerint Oroszország 32 darab Poszeidón UUUV<sup>6</sup>-t rendelt.<sup>7</sup> A TASS az orosz katonai-ipari komplexum egyik forrására hivatkozva arról számolt be, hogy a Poszeidón rendszer 2027-ig szerepelt az állami fegyverkezési programban, és a program vége előtt rendszeresíteni kell a haditengerészetnél. A nagysebességű mélytengeri torpedóra különböző nukleáris robbanófejeket lehet telepíteni, amelyek hatóereje elérheti a 2 Mt-t.<sup>8</sup>

Az alkalmazási cél és a hatóerő ismeretében szakújságírói és szakértői körökben diskurzus kezdődött a fegyverrendszer várható hatásairól, mivel a tervezett rendszerbe állítás határideje közeledik.

Több, elsősorban sajtó- és közvéleményre ható forrás próbálja érzékeltetni az új fegyverrendszer különböző területeken kifejtett hatását, továbbá igyekszik érzékeltetni pusztító jellegét különböző hatástényezők bemutatásával. Az egyik ilyen vélekedés, hogy a Poszeidón képes lehet „radioaktív cunamit” kelteni. Tekintettel arra, hogy egy víz alatt felrobbantott nukleáris fegyver által keltett detonáció hatalmas energiája valóban komoly mértékű és pusztító energiahullámokat keltene, arra sarkallja a gondolkodást, hogy elképzelhetőnek tartsa egy világvégeszzerű pusztító hatású cunami kialakulását, ugyanakkor a víz alatti nukleáris robbantások által keltett lökéshullám terjedését vizsgáló kutatások és az ott bemutatott fizikai modellek inkább árnyalják vagy megkérdőjelezzik ezt a feltételezést.

## Módszertan

A tanulmány célja, hogy a rendelkezésre álló korlátozott nyilvános információk alapján bemutassa az új fegyverrendszert, valamint értékelje annak lehetséges alkalmazási módját, különös figyelemmel a víz alatti nukleáris robbanás által keltett lökéshullám lehetséges hatásaira, elsősorban a korábbi víz alatti nukleáris robbantási kísérletek eredményeinek bemutatására támaszkodva. A tanulmány kvalitatív, összehasonlító elemzést alkalmaz, amely a hidegháborús időszakban végrehajtott víz alatti nukleáris kísérletek dokumentált eredményeinek

<sup>5</sup> SOTT 2018.

<sup>6</sup> *Unmanned underwater vehicle – UUUV.*

<sup>7</sup> GWADERA 2025.

<sup>8</sup> TASS 2018b.

feldolgozásán alapul. Az elemzés elsődleges forrásai az Operation Crossroads, Operation Wigwam és Operation Hardtack tesztek hivatalos jelentései, valamint a nukleáris robbanások fizikai hatásait összefoglaló szakirodalom. A vizsgálat célja a víz alatti nukleáris robbanások hatásmechanizmusainak azonosítása és összehasonlítása, különös tekintettel a lökéshullám és a gázbuborék-oszcilláció szerepére. Az egyes kísérletek eredményei alapján kvalitatív módon határozzuk meg a különböző károsodási zónákat, valamint azok távolság- és energiafüggését. A tanulmány nem törekszik pontos numerikus modellezésre, hanem a rendelkezésre álló empirikus adatok és fizikai törvényszerűségek alapján fogalmaz meg következtetéseket a modern víz alatti fegyverrendszerek – különösen a 2M39 Poszeidón – feltételezett hatásaira vonatkozóan.

## Nukleáris torpedók fejlesztése a Szovjetunióban

A Szovjetunió már az 1940-es években megkezdte a nukleáris töltetű torpedók fejlesztésére irányuló kutatásokat. Ezek a fejlesztések elsősorban a T–5 és a T–15 típusokban öltöttek testet, a program tényleges megindulása 1951-re tehető. A két torpedót eltérő katonai célokra tervezték. A T–5 egy szabványos, 533 mm-es torpedócsőből indítható fegyver volt, amely lehetővé tette a nukleáris csapásmérő képesség integrálását a meglévő tengeralattjáró- és részben felszíni flottába. Ez jelentősen növelte volna a szovjet haditengerészet harcászati rugalmasságát. A T–5 torpedót RDS–9 típusú nukleáris robbanófejjel szerelték fel, amelynek hatóerejére vonatkozóan eltérő adatok állnak rendelkezésre, de a becslések szerint 3–10 kilotonna (kt) közé esett. A fegyvert éles harci helyzetben nem alkalmazták; a rendelkezésre álló adatok szerint kizárólag kísérleti és tesztcélokra használták. A Szovjetunió több víz alatti nukleáris robbantást hajtott végre, azonban a kifejezetten torpedófegyverhez kapcsolódó tesztek száma korlátozott volt.<sup>9</sup> Az első ilyen teszt során 1955. szeptember 21-én 12 m mélyen robbantották fel, a becsült hatóenergia 3,5 kt volt. A kihelyezett mintegy 30 célhajó (köztük 4 romboló, 3 tengeralattjáró, aknaszedők) 300 és 1600 m távolságra helyezkedtek el. 2 évvel később, 1957. október 10-én szintén végrehajtottak a torpedóval egy tesztet, illetve szintén rombolók és tengeralattjárók voltak a célpontok. A robbantás 30 m mélységben történt, a robbanás 10 kt hatóerejű volt. A harmadik robbantást 1961. október 23-án hajtották végre, egy 4,8 kt hatóerejű fegyvert robbantottak fel 20 m mélységben. Érdemes megjegyezni, hogy itt már nem használtak célhajókat, valószínűleg az első két teszt során túl sok célhajó süllyedt el vagy rongálódott meg súlyosan.<sup>10</sup>

A kísérleti eredmények alapján a víz alatti nukleáris robbantások hajók és tengeralattjárók ellen hatékonyak bizonyultak. A T–5 torpedó 1958-ban állt hadrendbe 53–58 típusjelzéssel. Az 1960-as évek elején azonban a szovjet haditengerészet felhagyott a dedikált nukleáris torpedók koncepciójával, ehelyett cserélhető robbanófejek alkalmazása mellett döntött, ami nagyobb rugalmasságot biztosított a fegyverrendszerek használatában. A T–15 torpedó fejlesztése a T–5-tel párhuzamosan zajlott, és kezdetben még a haditengerészet elől is titokban tartották. A fegyvert kifejezetten kikötők és part menti városi célpontok elleni alkalmazásra

<sup>9</sup> International Atomic Energy Agency 2004.

<sup>10</sup> KHALTURIN et al. 2005.

tervezték. Nagy méretű kialakítása miatt a korabeli tengeralattjárók nem voltak alkalmasak a hordozására, ezért egy speciális, nukleáris meghajtású hordozó tengeralattjáró fejlesztését is tervbe vették. A T-15 torpedó egy elektromos meghajtású, 1550 mm átmérőjű, mintegy 24 m hosszúságú és körülbelül 40 t tömegű eszköz lett volna, hozzávetőlegesen 30 km hatótávolsággal. A tervezett robbanófej több megatonna hatóerejű nukleáris töltetet tartalmazott volna.<sup>11</sup> Az alkalmazási koncepció szerint az új tengeralattjáró megközelítve a kijelölt kikötővárost vagy haditengerészeti támaszpontot indította volna a T-15 torpedót, majd elhagyta volna a műveleti területet.

A haditengerészet bevonását követően a fejlesztés jelentős szakmai ellenállásba ütközött. A koncepció egyik fő problémája az volt, hogy a hordozó tengeralattjárónak viszonylag kis távolságra – mintegy 30 km-re – kellett volna megközelítenie jól védett haditengerészeti bázisokat, ami jelentős kockázatot jelentett. További kifogásként merült fel, hogy a korlátozott erőforrások felhasználásával egy olyan erősen specializált tengeralattjáró-típus fejlesztése nem tekinthető hatékonynak, amely kizárólag egyetlen fegyverrendszer hordozására alkalmas.

A haditengerészet ellenállása, valamint a ballisztikus rakéták gyors fejlődése végül a T-15 program leállításához vezetett. A Project 627-es tengeralattjárókat ugyanakkor megépítették, amelyek később a November osztályú nukleáris meghajtású vadász-tengeralattjárók alapját képezték, és az 1990-es évek elejéig rendszerben maradtak.

A stratégiai környezet változásával a nukleáris fegyverrendszerek fejlesztési prioritásai is átalakultak. A ballisztikus rakéták megjelenése hosszú időre háttérbe szorította az ilyen jellegű koncepciókat, azonban a későbbi évtizedekben – különösen a rakétavédelmi rendszerek elterjedésével – ismét megjelent az igény olyan alternatív hordozóeszközök iránt, amelyek képesek megkerülni ezeket a védelmi rendszereket.

## A 2M39 (Poszeidón, Kanyon) az új orosz nukleáris csapásmérő eszközök között

2015-ben jelentek meg az első hírek arról, hogy Oroszország egy új víz alatti autonóm nukleáris meghajtású eszközt fejleszt. Ugyanezen év november 10-én egy televíziós közvetítés során vált láthatóvá az „Óceáni többcélú rendszer” Status-6 kódnévvel. A nyilvánosságra került felvételeken már felismerhetők voltak a később 2M39 Poszeidón néven ismertté vált rendszer alapvető körvonalai.<sup>12</sup>

A megközelítőleg 1,6 m átmérőjű, mintegy 24 m hosszú torpedó orr-résztében helyezkedik el a robbanófej, amely nukleáris vagy hagyományos töltettel egyaránt felszerelhető. A bejelentett adatok szerint az eszköz maximális merülési mélysége elérheti az 1000 m-t, sebessége körülbelül 185 km/h, hatótávolsága pedig mintegy 10 000 km. A feltételezett alkalmazási területek közé tartoznak a part menti városok és kikötők elleni támadások, haditengerészeti kötelékek elleni műveletek, aknatelepítés, valamint tengeralattjárók elleni alkalmazás.

<sup>11</sup> POLMAR 2018.

<sup>12</sup> Army Recognition 2015.

A 2015-ben nyilvánosságra került információk ellenére a rendszer fejlesztése korábbi időszakra vezethető vissza. A kiszivárogtatott dokumentumban megjelölt torpedó hordozó-platformja a B–90 Szarov tengeralattjáró, amely a Kilo-osztály egy módosított változatának tekinthető. Ez egy dízel-elektromos hajtású különleges tengeralattjáró, amelyet kísérleti platformnak használnak. Eredetileg is új fegyverek tesztelésére épült, és úgy módosították, hogy egy darab Poszeidont is indíthasson.<sup>13</sup> Az 1. táblázat összefoglalja a tengeralattjáró főbb paramétereit.

1. táblázat: B-90 Sarov főbb műszaki adatai

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Vízszorítás (felszínen) | 2300 tonna |
| Vízszorítás (lemerülve) | 3950 tonna |
| Hossz                   | 72,6 méter |
| Hajótest átmérője       | 9,9 méter  |
| Sebesség (felszínen)    | 10 csomó   |
| Sebesség (lemerülve)    | 17 csomó   |
| Merülési mélység        | 300 méter  |

Forrás: [https://russianships.info/eng/submarines/project\\_20120.htm](https://russianships.info/eng/submarines/project_20120.htm)

2012-re befejeződött a Szarov tengeralattjáró végleges átépítése, amely ezt követően alkalmassá vált a Poszeidón rendszer hordozására. A Szarov mellett a K–329 Belgorod tengeralattjárót is felkészítették a 2M39 rendszer integrálására és alkalmazására.

A K-329 Belgorod a világ leghosszabb tengeralattjárója, egy átalakított Oscar-II osztályú atom-tengeralattjáró. 2022 júliusában átadták a haditengerészetnek, jelenleg pedig az Északi Flotta kísérleti egységeként szolgál. A Belgorod közepén speciális, megnagyobbított torpedórekeszek vannak, és 6 db Poszeidón szállítására képes egyszerre. A Habarovszk pedig egy vadonatúj, speciálisan Poszeidón hordozására tervezett atom tengeralattjáró osztály első egysége. Ez a típus kisebb, mint a Belgorod, és dedikáltan 6 Poszeidón befogadására tervezték. A hírek szerint a Habarovszk is az Északi Flottához kerül majd először, és a későbbiekben egy ugyanilyen osztályú egység csatlakozik a Csendes-óceáni Flottához is. A Poszeidón-program keretében legalább 3 tengeralattjáró fog rendszerbe állni (1 Belgorod és 2 Habarovszk-osztályú) 2027-ig, hogy mindkét flottánál legyen egy-egy Poszeidón-hordozó alegység.<sup>14</sup>

Ezek a folyamatok azt mutatják, hogy hamarosan feltételezhetően számolni kell a víz alatti nukleáris torpedó jelenlétével.

## A víz alatti atomrobbantások hatásai

A sajtóban megjelent értelmezések szerint a Poszeidón egy olyan fegyver lehet, amely sekély vízben végrehajtott nukleáris robbantás révén képes jelentős romboló hatás kifejtésére, gyakran „radioaktív cunamiként” leírt jelenségekhez kapcsolva.<sup>15</sup>

<sup>13</sup> PAPASTERGIOU 2025.

<sup>14</sup> JOHNS 2024.

<sup>15</sup> VASILYEVA 2025.

A rendelkezésre álló történeti adatok alapján azonban a sekélyvízi nukleáris robbantások hatásai jól vizsgálhatók a hidegháború során végrehajtott kísérletek eredményei alapján. Az 1940-es évek közepétől az 1950-es évek végéig az Egyesült Államok és a Szovjetunió több víz alatti nukleáris robbantást hajtott végre. Ezeket a kísérleteket az 1963-as Részleges Atomcsend Egyezményt követően már nem folytatták.

A víz alatti robbantásokat alapvetően két fő típusba sorolhatjuk: sekélyvízi és mélyvízi robbantás. A két típus hatásmechanizmusa jelentősen eltér egymástól, és különösen a sekélyvízi robbantások esetében a környezeti feltételek – például a vízmélység és a tengerfenék közelsége – meghatározó szerepet játszanak.

A sekélyvízi robbantások esetében bizonyos körülmények között jelentős felszíni és szerkezeti károsodás alakulhat ki, amint azt a későbbiekben részletezett Operation Crossroads Baker teszt is mutatta. Ugyanakkor más kísérletek, például az Operation Hardtack Umbrella teszt, rámutattak arra, hogy a hatások mértéke erősen körülményfüggő.

Mélyvízi robbantások esetén a robbanás mélysége kulcsfontosságú paraméter, amely meghatározza a felszínen jelentkező hatások mértékét és jellegét. Általánosságban a víz alatti robbantásokról elmondható, hogy a túlnyomás csúcsa nem csökken olyan gyorsan a távolság növekedésével, mint a levegőben. Ezért a vízben a csúcsértékek sokkal magasabbak, mint ugyanolyan távolságban egy azonos erejű, levegőben végbement robbanás esetén. Például a mélyvízben bekövetkező 100 kt robbanás 1 km távolságban mért csúcstúlnyomása körülbelül 186 bar, míg a levegőben bekövetkező robbanásnál ez az érték csak 1–2 bar.<sup>16</sup>

## Sekélyvízi atomrobbantás hatásai

Az Operation Crossroads keretében végzett Baker-teszt során 1946. július 25-én a Bikini-atoll lagúnájában egy víz alatti nukleáris robbantást hajtottak végre. A mintegy 21 kt hatóerejű nukleáris eszközt körülbelül 27 m mélységben, az LSM-60 partra szállító hajóhoz rögzítve robbantották fel. A kísérlet célja a víz alatti nukleáris robbanások hadihajókra gyakorolt hatásának vizsgálata volt. A robbanás következtében nagy méretű vízoszlop (*spray column*) és intenzív víz alatti lökeshullám alakult ki. A robbanás közvetlen közelében elhelyezkedő hajók súlyos szerkezeti károsodást szenvedtek. A USS Arkansas csatahajó gyakorlatilag azonnal elsüllyedt, míg a USS Saratoga repülőgép-hordozó és a japán Nagato csatahajó súlyosan megsérült, és később süllyedt el. A kísérletben részt vevő tengeralattjárók – köztük a USS Apogon, USS Skipjack és USS Pilotfish – szintén jelentős károsodást szenvedtek. A megfigyelések alapján a rombolás elsődleges oka a vízben terjedő lökeshullám volt. A robbanás epicentrumától távolodva a károsodás mértéke csökkent, ugyanakkor még jelentős távolságokban is kimutatható volt a szerkezeti károsodás. A teszt eredményei rámutattak arra, hogy a víz alatti nukleáris robbanások esetében a lökeshullám és a kapcsolódó hidrodinamikai jelenségek – beleértve a vízoszlop kialakulását és a másodlagos nyomáshullámokat – kulcsszerepet játszanak a hajók elleni romboló hatás kialakulásában. A Baker-teszt tapasztalatai alapján megállapítható, hogy

<sup>16</sup> GLASSTONE–DOLAN 1977.



a víz alatti nukleáris robbanások különösen hatékonyak a felszíni hadihajók és tengeralattjárók elleni alkalmazásban.<sup>17</sup>

A partra érkező hullámok úgynevezett törő hullámok voltak, ezen hullámméretek azonban nem okoznának nagy pusztítást a kikötői létesítményekben.

A fő problémát a sugárszennyezettség jelentené. Ezt a robbantás mélysége határozná meg, egészen pontosan az, hogy mekkora a távolság a tengerfenék és a robbantáspont között. A Baker-teszt tapasztalata az volt, hogy a hajók fedélzetén rendkívül magas sugárzási szinteket mértek, bár tény, hogy a hajók a robbanáshoz meglehetősen közel helyezkedtek el. A hajóknál leginkább a fedélzeten a festékbe bekerült sugárzó anyagok okoztak problémát.

Ugyanakkor a robbanástól távolabb elhelyezkedő egységek esetében a szennyezés mértéke lényegesen kisebb, és a tengervízben keletkező rövid felezési idejű izotópok – elsősorban a Na-24 – miatt a környezeti sugárzási szint viszonylag gyorsan csökken.<sup>18</sup> A vízben ugyanis leginkább Na-24-izotóp keletkezik 15 órás felezési idővel, így 150 óra (10 felezési idő) után már gyakorlatilag tisztának tekinthető a terület.

Az Operation Hardtack keretében végrehajtott Umbrella-teszt célja a sekély vízben végrehajtott nukleáris robbanások haditengerészeti eszközökre gyakorolt hatásainak vizsgálata volt, különös tekintettel a hajók szerkezeti elemeinek és fedélzeti rendszereinek sérülékenységre. A kísérlet során több, előzetesen kiválasztott és módosított célhajót alkalmaztak, köztük egy EC-2 típusú szállítóhajót (*SS Michael Moran*) és három rombolót (*Fullam, Howorth, Killen*), amelyeket a robbanás hatásainak mérésére szolgáló műszerekkel láttak el.<sup>19</sup>

Az 1958 júniusában végrehajtott Umbrella-teszt során egy 8 kt-s robbantást végeztek 46 m mélységben egy lagúnában. A robbantás során az *SS Michael Moren Liberty* osztályú szállító hajót, három *Fletcher*-osztályú rombolót, az *ex-USS Killent* (DD-593), az *ex-USS Howorth-t* (DD-592), az *ex-USS Fullamet* (DD-474), *SS Bonita* (SKK-3) tengeralattjárót tesztelték. A nyomás és a hullámok hatására az elektronika meghibásodott és motorikusan tönkrementek a hajók, de egyik sem süllyedt el, még a 884 m-re lévő tengeralattjáró sem. A *USS Moran* szállítóhajó azonban elvesztette a tengerállóságát, ezért a nyílt tengeren ágyútűzzel elsüllyesztették.<sup>20</sup>

A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a víz alatti nukleáris robbanás által keltett lökéshullám elsősorban a hajók fedélzeti berendezéseiben és mechanikai rendszereiben okozott jelentős károsodást, míg a hajótest szerkezeti deformációja sok esetben kisebb mértékű volt a vártnál. A vizsgálatok alapján a harcképesség szempontjából kritikus rendszerek sérülése gyakran meghatározóbbnak bizonyult, mint a közvetlen szerkezeti károsodás.<sup>21</sup>

A robbanás által keltett vízfelszíni hullámok magassága a távolság növekedésével gyorsan csökken. A robbanóerő növekedésével ugyanakkor a jelenség léptéke növekszik, amelyet a 2 Mt-ra skálázott görbe szemléltet (1. ábra).

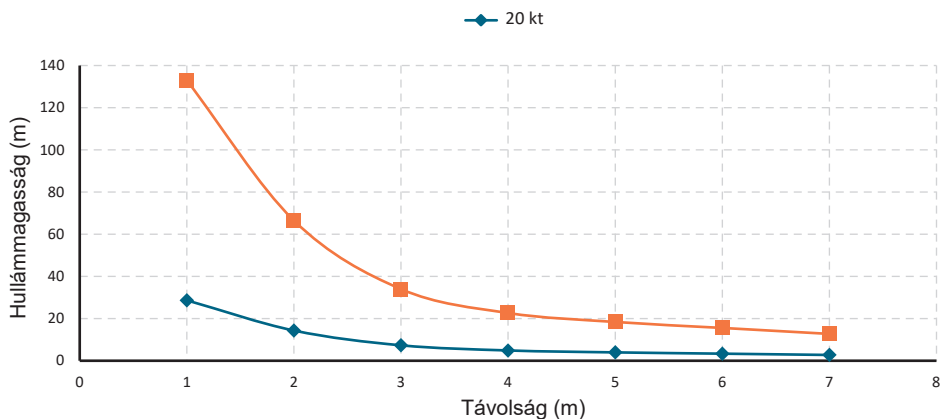
<sup>17</sup> U.S. Atomic Energy Commission 1946.

<sup>18</sup> GLASSTONE–DOLAN 1977.

<sup>19</sup> Defense Nuclear Agency 1958.

<sup>20</sup> Defense Nuclear Agency 1958.

<sup>21</sup> Joint Task Force Seven, Task Group 7.1, 1959; U.S. Atomic Energy Commission 1946.



1. ábra: A vízfelszíni hullámok maximális magassága a robbanástól mért távolság függvényében 20 kt hatóenergia esetén, valamint ennek közelítő skálázása 2 Mt-s robbantásra

Forrás: a szerzők szerkesztése GLASSSTONE–DOLAN 1977 alapján

Összességében megállapítható, hogy a szakirodalom szerint a sekélyvízi nukleáris robbantások nem generálnak klasszikus értelemben vett nagy hatótávolságú cunamit.

A Poszeidón akkor hatékony, ha a kikötő közepén robban fel úgy, hogy a parttól mért távolsága nem több, mint 1–2 km. Ez azonban nem egyszerű feladat, hiszen egy 24 m hosszú nukleáris meghajtású torpedóról beszélünk, továbbá a kikötőket erősen őrzik, és ezeken a területeken a tenger sem túl mély. Amennyiben ilyen célpontot akar valamelyik fél megsemmisíteni, alternatív fegyverrendszerek bizonyos esetekben hatékonyabb megoldást jelenthetnek (például föld-föld rakéta).

## A mélyvízi atomrobbanás hatásai

Vlagyimir Putyin úgy mutatta be a fegyvert, mint repülőgéphordozó-kötelékek távoli pusztításának hatékony eszközét. Valóban lehet számolni jelentős hatással, sőt elképzelhető több, a pusztítás szempontjából kedvező feltétel együttes teljesülésének nyomán akár végzetes flottapusztulás, azonban a felszíni hajók sérüléseinek meghatározása összetettebb egy nyílt vízi robbanás esetén.

A nagyenergiájú mélytengeri robbantás esetén a detonáció következtében kialakuló gáz-buborék jelentős méretű lehet, és amennyiben a buborék közvetlenül egy hajótest alatt alakul ki, a felhajtóerő ideiglenes megszűnése és a buborék dinamikus összeomlása súlyos szerkezeti károsodást okozhat, szélsőséges esetben a hajótest töréséhez is vezethet.

A mélyvízi nukleáris robbanás esetén a robbanás pillanatában létrejövő és pulzáló gáz-buborék elindul a felszín irányába és áttöri azt. A gázbuborék jelentős méretre tágul, majd a környező víznyomás hatására összeomlik, és több egymást követő oszcillációs cikluson megy

keresztül. E folyamat során ismételt nyomáshullámok keletkeznek, amelyek hozzájárulnak a szerkezeti terheléshez és a károsodási mechanizmusokhoz.<sup>22</sup>

A kísérletek azt mutatták, hogy amennyiben egy hajó a robbanás epicentruma felett van, akkor a megsemmisülése teljesen biztos. A Baker-teszt során a robbanás epicentruma felett lévő 60 m hosszú, 10 m széles, 1170 tonnás LSM-60 partra szállító hajó gyakorlatilag eltűnt, a maradványait se találták meg. Ugyanakkor figyelembe kell venni azt, hogy a mai modern nukleáris meghajtású repülőgép-hordozók ennél lényegesen nagyobbak. A legújabb a USS Gerald R. Ford, 100 000 t vízkiszorítású, 333 m hosszú, 78 m széles.<sup>23</sup> Azonban mindenképpen számolni kell a hajótest olyan súlyos károsodásával, amely a hajó teljes megsemmisüléséhez vezethet.

Amennyiben a robbanás nem közvetlenül a hajó alatt következik be, a keletkező gáz-buborék tágulási és összehúzódási ciklusai ismétlődő dinamikus terhelést generálnak. Ezek a buborékpulzusok a hajótesten ostorszerű lengéseket (*whipping*) keltenek, amelyek szintén jelentős szerkezeti deformációt okozhatnak. A hatás mértéke viszont a robbanás energiájától és a távolságtól függően csökken. A dinamikus terhelések különösen a fedélzeti mechanikai rendszerek működését befolyásolják. A nagy pontosságú illesztéseket igénylő egységek – például a hajtásrendszer elemei – a rezgések hatására elveszíthetik beállításukat, ami működésképtelenséghez vezethet. Emellett az elektromos és elektronikai komponensek, például a relék, szintén érzékenyek ezekre a terhelésekre, és károsodhatnak vagy meghibásodhatnak.<sup>24</sup>

Ez a jelenség jól megfigyelhető volt az Operation Wigwam és Hardtack tesztek során. Az Operation Wigwam (1955) az Egyesült Államok első mélyvízi nukleáris kísérlete volt. A mintegy 30 kt hatóerejű robbanóeszközt körülbelül 2000 láb (mintegy 600 m) mélységben robbantották fel. A kísérlet egyik fő célja a nukleáris mélységi robbanótöltetek tengeralattjárók elleni hatásának vizsgálata volt, különös tekintettel a lökéshullám szerkezeti következményeire, valamint a halálos hatótávolság becslésére.

A vizsgálatok során SQUAW típusú célobjektumokat alkalmaztak, amelyek nem hadrendben álló tengeralattjárók voltak, hanem kifejezetten nukleáris tesztek céljára kialakított, műszerezett kísérleti szerkezetek. A SQUAW egy megközelítőleg 134,6 láb (mintegy 41 m) hosszú, körülbelül 400 t tömegű, tengeralattjáró-típusú nyomástartó modell volt. A szerkezet hengeres testből, kúpos és félgömb alakú végzáró elemekből, valamint külső burkolatból és ballasztrendszerből állt, amely lehetővé tette a merülést és a stabil helyzet fenntartását. A kialakítás kifejezetten alkalmassá tette a szerkezetet a víz alatti robbanások során fellépő dinamikus terhelések és nyomáshullámok mérésére. A kísérlet során különös figyelmet fordítottak a lökéshullám terjedésére, a nyomásprofil mélységfüggésére, valamint a biztonságos alkalmazási távolság meghatározására.<sup>25</sup>

A mérések alapján a robbanás hatása erősen távolságfüggőnek bizonyult. Az 1570 m távolságban elhelyezett SQUAW-12 a jelentős, mintegy 58 bar maximális túlnyomás hatására rendkívül rövid időn belül teljesen megsemmisült. A körülbelül 2200 m-re elhelyezett

<sup>22</sup> GLASSTONE–DOLAN 1977.

<sup>23</sup> Global Security [é. n.].

<sup>24</sup> HAWASS et al. 2015.

<sup>25</sup> Naval Facilities Engineering Command 1978.

SQUAW-13 súlyos szerkezeti károsodást szenvedett, és kritikus állapotba került, azonban a nyomástest nem repedt fel. A mentési műveletek során a szerkezet végül elsüllyedt. Ezzel szemben a mintegy 3100 m-es távolságban elhelyezett SQUAW-29 csak korlátozott mértékű fizikai sérüléseket szenvedett, és nem süllyedt el. Az eredmények egyértelműen rámutattak arra, hogy a mélytengeri nukleáris robbantások hatása tengeralattjárók esetében erősen függ a robbanástól mért távolságtól, és jól meghatározható károsodási zónák különíthetők el.<sup>26</sup>

Az eredmények azt mutatták, hogy a víz alatti nukleáris robbanásoknak rendkívül nagy lokális pusztító hatása van, ugyanakkor ez a távolság növekedésével gyorsan csökken, és erősen függ a hidrológiai viszonyoktól.

A víz alatti robbanások esetében a maximális túlnyomás a távolság növekedésével lassabban csökken, mint légköri környezetben, és nagyságrendekkel magasabb értékeket érhet el.<sup>27</sup>

Az 1958 májusában végrehajtott Wahoo-teszt során egy körülbelül 9 kt hatóerejű nukleáris robbantást hajtottak végre mintegy 150 m mélységben. A kísérlet során a SQUAW-29 cél-objektum súlyos szerkezeti károsodást szenvedett. A robbanástól körülbelül 715 m-re elhelyezkedő Morgan típusú szállítóhajó gépészeti rendszerei károsodtak, ami a hajó mozgásképtelenné válásához vezetett. A mintegy 5470 m távolságban lévő USS Bonita (SSK-3) tengeralattjáró esetében a szerkezeti károsodás korlátozott maradt, azonban az elektronikai rendszerek olyan mértékben sérültek, hogy a hajó harc képtelenné vált, és javításra vissza kellett térnie.<sup>28</sup>

Megjegyzendő, hogy a vizsgált hajók a második világháború időszakában alkalmazott, viszonylag egyszerű elektronikai rendszerekkel voltak felszerelve. Ezek a rendszerek általában robusztusabb kialakításúak voltak, és kisebb mértékben voltak érzékenyek az elektromágneses és mechanikai behatásokra, mint a korszerű, nagy integráltságú modern fedélzeti rendszerek.

## Összegzés

A Wigwam-teszt eredményei alapján a mélytengeri nukleáris robbanások elsősorban lokális pusztító hatással rendelkeznek, és hatékonyságuk a távolság növekedésével jelentősen csökken. Ugyanakkor a robbanás közvetlen közelében rendkívül magas túlnyomásértékek alakulnak ki.

Az Operation Hardtack keretében végrehajtott Wahoo- és Umbrella-tesztek megerősítették a korábbi Baker- és Wigwam-kísérletek eredményeit, és átfogó képet adtak a víz alatti nukleáris robbanások hatásmechanizmusáról.

A vizsgálatok eredményei alapján a pusztító hatás elsődleges oka a lökéshullám által keltett mechanikai terhelés, amely elsősorban a fedélzeti berendezésekben és rendszerekben okoz károsodást, miközben a hajótest sok esetben strukturálisan épen maradhat.<sup>29</sup>

A Baker-, Wigwam-, Wahoo- és Umbrella-tesztek, valamint a szovjet víz alatti nukleáris kísérletek eredményei egyértelműen jelzik, hogy a víz alatti nukleáris robbantások hatékony romboló hatást fejtenek ki hadihajók, különösen tengeralattjárók ellen.

<sup>26</sup> Defense Nuclear Agency 1955.

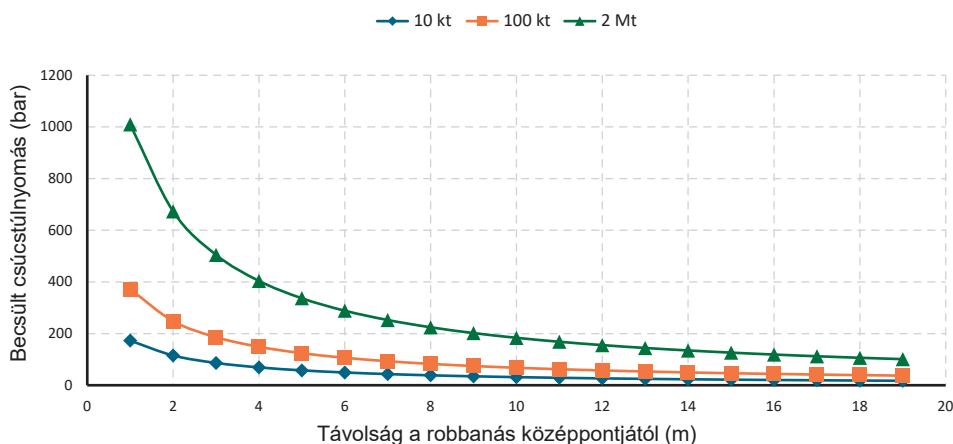
<sup>27</sup> GLASSTONE–DOLAN 1977.

<sup>28</sup> Defense Nuclear Agency 1958.

<sup>29</sup> U.S. Atomic Energy Commission 1958.

A Poszeidón esetében a becslések alapján egy több megatonnás víz alatti robbanás során a súlyos károsodási zóna kiterjedése elérheti a több kilométeres, akár 8–10 km-es nagyságrendet, azonban a teljes szerkezeti megsemmisülés ennél lényegesen kisebb távolságokra korlátozódik.

A 2. ábra szemlélteti, hogy a robbanóerő növekedésével a maximális túlnyomás értéke minden vizsgált távolságon emelkedik, ugyanakkor a nyomás csökkenése továbbra is erősen távolságfüggő.



2. ábra: Víz alatti robbanás becsült maximális túlnyomásának távolságfüggése 10 kt, 100 kt és 2 Mt robbanóerő esetén, közelítő modell

Forrás: a szerzők szerkesztése GLASSTONE–DOLAN 1977 alapján

A 2M39 nukleáris meghajtású autonóm víz alatti eszköz (UUV) olyan képességekkel rendelkező fegyverrendszer, amely jelentős hatást gyakorolhat a tengeri hadviselésre. Nagy merülési mélysége miatt nehezen érzékelhető, míg nagy sebessége korlátozza a hatékony ellentevékenységek lehetőségét. A rendelkezésre álló adatok alapján ugyanakkor nem támasztható alá, hogy a rendszer nagy hatótávolságú „radioaktív cunami” létrehozására lenne képes. Ezzel szemben a történeti kísérletek eredményei arra utalnak, hogy a fegyver hatékony lehet haditengerészeti kötelékek, különösen nagy értékű célpontok – például repülőgép-hordozók – ellen. A rendszer alkalmazása a kikötői infrastruktúra elleni műveletekben is releváns lehet, amennyiben képes a célterület közvetlen közelébe jutni. Ennek következtében a kikötővédelmi rendszerek fenntartása és fejlesztése továbbra is indokolt, mivel már a potenciális alkalmazás lehetősége is stratégiai hatást gyakorolhat.

Bár a koncepció alapjai nem tekinthetők újnak, a modern technológiai környezetben – különösen a tengeri autonóm rendszerek gyors fejlődése mellett – a hasonló eszközök szerepe várhatóan növekedni fog. Ez hosszabb távon új haditengerészeti és partvédelmi eljárások kialakítását teheti szükségessé.

## Felhasznált irodalom

- Army Recognition (2015): Secret Russian Navy Nuclear Torpedo System Status-6 Leaked in Television Report. *Army Recognition*, 2015. november 13. Online: <https://www.armyrecognition.com/archives/archives-naval-defense/naval-defense-2015/secret-russian-navy-nuclear-torpedo-system-status-6-leaked-in-television-report>
- Avia (2021): Истребитель МиГ-31К нанёс удар гиперзвуковой ракетой „Кинжал” по неизвестной цели в Сирии Подробнее на. *Avia*, 2021. június 29. Online: <https://avia.pro/news/istrebitel-mig-31k-nanyos-udar-giperzvukovoy-raketoy-kinzhal-po-neizvestnoy-celi-v-sirii>
- Defense Nuclear Agency for the Department of Defense (1955): *Operation Wigwam. United States Atmospheric Nuclear Weapons Tests, Nuclear Test Personnel Review*. Online: [https://www.sonibomb.com/content/atomic/docs/dna/1955\\_DNA6000F\\_WIGWAM.pdf](https://www.sonibomb.com/content/atomic/docs/dna/1955_DNA6000F_WIGWAM.pdf)
- Defense Nuclear Agency for the Department of Defense (1958): *Operation Hardtack I. United States Atmospheric Nuclear Weapons Tests, Nuclear Test Personnel Review*. Online: [https://www.dtra.mil/Portals/125/Documents/NTPR/newDocs/ANTHReport/1958\\_DNA\\_6038F.pdf](https://www.dtra.mil/Portals/125/Documents/NTPR/newDocs/ANTHReport/1958_DNA_6038F.pdf)
- GLASSTONE, Samuel – DOLAN, Philip J. (1977): *The Effects of Nuclear Weapons* (3<sup>rd</sup> ed.). U.S. Department of Defense & Energy Research and Development Administration. Online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6852629>
- Global Security [é. n.]: *CVN-78 Gerald R. Ford – Specifications*. Online: <https://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/cvn-78-specs.htm>
- GWADERA, Zuzanna (2025): Russia's Burevestnik and Poseidon Tests. *International Institute for Strategic Studies*, 2025. november 20. Online: <https://www.iiss.org/online-analysis/missile-dialogue-initiative/2025/11/russias-burevestnik-and-poseidon-tests/>
- HAWASS, Ahmed – MOSTAFA, Hosef – ELBEIH, Ahmed – EL-DAKHAKHNI, Wael (2015): Review on Underwater Explosion. In *Proceedings of the 46<sup>th</sup> International Annual Conference of ICT*. Karlsruhe, Germany. Online: [https://www.researchgate.net/publication/369037897\\_REVIEW\\_ON\\_UNDERWATER\\_EXPLOSION](https://www.researchgate.net/publication/369037897_REVIEW_ON_UNDERWATER_EXPLOSION)
- International Atomic Energy Agency (2004): *Nuclear Explosions in the USSR. The North Test Site Reference Material*. Online: <https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/waste-safety/north-test-site-final.pdf>
- JOHNS, Eliana (2024): Upgrades to Russia's Nuclear-Capable Submarine Fleet. *Federation of American Scientists*, 2024. július 2. Online: <https://fas.org/publication/submarine-upgrades-russia/>
- Joint Task Force Seven, Task Group 7.1. (1959). *Report to the Scientific Director: Report of the Commander Task Group 7.1, Operation HARDTACK, 1958*. U.S. Department of Defense.
- KHALTURIN, Vitaly I. – RAUTIAN, Tatyana G. – RICHARDS, Paul G. – LEITH, William S. (2005): A Review of Nuclear Testing by the Soviet Union at Novaya Zemlya, 1955-1990. *Science and Global Security*, 13(1-2), 1-42. Online: <https://doi.org/10.1080/08929880590961862>
- Naval Facilities Engineering Command (1978): *SQUAW Mooring and Structural Analysis Report (ADA163372)*. Defense Technical Information Center. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA163372.pdf>
- POLMAR, Norman (2018): Armaments and Innovation: The Big Torpedo. *Naval History Magazine*, 23(1). Online: <https://www.usni.org/magazines/naval-history-magazine/2018/february/armaments-and-innovation-big-torpedo>
- PAPASTERGIOU, Alex (2025): Poseidon: Russia's Seaborne Armageddon or Mind Game? *Grey Dynamics*, 2025. október 27. Online: <https://greynamics.com/poseidon-uuv-new-russian-nuclear-submarine-deterrent/>
- SOTT (2018): Putin vs Megyn Kelly Round 2: Full Text of NBC's Extensive Interview. *SOTT*, 2018. március 10. Online: <https://www.sott.net/article/379579-Putin-vs-Megyn-Kelly-round-2-Full-text-of-NBCs-extensive-interview-with-VIDEO>

- TASS (2018a): Восстановить ядерный паритет: новое супероружие России получило „свидетельства о рождении”. TASS, 2018. március 23. Online: <https://tass.ru/armiya-i-opk/5060255>
- TASS (2018b): Беспилотный подводный аппарат „Posejdon”. Dos'e [Poszeidón pilóta nélküli víz alatti eszköz. Dosszié]. TASS, 2018. július 19. Online: <https://tass.ru/info/5388731>
- U.S. Atomic Energy Commission (1946): *Operation Crossroads: Preliminary Report of Test Baker*. Defense Technical Information Center. Online: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0473909.pdf>
- VASILYEVA, Nataliya (2025): Putin Announces Test of Tsunami-Making Nuclear Weapon. *The New York Times*, 2025. október 29. Online: <https://www.nytimes.com/2025/10/29/world/europe/russia-missile-poseidon-putin-nuclear-tests.html>



Kovács-Szegedi Ildikó,<sup>1</sup>  Dobor József<sup>2</sup> 

# Agrárvegyszerek: kockázatkezelés és jogi keretek, 1. rész

## Agrochemicals: Risk Management and Legal Frameworks, Part 1

*A mezőgazdaságban alkalmazott vegyszerek sokfélék, és a mennyiségük is jelentős. Két nagy csoportra bonthatók: a növényvédő szerekre és a műtrágyákra. Optimális felhasználásuk segítségével a terméshozamok mennyisége és minősége a társadalom igényére szabható. A vegyszereket alkalmazó vállalkozások és szakemberek tevékenysége a felhasznált anyagok mennyiségének, típusának és koncentrációjának, az alkalmazott technológiáknak, valamint a területi sajátosságoknak a különbözősége miatt rendkívül sokrétű. Az elmúlt évtizedekben Európa-szerte és azon túl számos káresemény következett be az agrárvegyszerekkel kapcsolatosan. Hazánkban a következetes szabályozás és a tudatos vegyszerhasználat hozzájárul ahhoz, hogy az előzőekben ismertetett káresemények száma csökkenő tendenciát képviseljen. Természetesen az események további minimalizálása fontos cél a szakemberek számára. A cikk a fentiek értelmezésére és átgondolására nyújt szakmai lehetőséget.*

**Kulcsszavak:** növényvédő szerek, műtrágyák, veszélyes anyagok, kockázatkezelés, kémiai biztonság

*The chemicals used in agriculture are diverse and their quantity is significant. They can be divided into two large groups: plant protection products and fertilisers. With the help of their optimal use, the quantity and quality of crop yields can be tailored to the needs of society. The activities of businesses and professionals that use chemicals are extremely diverse due to differences in the amount, type, and concentration of the materials used, the technologies applied, and territorial characteristics. In recent decades, across Europe and beyond, many damage events have occurred in relation to agrochemicals. In our country, consistent regulation*

<sup>1</sup> Ügyvezető, Kovács Bt., e-mail: [ildi.szegedi13@gmail.com](mailto:ildi.szegedi13@gmail.com)

<sup>2</sup> Habilitált egyetemi docens, Nemzeti Közzolgálati Egyetem Rendészettudományi Kar Katasztrófavédelmi Intézet Iparbiztonsági Tanszék, e-mail: [dobor.jozsef@uni-nke.hu](mailto:dobor.jozsef@uni-nke.hu)

*and the conscious use of chemicals contribute to the fact that the number of damage events described above represents a decreasing trend. Of course, further minimisation of these events is an important goal for professionals. The article provides a professional opportunity to interpret and reflect on the above.*

**Keywords:** pesticides, fertilisers, hazardous substances, risk management, chemical safety

## Bevezetés

Magyarország Alaptörvénye kimondja, hogy mindenkinek joga van az egészséges környezethez, ivóvízhez és élelmiszerhez. A globális klímaváltozás hatására hazánkban is egyre szélsőséesebb időjárási körülményekkel kell szembenéznük a mezőgazdasági termelőknek. Az egyenlőtlen csapadékeloszlás, aszályok, a téli hótakaró hiánya, az emelkedő hőmérséklet hatására a nyári csapadék egyre kisebb mennyiségben, egyenlőtlen eloszlásban, egyre hevesebb zivatarok, jégesők formájában jelentkezik.

Az egyre hosszabb és gyakoribb hóhullámok (hóhullámról akkor beszélhetünk, ha legalább öt egymást követő napon át az átlaghőmérséklet minimum öt, illetve annál magasabb értékben meghaladja az átlagos középhőmérsékletet) hatására (a meteorológusok előrejelzései alapján egyre több ilyen időszak várható) a növények ellenálló képességét növelni szükséges, amit növényvédő szerekkel és műtrágyákkal érhetünk el.

## A növényvédő szer tárolására vonatkozó előírások

A növényvédő szerek felhasználási felelőssége kiterjed a vásárlás, szállítás, tárolás és a kijuttatás, valamint a keletkező hulladék szakszerű kezelésére. A termelő a növényvédő szert olyan, szilárd burkolattal ellátott helyiségben tárolhatja, amelyben sem a talajvízzel, sem a csapadékvízzel nem érintkezik, sem közvetve, sem közvetlenül. Kiszóródás esetén továbbá felszedhető, és nem jut a felszíni vizekbe, sem a felszín alatti vizekbe. Tárolás során a termelőnek figyelembe kell vennie, hogy állatok, valamint emberek tartózkodására, azonkívül a takarmány, élelmiszer, gyógyszer és gyógyászati célú anyag tárolására fenntartott helyiségben nem tárolható növényvédő szer.<sup>3</sup> Gondoskodnia szükséges arról, hogy a helyiség zárható legyen, így akadályozva meg, hogy illetéktelen személyek férhessenek a vegyszerekhez, továbbá tűz- és robbanásveszélyt kizáró módon szükséges kialakítani a tárolót. A növényvédőszer-raktárban elkülönítve kell tárolni a lejárt szavatosságú, valamint a forgalomból kivont növényvédő szereket, mint veszélyes hulladékot, az ártalmatlanításra jogosultnak történő átadásig. A kiürült növényvédő szeres göngyölegek tárolása megegyezik a növényvédő szerekre vonatkozó előírásokkal, azzal a kitétellel, hogy ezen üres csomagolási eszközöket maximum egy évig tárolhatja az erre kijelölt hely, majd azt a növényvédő szert forgalmazónak vagy az általa megbízott

<sup>3</sup> 103/2003. (IX. 11.) FVM rendelet.

felvásárlónak átadja, amiről egy átvételi elismervényt kap, amelyet 5 évig köteles megőrizni. A keletkező növényvédő szeres göngyölegéről a 103/2003. (IX. 11.) FVM rendelet alapján vezet naprakészen a nyilvántartását. A termelőnek az üres növényvédő szeres göngyölegek mellett a növényvédő szerek felhasználásáról is naprakész nyilvántartást kötelező vezetnie az elektronikus permetezési naplóban.<sup>4</sup>

## A növényvédő szer felhasználására vonatkozó előírások

Magyarországon növényvédő szert forgalomba hozni a gyártó vagy az importőr által ellátott biztonsági adatlappal lehetséges. Az engedélyezett növényvédő szerek listája, engedélyokirata, biztonsági adatlapja megtalálható a NÉBIH honlapján.<sup>5</sup>

Növényvédő szer felhasználása a munkavédelmi előírások betartásával, az emberi egészséget nem veszélyeztető formában végezhető. Növényvédő szerrel történő munkavégzés kizárólag az előírt védőeszközben történhet, amelyről a peszticidek engedélyokiratában találunk bővebb felvilágosítást.<sup>6</sup>

A növényvédő szerrel való tevékenység során be kell tartani a biztonságos munkavégzésre vonatkozó jogszabályokat, munkavégzés során nem engedélyezett a dohányzás és az étkezés, valamint a munkavégzés alatt, előtt és után nyolc órán belül az alkohol fogyasztása is tilos. A növényvédő szerrel történő munkavégzés során, növényvédő szerrel kezelt területre való belépés esetén, valamint a növényvédő szerrel szennyezett szóróberendezések, munkagépek karbantartása és tisztítása során egyéni védőeszközök viselése kötelező, amelynek biztosítása a munkáltató felelőssége.<sup>7</sup>

Növényvédő szerrel összefüggő munkavégzés során kötelességünk megakadályozni a növényvédő szer

„a) természetes párolgását, elcsepegését, elfolyását, porlódását, szóródását, szembe, bőrre jutását, belélegzését, esetleges lenyelését,

b) véletlen elcserélését, élelmiszerbe, takarmányba keveredését,

c) kezelésre nem szánt tárgyra, területre, növényzetre jutását.”<sup>8</sup>

A zöldtakarmány és frissen fogyasztásra való zöldség, valamint gyümölcs növényvédő szerrel történő kezelése esetén betakarítási időszakban a kezelt területen az ételmezés-egészségügyi várakozási idő<sup>9</sup> alatt, jól látható helyen az alábbi felirattal szükséges egy tábla elhelyezése: „Vigyázat! Növényvédő szerrel kezelt terület! Idegeneknek engedély nélkül belépni tilos!”<sup>10</sup>

<sup>4</sup> 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet; NÉBIH honlapja.

<sup>5</sup> NÉBIH Magyarországon engedélyezett növényvédő szerek hivatalos adatbázisa.

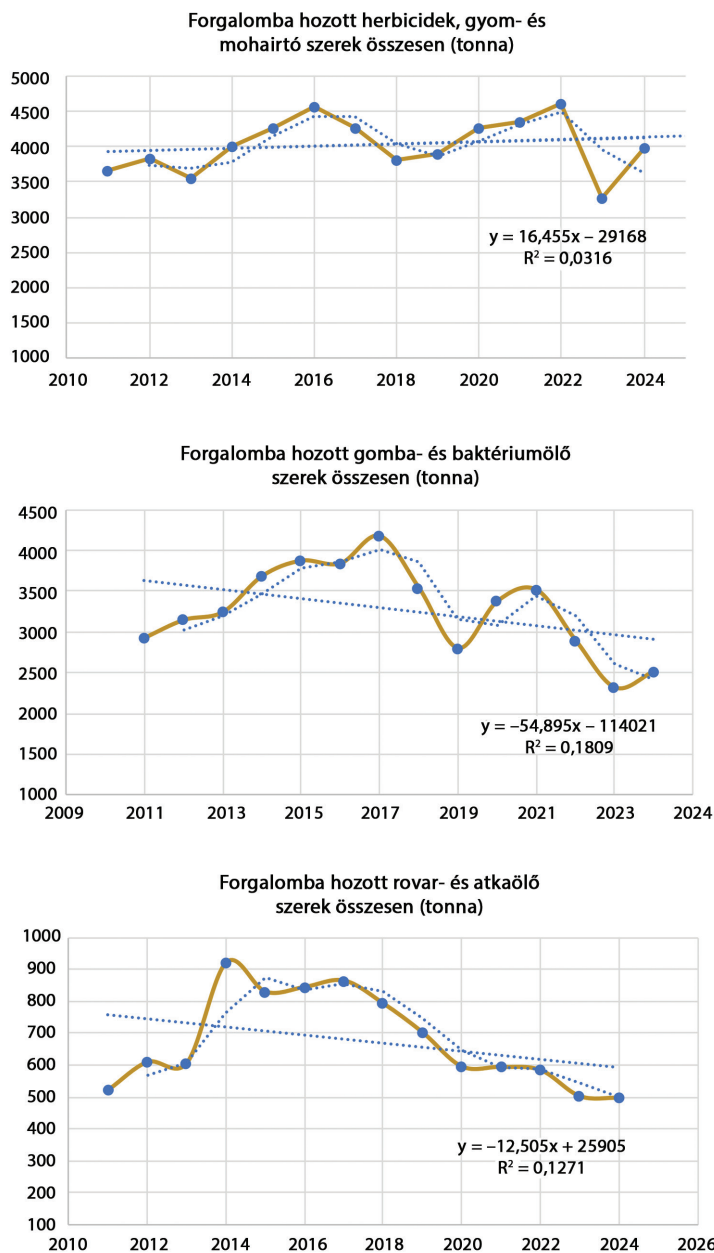
<sup>6</sup> UNSWORTH 2010.

<sup>7</sup> DOBOR 2018.

<sup>8</sup> 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet.

<sup>9</sup> Az az időintervallum, amely az utolsó növényvédő szerrel történő kezelés és a betakarítás megkezdése között el kell hogy teljen.

<sup>10</sup> 43/2010. (VI. 23.) FVM rendelet, 8. § (3) bekezdés.



1. ábra: Forgalomba hozott különböző típusú növényvédő szerek évenkénti változó mennyiségeinek összehasonlítása  
 Forrás: a szerzők szerkesztése Központi Statisztikai Hivatal [é. n.] alapján<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Központi Statisztikai Hivatal [é. n.].

## A növényvédő szerek szállítására vonatkozó előírások

A növényvédő szerek szállítására vonatkozó előírásokat a 7/2011. (III. 8.) NFM rendelet szabályozza. Növényvédő szerek kizárólag küldeménydarabban, az engedélyezett értékesítési formában szállíthatók. A növényvédőszer-szállító pótkocsit a hátsó részén, valamint mindkét oldalát „MEZŐGAZDASÁGI VEGYSZER” feliratú táblával kell jelölni, amennyiben a növényvédő szer egyben tűzveszélyes is, akkor az előzőekben meghatározott módon „TŰZVESZÉLYES” felirattal ellátott tábla is kötelezendően elhelyezendő. Növényvédő szert szállító mezőgazdasági vontató kizárólag egy pótkocsit vontathat. A növényvédő szerek szállítása az alábbi kritériumok megvalósulása esetén történhet.<sup>12</sup>

A szállítás során nem szennyezheti és nem veszélyeztetheti a környezetét. A növényvédő szert mezőgazdasági vontatóval maximum 40 km/h sebességgel, illetve 50 km-es távolságra lehet szállítani, a szállításról menetlevél, illetve fuvarlevél kiállítása kötelező. A növényvédő szerek pótkocsin történő rögzítését úgy kell kivitelezni, hogy az a szállítás során ne mozdulhasson el. Mezőgazdasági vegyszer szállításához a mezőgazdasági vontató vezetőjének szükséges rendelkeznie ADR oktatási bizonyítvánnyal vagy a KAV (Közlekedési Alkalmassági és Vizsgaközpont Nonprofit Korlátolt Felelősségű Társaság) által kibocsátott igazolással.

„A veszélyes anyagok és a veszélyes keverékek szállítása során az élet, a testi épség, valamint a környezet veszélyeztetésének kockázatát a minimálisra kell csökkenteni. Ennek érdekében a veszélyes anyagok, illetve a veszélyes keverékek csomagolását, illetőleg a szállítóeszközt úgy kell megválasztani, hogy a szállított anyag, keverék a rakodás és szállítás során az egészséget, illetve a környezetet ne veszélyeztethesse, illetőleg ne károsíthassa.”<sup>13</sup>

A növényvédő szerek szállítására vonatkozó ADR-előírásokat a veszélyes áruk nemzetközi közúti szállításáról szóló 2025-ös megállapodás (ADR) A és B melléklete tartalmazza, ha a kijuttatandó területre nem mezőgazdasági vontatóval történik a kiszállítás.<sup>14</sup>

Fontos szabályozó az Európai Parlament és az Európai Tanács 2012. július 4-én elfogadott 649/2012/EU rendelete a veszélyes vegyi anyagok kiviteleről és behozataláról. Ismertebb nevén PIC-rendeletnek is nevezik, és 2014. március 1-jétől kötelezően alkalmazandó az Európai Unió valamennyi tagállamában.<sup>15</sup> A PIC-rendelet az Európai Unión belül végrehajtja a Rotterdami Egyezményt, amely az egyes veszélyes vegyi anyagok és peszticidek nemzetközi kereskedelmére vonatkozó előzetes tájékoztatáson alapuló jóváhagyási eljárást szabályozza. Az Egyezmény – és így a rendelet – célja a felelősségmegosztás és az együttműködés erősítése, valamint az emberi egészség és a környezet védelmének biztosítása a veszélyes anyagok globális forgalmában.<sup>16</sup>

<sup>12</sup> 7/2011. (III. 8.) NFM rendelet.

<sup>13</sup> 2000. évi XXV. törvény a kémiai biztonságról, 16. §.

<sup>14</sup> 165/2025. (VI. 24.) Korm. rendelet.

<sup>15</sup> Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti központ honlapja.

<sup>16</sup> Az Európai Parlament és a Tanács 649/2012/EU rendelete, 2012. július 4.

1. táblázat: Nevesített veszélyes anyagok (részlet), növényvédőszer-gyártásra régebben alkalmazott anyagok

| Veszélyes anyagok                                                                                                               | CAS-szám<br>(csak tájékoztató<br>jelleggel) | Alsó küszöbérték<br>(tonna) | Felső küszöbérték<br>(tonna) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 24. Metil-izocianát                                                                                                             | 624-83-9                                    | –                           | 0,15                         |
| 32. Poliklór-dibenzo-furánok és poliklór-dibenzo-dioxinok (köztük a TCDD), TCDD-egyenértékben számítva (lásd a 20. megjegyzést) | –                                           | –                           | 0,001                        |

Forrás: a szerzők szerkesztése a 219/2011. (X. 20.) Korm. rendelet a veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos balesetek elleni védekezéséről, 1. számú melléklet 2. táblázat alapján

## A műtrágyák tárolására vonatkozó előírások

A műtrágyák tárolására vonatkozó előírásokat a 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet 10. § írja elő. A tárolás során be kell tartani a környezet és a víz védelméről szóló rendelkezéseket. A műtrágya tárolására szolgáló helyiség kialakításánál figyelembe kell venni, hogy legalább 1,5 m különbségnek szükséges lennie a tárolóaljzat és a talajvízszint között, valamint biztosítani, hogy nem érintkezik csapadékvízzel. A tároló szilárd burkolattal ellátott, a kiszóródott műtrágyák összegyűjtése megvalósítható, védve van a bel- és árvíz okozta kockázattól, megakadályozva, hogy sem direkt, sem indirekt módon nem jut a felszíni és a felszín alatti vizekbe. A különböző hatóanyag-tartalommal rendelkező ömlesztett műtrágyákat egy tároló térben úgy kell elhelyezni, hogy azok ne keveredhessenek egymással, egy olyan felirattal ellátva, amely tartalmazza az adott műtrágya elnevezését, gyártóját, hatóanyag-tartalmát és a raktárban történő elhelyezés dátumát. „Nem létesíthető tároló különösen hullámtéren, fakadó vizes területen, vízbázisok védőterületén, árvízi tároló területén, parti védősáv területén, vízjárta területen, ivóvízkivételről számított 50 méteren belül, bányatavak 300 méteres parti sávjában, kivéve, ha a tároló szintje magasabb a mértékadó árvízszintnél.”<sup>17</sup> A műtrágyák tárolásánál kiemelt figyelmet kell fordítani az ammónium-nitrátra. A 28 m/m%-nál nagyobb ammónium-nitrát, továbbá a nitrogént ammónium-nitrát alakban magába foglaló összetett NPK műtrágyák tárolásánál meg kell akadályozni a hőciklusok következtében kialakuló átkristályosodást, jól szellőztethető helyiségben, napfénytől, valamint nedvességtől távol tartva tárolandó. 1 raklapon (25 kg egységcsomagolásban) egymáson maximum 8 zsák magasan rakható, és maximum 3 raklap helyezhető egymásra, Big-Bag zsák esetén maximum 3 sor kerülhet egymás tetejére. Egy tárolóban elhelyezhető ammónium-nitrátot tartalmazó műtrágya mennyisége maximum 300 t lehet, a tárolók között minimum 10 m-t szükséges biztosítani, valamint a tárolók 10 m-es szektorában nem tárolható semmilyen éghető anyag. A folyékony műtrágyát csak zárt, sérülés- és szivárgásmentes tartályban lehet tárolni. A tárolótartály nem léphet kémiai kölcsönhatásba a benne tárolt folyékony műtrágyával.<sup>18</sup>

A 2. táblázatban szerepel az ammónium-nitrát- és a kálium-nitrát-tartalmú műtrágyákra vonatkozó mennyiségi besorolás, amely alapján az üzemben tárolt műtrágya mennyiségtől

<sup>17</sup> 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet, 10. § (2) bekezdés.

<sup>18</sup> PÁTZAY–DOBOR 2016.

függően alsó vagy felső küszöbértékű veszélyes anyagokkal foglalkozó üzemi besorolás alá kerül. A tárolt mennyiség függvényében az üzem biztonsági elemzés vagy biztossági jelentés készítésre kötelezett. Az ammónium-nitrát tárolása, annak robbanásra hajlamos tulajdonsága miatt kiemelt jelentőségű. A többi műtrágyához hasonlóan száraz helyen, gyújtóforrástól és gyúlékony anyagtól távol kell tartani. Ömlesztve tárolni tilos, valamint egyéb vegyszerektől, szalmától, szénától, gabonától, üzemanyagtól elkülönítetten szükséges tárolni úgy, hogy illetéktelenek ne férhessenek hozzá, illetve annak eltulajdonítását jelenteni kell a hatóságnak. Az ammónium-nitrátot karbamiddal együtt tárolni tilos. A műtrágya tároló környezetében tilos a dohányzás és a nyílt láng használata. Ügyelni szükséges az ammónium-nitrát tárolása során, hogy ne alakuljon ki hőciklus, amely az ammónium-nitrát átkristályosodását okozza, valamint óvni kell a közvetlen napfénytől. Az ammónium-nitrát tárolásánál figyelembe kell venni, hogy sok mezőgazdasági telep rendelkezik saját üzemanyagkúttal, ilyen helyeken az üzemanyagkút és az ammónium-nitrát-tároló között egy biztonsági távolságot, legalább 50 m-t ajánlott tartani. Az ammónium-nitrát műtrágya őrzéséről is gondoskodni kell, hogy ahhoz illetéktelen személy ne férhessen hozzá, valamint lopás esetén azonnal jelenteni szükséges a rendvédelmi hatóságnál, megakadályozva, hogy azt terrorcselekmény kivitelezésére használják.

2. táblázat: Nevesített veszélyes anyagok (részlet), műtrágya

| Veszélyes anyagok                                    | Alsó küszöbérték (tonna) | Felső küszöbérték (tonna) |
|------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1. Ammónium-nitrát (önfenntartó bomlásra képes)      | 5000                     | 10 000                    |
| 2. Ammónium-nitrát (műtrágya minőségű)               | 1250                     | 5000                      |
| 3. Ammónium-nitrát (technikai minőségű)              | 350                      | 2500                      |
| 4. Ammónium-nitrát („előírástól eltérő”)             | 10                       | 50                        |
| 5. Kálium-nitrát (szemcsés vagy granulált műtrágyák) | 5000                     | 10 000                    |
| 6. Kálium-nitrát (kristályos műtrágyák)              | 1250                     | 5000                      |

Forrás: a szerzők szerkesztése a 219/2011. (X. 20.) Korm. rendelet a veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos balesetek elleni védekezéséről 1. számú melléklet 2. táblázat alapján

## A műtrágyák felhasználására vonatkozó előírások

A 2019/1148 EU<sup>19</sup> rendelet értelmében a felhasználókra vonatkozó ammónium-nitrát műtrágyavásárlásokat megszigorították. Az ammónium-nitrát-keverék (NPK) műtrágyák esetén, ha az N tartalma 16 m/m % vagy e feletti, akkor a gazdasági szereplő képviselőjére jogosult nyilatkozik robbanóanyag-prekurzor megvásárlásakor az EU rendelet IV. melléklete alapján kiállított dokumentumban. A műtrágyák az engedélyező okiratban meghatározott módon használhatók fel, egyúttal be kell tartani a 123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet<sup>20</sup> a vízbázisok, a távlati vízbázisok, valamint az ivóvízellátást szolgáló vízellátási létesítmények védelméről,

<sup>19</sup> Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2019/1148 rendelete, 2019. június 20.

<sup>20</sup> 123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet.



továbbá a 44/2005. (V. 6.) FVM–GKM–KvVM<sup>21</sup> együttes rendelet a mező- és erdőgazdasági légi munkavégzésekről, és a 220/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet<sup>22</sup> a felszíni vizek minősége védelmének szabályairól szóló rendeleteket. Az ivóvíz-védőterületeken, a belső védőövezetben a műtrágya és növényvédő szerek használata nem engedélyezett. Az ammónium-nitrátot karbamiddal keverni tilos. A műtrágyák felhasználása során be kell tartani a munkavédelmi előírásokat, és védőeszközök használatával meg kell akadályozni a bőrre és a szembe jutását, továbbá az ammónium-nitrát porának belélegzését. Az ammónium-nitrát kiszóródása esetén azt azonnal fel kell takarítani, és azt egy tiszta, felcímkézett edényzetben kell elhelyezni az ártalmatlanításig. Meg kell akadályozni, hogy a műtrágya csatornába, valamint felszíni vízbe kerüljön. A műtrágyák felhasználásának vannak korlátozásai, amelyek a következők:

- december 1-je és február 15-e között tilos a műtrágya kiszórása;
- a vetést megelőzően kijuttatott műtrágya és a vetés között eltelt időszak maximum 14 nap lehet;
- nitrogén műtrágya a szántóterületre akkor juttatható ki, ha oda az adott évben olyan növénykultúra kerül, amely biztosítja a talaj lefedettségét;
- az őszi időszakban nitrogéntartalmú műtrágya abban az esetben juttatható ki, ha azt az adott növény fel tudja használni;
- a tavaszi műtrágya kijuttatásánál meg kell várni az olvadást, mivel a vízzel telített, átfagyott talaj esetén, továbbá, ha a hótakaró mennyisége meghaladja az 5 cm-t, tilos a műtrágyát kijuttatni;
- a műtrágya kijuttatásának feltétele a talajvizsgálaton alapuló számítás, a talajvizsgálatokat gyepeknél 10 évente, szántók esetén pedig 5 évente szükséges elvégezteni.

## A műtrágyák szállítására vonatkozó előírások

A műtrágyák szállítására vonatkozó előírásokat az ADR (a veszélyes áruk nemzetközi közúti szállításáról szóló megállapodás A és B melléklete kihirdetéséről, valamint a belföldi alkalmazásának egyes kérdéseiről) és a 7/2011. (III. 8.) NFM rendelet<sup>23</sup> (a mezőgazdasági vegyszerek és üzemanyagok mezőgazdasági vontatóval vagy lassú járművel vontatott pótkocsival történő közúti szállításáról) tartalmazza. A folyékony műtrágya szállítására tartányos pótkocsi használható, ha megfelel az 5/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet<sup>24</sup> a közúti járművek műszaki megvizsgálásáról, továbbá a 6/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet<sup>25</sup> a közúti járművek forgalomba helyezésének és forgalomban tartásának műszaki feltételeiről szóló szabályoknak. A tartány űrtartalma maximum 6,5 m<sup>3</sup> lehet. A szilárd műtrágyát lehet küldeménydarabos és ömlesztett módon szállítani (kivéve az ammónium-nitrátot). Ha ömlesztve történik a szállítás, akkor az olyan konténerben történhet, amely vagy zárt, vagy lángmentes és vízálló ponyvával van ellátva, azonfelül nem érintkezhet gyúlékony anyaggal, valamint fával.

<sup>21</sup> 44/2005. (V. 6.) FVM–GKM–KvVM együttes rendelet.

<sup>22</sup> 220/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet.

<sup>23</sup> 7/2011. (III. 8.) NFM rendelet.

<sup>24</sup> 5/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet.

<sup>25</sup> 6/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet.

A műtrágyát a környezet veszélyeztetését elkerülő módon kell szállítani, a mezőgazdaság vonzó vezetőjének, ugyanúgy, mint a növényvédőszer-szállításnál, megfelelő ADR-képesítéssel szükséges rendelkeznie. A műtrágyát szállító pótkocsit a hátsó részén, valamint mindkét oldalát „MEZŐGAZDASÁGI VEGYSZER” feliratú táblával kell jelölni, amennyiben egyben tűzveszélyes is, akkor az előzőkben meghatározott módon „TŰZVESZÉLYES” felirattal ellátott tábla is kötelező érvényűen elhelyezendő.<sup>26</sup>

## A műtrágyák okozta környezeti hatások

A helytelen műtrágyahasználat káros hatásai nem jelentkeznek azonnal, mivel a talaj erős pufferkapacitással rendelkezik. Hosszú távon azonban a helytelen alkalmazás csökkenti a talaj termékenységet, talajromláshoz vezet, és mérgező anyagok felhalmozódását okozza a növényekben. Ezek az anyagok káros hatással lehetnek az emberi és állati egészségre, míg a túlzott alkalmazás káros következményekkel jár a környezetre nézve. A műtrágyák felhasználásakor a túladagolás vagy a szakszerűtlen felhasználás okozhat környezetkárosító hatást, amely lehet:<sup>27</sup>

- A talaj elsavanyodása: Elsősorban a kis pufferkapacitású és kolloidokban szegény talajokon alakul ki. A talaj savasodása elsősorban alacsony pufferkapacitású talajokban fordul elő, különösen az ammónium- és szuperfoszfát-alapú műtrágyák következtében, de mésztrágyázással mérsékelhető.
- A kiegyensúlyozatlan trágyázás felborítja a tápanyagarányokat, ami mikrotápanyag-hiányhoz és egyensúlyhiányhoz vezethet a talaj élővilágában.
- A felszíni és a felszín alatti víztestek elszennyeződése: a túlzott N-tartalmú műtrágya felhasználása során a nitrogén nitráttá és nitráttá alakul, valamint a foszfor műtrágyák a talajvízbe leszivároghatva veszélyeztetik az ivóvízkészleteket. Ha a műtrágya a felszíni vizekbe jut, akkor ezek fokozzák a mikroorganizmusok növekedését, aminek következtében csökken a víz oldotttoxigén-tartalma, aminek hatására a vízi élőlények elpusztulnak. Az oxigén hiánya mellett a másik nagy probléma az, hogy az algák mérgező cianobaktériumokat termelnek, és az ilyen vízből ivó állatok elhullhatnak, de az embereket is megbetegíti, ha ilyen vízben fürdözik.<sup>28</sup>
- Levegőszennyezést is okozhat a nitrogéntartalmú műtrágya kijuttatása azáltal, hogy a kijuttatott anyag nem megfelelően lett beledolgozva a talajba, vagy túlzott mennyiségben lett kijuttatva, ezáltal NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O keletkezik. Ha az ammónium-nitrát mellett még karbamid műtrágyával is megszórják a kezelt területet, az NH<sub>3</sub> elpárolgását segítheti elő, ezeknek a gázoknak a felszabadulása hozzájárul az üvegházhatású gázok növekedéséhez a légkörben.

<sup>26</sup> 7/2011. (III. 8.) NFM rendelet.

<sup>27</sup> STEFANOVITS–FILEP–FÜLEKY 2010.

<sup>28</sup> FAO 2018; WHO 2011.



2. ábra: A műtrágyák okozta környezeti hatások összefoglalása

Forrás: a szerzők szerkesztése a Copilot alkalmazásával

## A növényvédő szerek okozta környezeti hatások

A mezőgazdaságban elsőként megjelenő vegyszerek a szerves foszforsavészterek, piretroidok, karbamátok, szervesklór-tartalmú növényvédő szerek voltak. Az évek folyamán folyamatosan bővült a növényvédő szerek termékpalettája. Nagyon sok vizsgálat, kutatás kimutatta a növényvédő szerek káros hatásait, ennek következtében kivonták azokat, ilyenek például a szerves foszforsavészterek vagy a klórozott szénhidrogének. A kijutott növényvédő szer permetezéskor rákerül a célnövényzetre, de emellett a gyomnövényekre és talajra is. A növényekre kipermetezett növényvédő szerek lehetséges sorsa megcsurgás, elpárolgás, elsodródás, felszívódás, lemosódás, lebomlás. A hatóanyagok talajra kerülésük során kötődhetnek a talaj felső rétegéhez, vagy vízdékony képességük miatt a talaj mélyebb rétegeibe jutva elérhetik a talajvizet, onnan továbbjuthatnak az ivóvízbe vagy élővizekbe. A párolgás során a levegő mozgása révén távolabbi területekre is eljutva okozhatnak szennyezettséget.<sup>29</sup>

A talajba kerülő peszticidek felhalmozódhatnak és évtizedekig kimutathatók maradhatnak, nemcsak a talajban, hanem a felszíni vizek üledékeiben is, beleértve az 1968 óta betiltott DDT-t is. A DDT és bomlástermékei (DDE, DDD) ma is jelen vannak világszerte, így Magyarországon

<sup>29</sup> ORE et al. 2023.

és a Duna-deltában is. Magyarországon 1976 óta van érvényben a felszíni vizek minőségének felmérésére szolgáló környezeti monitoring, míg az első átfogó talajfelmérés 1993-ban történt. A peszticidek ökológiai kockázataira először Rachel Louise Carson hívta fel a figyelmet, 1962-ben megjelent *Néma tavasz* című könyvében.<sup>30</sup>

Ma a szelektivitás kiemelkedő fontosságú a növényvédő szerek használatában. A rovarirtó szerek használata közvetve a madárpopulációk csökkenéséhez vezet, táplálékláncuk csökkenése miatt. A táplálékláncban felhalmozódó vegyi anyagok az állati eredetű táplálékon (hús, tej) keresztül is bejutnak az emberi szervezetbe, és ehhez hasonlóan a zöldségekben is kimutathatók a talajban maradó, nem lebomló vegyszerek. A Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal<sup>31</sup> (NÉBIH) folyamatos ellenőrzése ellenére a lakosság növényi és állati eredetű élelmiszereken keresztül egyaránt ki van téve a növényvédő szerek hatásának. A peszticideknek kitett populációkban nagyobb a légyszöveti daganatok (tüdő-, máj-, prosztata-) előfordulása, valamint gyakrabban előfordulnak a neurológiai rendellenességek, továbbá az immun- és endokrin rendszer rendellenességei.



3. ábra: Agrárvegyszerek lehetséges negatív hatásainak összefoglalása

Forrás: a szerzők szerkesztése

A növényvédő szerek kezelésével kapcsolatban az oktatás és az esettanulmányok összetett feldolgozása a joggyakorlatok megerősítését szolgálja.<sup>32</sup>

## Egyéb rendelkezések

Az ADR előírásai alapján minden olyan személynek, aki a veszélyesáru-szállítással kapcsolatba kerül, például a növényvédő szert a szállítójárműről leszedő targoncás, az ADR 1.3 fejezete alapjául szolgáló képzéssel kell rendelkeznie, valamint az adott cégnek ADR-tanácsadót kell

<sup>30</sup> KOLEJANISZ–ÁBRAHÁM–VÉRTESI 2021.

<sup>31</sup> A Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal (NÉBIH) Magyarország központi élelmiszerlánc-felügyeleti szerve, amely az élelmiszer-, takarmány-, állat- és növénybiztonság teljes vertikumát ellenőrzi.

<sup>32</sup> MÓRITZ–DOBOR 2024.

alkalmaznia. A növényvédő szer és a műtrágyák felhasználásából keletkező hulladékokat a 72/2013. (VIII. 27.) VM rendelet<sup>33</sup> alapján soroljuk be. A lehetséges keletkező hulladékok listáját a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat: A növényvédő szer és a műtrágyák felhasználásából keletkező hulladékok 72/2013. (VIII. 27.) VM rendelet szerinti besorolása

| Hulladék megnevezése                                                                                                                                                                                         | HAK <sup>34</sup> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Veszélyes anyagokat tartalmazó, agrokémiai hulladék                                                                                                                                                          | 02 01 08*         |
| Agrokémiai hulladék, amely különbözik a 02 01 08-tól                                                                                                                                                         | 02 01 09          |
| Szilárd sók és oldataik, amelyek különböznek a 06 03 11-től és a 06 03 13-tól (ammónium-nitrát)                                                                                                              | 06 03 14          |
| Szervetlen növényvédő szerek, faanyagvédő szerek és egyéb biocidok                                                                                                                                           | 06 13 01*         |
| Szerves növényvédő szerek (kivéve a 02 01 08 és a 02 01 09), faanyagvédő szerek (kivéve a 03 02) és biocidok gyártásából, kisereléséből, forgalmazásából és felhasználásából származó hulladék <sup>35</sup> | 07 04             |
| Műanyag csomagolási hulladék                                                                                                                                                                                 | 15 01 02          |
| Veszélyes anyagokat maradékként tartalmazó vagy azokkal szennyezett csomagolási hulladék                                                                                                                     | 15 01 10*         |
| Veszélyes, szilárd porózus mátrixot (pl. azbesztet) tartalmazó fémből készült csomagolási hulladék, ideértve a kiürült hajtógázos palackokat                                                                 | 15 01 11*         |
| Veszélyes anyagokkal szennyezett abszorbensek, szűrőanyagok (ideértve a közelebről meg nem határozott olajsűrítőket), törlőkendők, védőruházat                                                               | 15 02 02*         |
| Növényvédő szer                                                                                                                                                                                              | 20 01 19*         |

Forrás: a szerzők szerkesztése a 72/2013. (VIII. 27.) VM rendelet alapján

A hulladékokat a 246/2014. (IX. 29.) Korm. rendelet<sup>36</sup> az egyes hulladékgazdálkodási létesítmények kialakításának és üzemeltetésének szabályairól alapján kialakított gyűjtőhelyen helyezik el az ártalmatlanítónak vagy hasznosítónak történő átadásáig. A gyűjtőhely lehet munkahelyi vagy üzemi gyűjtőhely (4. ábra).

Munkahelyi gyűjtőhely: „a természetes személynek nem minősülő hulladéktermelő által a telephelyén végzett munka során képződő hulladék elkülönített gyűjtésére szolgáló, a telephelyen kialakított hely, ahol a hulladéktermelő a hulladékot gyűjtőedényben, konténerben, továbbá a hulladék biztonságos gyűjtését lehetővé tevő helyiségben vagy szilárd burkolattal ellátott, elkerített területen gyűjti.”<sup>37</sup> A hulladék keletkezésének helyén szükséges kialakítani. Ha ez nem különálló helyiségben van kialakítva, akkor el kell különíteni felfestéssel vagy kerítéssel, továbbá „Munkahelyi gyűjtőhely” felirattal kell ellátni. Az itt elhelyezett hulladékok gyűjtésére olyan edényzetet szükséges biztosítani, amellyel elkerülhető a környezet szennyezése. A veszélyes hulladékok esetén az edényzetnek UN minősítéssel kell rendelkeznie. A gyűjtőhelyen a hulladék gyűjtése 6 hónapig lehetséges.

Üzemi gyűjtőhely: „a gazdálkodó szervezet hulladéktermelő telephelyén létesített olyan, e rendeletben meghatározott műszaki kialakítással rendelkező építmény, amely a hulladéktermelő tevékenységével összefüggésben képződött és munkahelyi gyűjtőhelyen gyűjtött

<sup>33</sup> 72/2013. (VIII. 27.) VM rendelet.

<sup>34</sup> HAK – Hulladékkazonosító kód.

<sup>35</sup> A 07 04 főcsoportban az adott kódhoz az összetevők fizikai megjelenése alapján soroljuk be a megfelelő alcsoportba, pl. szilárd/folyékony, szerves/szervetlen.

<sup>36</sup> 246/2014. (IX. 29.) Korm. rendelet.

<sup>37</sup> 246/2014. (IX. 29.) Korm. rendelet.

hulladék munkahelyi gyűjtést követő, elszállításig történő elkülönített gyűjtésére szolgál.<sup>38</sup> Az üzemi gyűjtőhely körülfatartott, zárható, biztosított a csapadékvíz és a csurgalékvíz elvezetése. Biztosítva van, hogy illetéktelen személyek ne férhessenek az üzemi gyűjtőhelyen elhelyezett hulladékokhoz. A gyűjtőhelyen a hulladékokat elkülönítetten kell gyűjteni, továbbá meg kell akadályozni a hulladékok keveredését. Az üzemi gyűjtőhelyen tárolt hulladékokat felirattal szükséges ellátni, amely tartalmazza a megnevezését, HAK és UN számát, veszélyességi jellemzőit. A feliratnak vízállónak, valamint mindenki számára jól olvashatónak kell lennie. A kialakított üzemi gyűjtőhelyet táblával kell jelölni. A gyűjtőhelyen elhelyezett gyűjtőedényzet sérülésmentes kell legyen, és az üzemeltetés során sem sérülhet meg. A gyűjtőhelyen elhelyezett hulladékokról és annak elszállításáról naprakész nyilvántartást (üzemnaplót) kell vezetni. Ha az üzemi gyűjtőhelyen elhelyezett veszélyes hulladékok napi mennyisége meghaladja az 1 t-t, akkor az üzemeltető cég haváriaterv készítésére is kötelezett. Az üzemi gyűjtőhelyen elhelyezett hulladékokat engedéllyel rendelkező hasznosítónak/ártalmatlanítónak kell átadni. Az üzemi gyűjtőhelyen lévő hulladék 1 évig tárolható. Az üzemi gyűjtőhely a hulladékgazdálkodási hatóság engedélyével üzemeltethető.

A hulladékok nyilvántartására és adatszolgáltatására a 309/2014. (XII. 11.) Korm. rendelet<sup>39</sup> előírásai a kötelező érvényűek. A 93/1996. (VII. 4.) Korm. rendelet<sup>40</sup> előírja, hogy aki 500 hektár felett növénytermesztéssel foglalkozik, annak környezetvédelmi megbízottal szükséges rendelkeznie.

A műtrágya felhasználásakor keletkező műanyag Big-Bag zsákokat illetően a műtrágyát forgalmazónak a csomagolási hulladékokra (HAK 15 01 02) vonatkozó rendelet<sup>41</sup> 10. §-a alapján visszavételi kötelessége van, így segítve a körforgásos gazdaságban a csomagolási hulladék mennyiségének csökkentését, illetve elősegítve a csomagolási hulladékok újrahasznosítását, ezzel jelentősen csökkentve a környezet terhelését.

A növényvédő szerek csomagolásáról szóló FVM rendelet<sup>42</sup> alapján a keletkező csomagolási hulladékokat tisztított formában a forgalmazó által megbízott koordináló szervezet részére a termelő átadhatja. A 250 kg-ot vagy 250 l-t meghaladó mennyiség befogadására használt csomagolási eszközök (hulladékok) begyűjtését, ártalmatlanítását a növényvédő szert előállítónak vagy a forgalmazó importőrnek kötelessége biztosítani. A megtisztított növényvédő szerek csomagolási hulladékokat maximum 1 évig tárolhatja. A termelő a tisztított csomagolási eszközöket saját tulajdonú gépjárművel az átvevő gyűjtőhelyére engedély nélkül elszállíthatja környezetszennyezést kizáró módon. A növényvédő szerrel szennyezett csomagolási eszközök még megtisztított állapotban sem használhatók fel más célra. Az átadott szennyezett csomagolóanyagokról kiállított elismervényt a termelő 5 évig köteles megőrizni és kérésre a hatóság részére rendelkezésre bocsátani. Veszélyes hulladékként kell kezelni a lejárt szavatosságú vagy már a felhasználás szempontjából alkalmatlannak nyilvánított, valamint az összekeveredett növényvédő szereket, azonkívül a csávázott vetőmagokat is. Továbbá minden olyan

<sup>38</sup> 246/2014. (IX. 29.) Korm. rendelet, 2. § 13.

<sup>39</sup> 309/2014. (XII. 11.) Korm. rendelet.

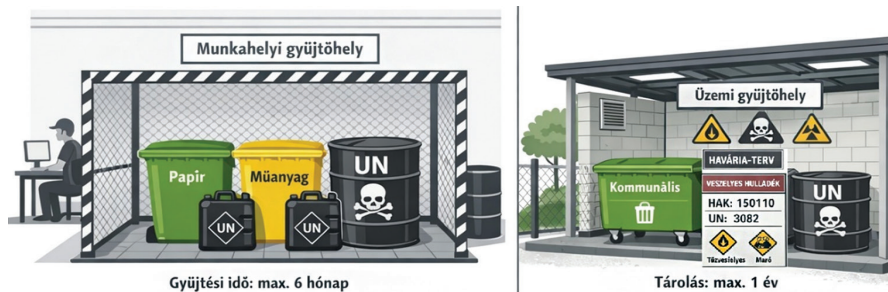
<sup>40</sup> 93/1996. (VII. 4.) Korm. rendelet.

<sup>41</sup> 442/2012. (XII. 29.) Korm. rendelet.

<sup>42</sup> 103/2003. (IX. 11.) FVM rendelet.



munkaeszközt, védőeszközt, amely növényvédő szerrel szennyezett, ezenfelül a növényvédő-szer-raktár elbontása során keletkező szennyezett bontási anyagot és földet is. Kiszóródott növényvédő szer felszedésére alkalmazott mentesítő anyagot, valamint a szennyeződött talajt is veszélyes hulladékként kell kezelni.

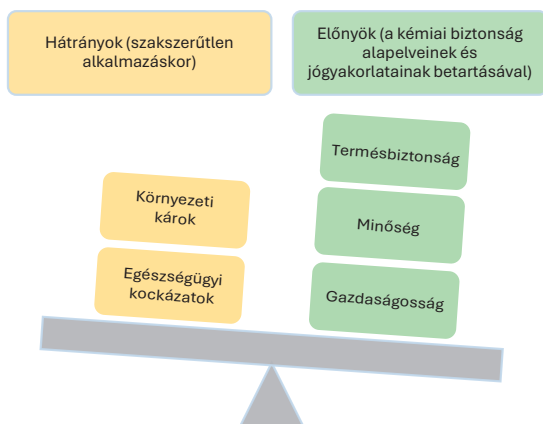


4. ábra: A munkahelyi és az üzemi gyűjtőhely összehasonlítása

Forrás: a szerzők szerkesztése a Copilot alkalmazásával

## Összegzés

Az agrárvegyszerek felhasználása nélkülözhetetlen, a termékbiztonságot és a minőséget befolyásoló fontos feltétel. A kémiai biztonsághoz kapcsolódó számos jogi szabályozó és jogyorkorlatok segítségével az elmúlt évtizedekben optimalizálódott a kockázati szint. A következő, 5. ábrán az agrárvegyszer-használat előnyeinek és hátrányainak összegzését ábráztuk.



5. ábra: Az agrárvegyszerek használatának előnyei és hátrányai

Forrás: a szerzők szerkesztése

A fogyasztói társadalom annak érdekében, hogy biztosítani tudja a megnövekedett élelmszerigényt, igyekszik kihasználni maximális hatékonysággal az egységnyi mezőgazdasági területen megtermelhető legtöbb és legjobb minőségű termékeket. A mezőgazdasági területen folytatott termelés során a termelők kiemelt figyelmet fordítanak a talaj termőképességének



megőrzésére, valamint a károkozók elleni védekezésre. A fentiekből következik, hogy jelenleg a növénytermesztés nem megoldható műtrágya és növényvédő szerek felhasználása nélkül, de felhasználásuk biztonságossá tehető. A műtrágyáknál elsősorban az ammónium-nitrát esetében a nemzetközi példákból jól látható, hogy többnyire gyártás során, valamint helytelen tárolásból adódóan alakul ki a katasztrófa, ez döntően nem végfelhasználónál következik be (Toulouse 2001; Bejrút 2020).

A mezőgazdasági növénytermesztéssel foglalkozó vállalkozásoknak legnagyobb mértékben törekedniük kell arra, hogy eleget tegyenek a biztonsági előírásoknak, ezt úgy tudják megvalósítani, hogy kollegáik rendszeres képzések alkalmával megismerkednek a legfrissebb jogi szabályozással, és a legjobb technológiát alkalmazzák a tevékenységük során. A szabályok betartásánál és betartatásánál fedezhető még fel hiányosság, ezeket pótolva jelentősen csökkenthető a baleset kialakulásának kockázata. A feltárt hiányosságok javításánál fontos szempont a végrehajtott feladatok állandó ellenőrzése, majd a visszacsatolás, ezt követően a kollektív elemzés. A vállalkozás vezetőinek szem előtt kell tartania, hogy a növényvédő szerek, valamint a műtrágyák tárolásáért, a felhasználási területre történő szállításért, továbbá a termőterületre történő kijuttatásáért, az ezen anyagokra vonatkozó előírások betartásáért, valamint betartatásáért ő a felelős. Oda kell figyelnie, hogy ne a biztonság rovására takarékoskodjanak, mert a biztonságos üzemeltetés sokkal kifizetődőbb, mint a kárelhárítási, helyreállítási, esetlegesen a munkaügyi, valamint a kártérítési perek költségei. A hatósági ellenőrzések a tárolás, szállítás továbbá a felhasználás területén elősegítik a biztonságos munkakörülmények kialakítását, valamint csökkentik a lehetséges balesetek kialakulásának lehetőségét.

Összefoglalva az agrárvegyszerekkel kapcsolatos megállapításokat, a biztonság okán: a növényvédő szerek és műtrágyák jelentős része rendelkezik veszélyes tulajdonsággal, ugyanakkor nélkülözhetetlenségük vitathatatlan. A kémiai biztonság új szemlélete hazánkban 2000-ben indult a XXV. törvénnyel.<sup>43</sup> Európa új vegyianyag-politikája 2001-ben indult, és a REACH<sup>44</sup> rendelettel alapozott meg egy magas fokú kémiai biztonsági szemléletet közeli és távoli régiókban.

A 6. ábra áttekintést ad az agrárvegyszerek használatával összefüggő, hosszú távon releváns és továbbfejleszthető tapasztalatokról, amelyeket a szerzők kutatásuk során tártak fel, a megfelelő biztonsági és szakmai keretek között értelmezve. Az alábbi négy terület agrárvegyszerekkel kapcsolatosan, direkt és indirekt módon összefüggésbe hozható: az oktatás, a szabályozás, az esettanulmányok<sup>45</sup> és a környezetanalitika.<sup>46</sup> Az ábrán felsorolt lehetőségek biztosíthatják a biztonságos munkavégzést, a jógyakorlatok foganatosítását és a kockázati szintek további csökkentési megoldásait a jövőben.

<sup>43</sup> 2000. évi XXV. törvény.

<sup>44</sup> Európai Parlament és a Tanács 1907/2006/EK rendelete.

<sup>45</sup> LÁSZLÓ 2018.

<sup>46</sup> SZÜCS-VÁSÁRHELYI et al. 2024.

|                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Oktatás</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• felhasználók</li> <li>• gyártók</li> <li>• szállítók</li> <li>• raktározók</li> <li>• elsődleges beavatkozók</li> <li>• minden résztvevő teljes felkészülését biztosítani szükséges</li> </ul> | <p><b>Szabályozás</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• jelenlegi szabályozók folyamatos frissítése</li> <li>• tapasztalatokból adódó új irányok kialakítása</li> <li>• rendszeres európai szakterületi fórum, a konszenzus fenntartása érdekében</li> </ul> |
| <p><b>Esettanulmányok</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• nemzetközi és</li> <li>• hazai káresemények tanulmányozása és a tanulságok, tapasztalatok értelmezése és beépítése, a joggyakorlatok erősítése érdekében</li> </ul>                    | <p><b>Környezetanalitika</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• új módszerek, mérési lehetőségek alkalmazása a környezetszennyezés felderítése érdekében, talajvíz, levegő-mintavételi és hatékony mérésilabor-háttér</li> </ul>                              |

6. ábra: Az agrárvegyyszerek biztonságos használatának alapelvei a kockázatok minimalizálása érdekében; a szerzők tapasztalata és összefoglalása

Forrás: a szerzők szerkesztése

## Felhasznált irodalom

- DOBOR József (2018): Veszélyes szerves anyagok felhasználásának katasztrófavédelmi szempontú elemzése és a szerves kémia technológiai folyamatainak összefoglalása. *Hadmérnök*, 13 (KÖFOP különszám), 43–61. Online: [https://www.hadmernok.hu/180kofof\\_03\\_dobor2.pdf](https://www.hadmernok.hu/180kofof_03_dobor2.pdf)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018): *Soil Pollution: A Hidden Reality*. Rome: FAO. Online: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/I9183EN/>
- KOLEJANISZ Róbert – ÁBRAHÁM Róbert – VÉRTESI Andrea (2021): Növényvédő szerek és növényvédő szer keverékek hatása a környezetre. *Acta Agronomica Óváriensis*, 62(2), 103–115. Online: <https://real.mtak.hu/id/eprint/193168>
- Központi Statisztikai Hivatal [é. n.]: 19.1.1.44. Forgalomba hozott növényvédőszer-hatóanyagok mennyisége [tonna]. Online: [https://www.ksh.hu/stadat\\_files/mez/hu/mez0045.html](https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0045.html)
- LÁSZLÓ Viktória (2018): A biztonságot veszélyeztető tényezők, azok hatásai és következményei napjainkban. *Szakmai Szemle*, 16(3), 36–46. Online: [https://s2prodstorage.blob.core.windows.net/s2cmsblob/Files/Szakmai%20Szemle/SZSZ\\_2018\\_3\\_szam.pdf?sp=r&st=2025-03-25T09:37:58Z&se=2035-03-25T16:37:58Z&spr=https&sv=2024-11-04&sr=c&sig=PAOb3jtCphbbzRgBEutrTUH2uSjRNnF3G8dVal8Y3Z0%3D#page=36](https://s2prodstorage.blob.core.windows.net/s2cmsblob/Files/Szakmai%20Szemle/SZSZ_2018_3_szam.pdf?sp=r&st=2025-03-25T09:37:58Z&se=2035-03-25T16:37:58Z&spr=https&sv=2024-11-04&sr=c&sig=PAOb3jtCphbbzRgBEutrTUH2uSjRNnF3G8dVal8Y3Z0%3D#page=36)
- MÓRITZ Sándor – DOBOR József (2024): A mezőgazdaságban hazánkban alkalmazott veszélyes tulajdonságú vegyi anyagok lehetséges kockázatainak összefoglalása. *Műszaki Katonai Közlöny*, 34(2), 169–178. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2024.2.12>
- Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal [é. n. a]: Magyarország engedélyezett növényvédő szerek hivatalos adatbázisa. Online: <https://novenyvedoszer.nebih.gov.hu/Engedelykereso/kereso>
- Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal [é. n. b]: UPR – Ügyfélkapus rendszer. Online: <https://upr.nebih.gov.hu/login>
- Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti Központ. Online: <https://nngyk.gov.hu/hu/>
- ORE, Odunayo T. et al. (2023): Organophosphate Pesticide Residues in Environmental and Biological Matrices: Occurrence, Distribution and Potential Remedial Approaches. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 9–23. Online: <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2022.10.004>

- PÁTZAY György – DOBOR József (2016): *Ipari tevékenységből eredő veszélyforrások és elhárításuk*. Jegyzet. Online: <http://hdl.handle.net/20.500.12944/10285>
- STEFANOVITS Pál – FILEP György – FÜLEKY György (2010): *Talajtan*. Budapest: Mezőgazda Kiadó.
- SZÜCS-VÁSÁRHELYI Nóra – DOBOR József – PÁTZAY György – RÉKÁSI Márk (2024): Új módszerek és eszközök alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata talajszennyezések kockázatának feltárásában. *Scientia et Securitas*, 5(2), 230–238. Online: <https://doi.org/10.1556/112.2024.00206>
- UNSWORTH, John (2010): History of Pesticide Use. *IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry*, 2010. május 10. Online: [http://agrochemicals.iupac.org/index.php?option=com\\_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=3&sobi2Id=31](http://agrochemicals.iupac.org/index.php?option=com_sobi2&sobi2Task=sobi2Details&catid=3&sobi2Id=31)
- World Health Organization (2011): *Nitrate and Nitrite in Drinking-Water*. Geneva: WHO. Online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241501453>

## Jogi források

2000. évi XXV. törvény a kémiai biztonságról. Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0000025.tv>
- 93/1996. (VII. 4.) Korm. rendelet a környezetvédelmi megbízott alkalmazásához kötött környezet-használatok meghatározásáról. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/1996-93-20-22>
- 123/1997. (VII. 18.) Korm. rendelet a vízbázisok és ivóvízellátó létesítmények védelméről. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/1997-123-20-22>
- 103/2003. (IX. 11.) FVM rendelet a növényvédő szerrel szennyezett csomagolóeszköz hulladékok kezeléséről. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2003-103-20-82>
- 220/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet a felszíni vizek minősége védelmének szabályairól. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2004-220-20-22>
- 246/2014. (IX. 29.) Korm. rendelet hulladékgazdálkodási létesítmények kialakításának és üzemeltetésének szabályairól. Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1400246.kor>
- 309/2014. (XII. 11.) Korm. rendelet a hulladékkal kapcsolatos nyilvántartási és adatszolgáltatási kötelezettségekről. Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1400309.kor>
- 165/2025. (VI. 24.) Korm. rendelet az ADR A és B Mellékletének kihirdetéséről és belföldi alkalmazásáról. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2025-165-20-22>
- 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet a termélnövelő anyagok engedélyezéséről, tárolásáról, forgalmazásáról és felhasználásáról. Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0600036.fvm>
- 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet a növényvédelmi tevékenységről. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2010-43-20-82>
- 44/2005. (V. 6.) FVM–GKM–KvVM együttes rendelet a mező- és erdőgazdasági légi munkavégzésről. Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0500044.fvm>
- 442/2012. (XII. 29.) Korm. rendelet a csomagolásról és a csomagolási hulladékokról. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2012-442-20-22>
- 5/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet a közúti járművek műszaki megvizsgálásáról. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/1990-5-20-5E>
- 6/1990. (IV. 12.) KöHÉM rendelet a közúti járművek forgalomba helyezésének és forgalomban tartásának műszaki feltételeiről. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/1990-6-20-5E>
- 7/2011. (III. 8.) NFM rendelet a mezőgazdasági vegyszerek és üzemanyagok mezőgazdasági vontatóval vagy lassú járművel vontatott pótkocsival történő közúti szállításáról. Online: <https://njt.hu/jogszabaly/2011-7-20-2W>
- 72/2013. (VIII. 27.) VM rendelet a hulladékjegyzékről. Online: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1300072.vm>

- 649/2012/EU rendelet a veszélyes vegyi anyagok kiviteléről és behozataláról (PIC-rendelet). Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0649>
- 1907/2006/EK rendelet (REACH). Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907>
- (EU) 2019/1148 rendelet a robbanóanyag-prekurzorok forgalmazásáról és felhasználásáról. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=CELEX:32019R1148>

Lilla Horváth<sup>1</sup> 

# The Importance of Base Layer in Firefighting Operations

*The aim of this study is to examine how base layers worn by firefighters contribute to comfort, thermoregulation, and freedom of movement during interventions, and how appropriate material composition can support the effectiveness of protective clothing. The research involved testing a base layer set in real interventions and practical scenarios with the participation of firefighters. Usage was documented by the author using a standardised evaluation form assessing the key aspects of comfort, thermal performance, freedom of movement, and functionality. The results indicate that the garments performed favourably in terms of thermal sensation and movement comfort; however, durability and overall satisfaction point to further opportunities for improvement. The study highlights that testing base layers is a process in which practical experience plays a key role and which may, in the future, contribute to improving the ergonomic and safety performance of protective clothing. The author also briefly presents a technological innovation, emphasising that subjective user experience-based evaluation should, in the future, be complemented with objective measurement data.*

**Keywords:** firefighter, protective clothing, base layer, evaluation form, ergonomics

## Introduction

Firefighting is one of the most demanding professions in terms of both physical and psychological strain, where wearing the required protective equipment is vital. During fire incidents and technical rescue operations, firefighters work in a complex, dynamically changing environment where maintaining safe working conditions is a constant challenge. Significant risks during interventions include high temperatures, smoke, toxic gases, and accident factors arising from structural instability. Due to climate change, industrial and technological development, the nature of hazards has changed over recent decades. Increasingly frequent extreme weather events require new types of interventions, further increasing physical

---

<sup>1</sup> National Directorate General for Disaster Management, Ministry of the Interior, e-mail: [lilla.horvath@katved.gov.hu](mailto:lilla.horvath@katved.gov.hu)

workload. In addition, the spread of hybrid and fully electric vehicles poses specific risks, as battery-related fires can be difficult to control.<sup>2</sup>

During interventions, firefighters are exposed to numerous carcinogenic substances and combustion by-products, which may increase the risk of developing cancer in the long term. According to the most recent research findings, the incidence of bladder and prostate cancer, in particular, shows an elevated trend.<sup>3</sup> Their profession also involves substantial psychological strain: traumatic events, heightened responsibility, and continuous readiness increase the risk of post-traumatic stress, depression, and anxiety. Over the long term, mental strain may adversely affect not only psychological well-being but also physical performance and the safety of decision-making.<sup>4</sup>

The complex layering system of protective clothing designed for firefighters aims to balance thermal protection, mechanical resistance, and freedom of movement. One key – yet often underestimated – component is the base layer, which comes into direct contact with the wearer's skin and primarily serves to wick moisture and ensure thermal comfort. Numerous studies have shown that overheating and heat stress not only reduce comfort but also adversely affect reaction time and decision-making ability.<sup>5</sup> Overheating may be accompanied by, among other symptoms, heavy sweating, an increased heart rate, intense thirst, nausea, headache, or dizziness. At high ambient temperatures, the body's protective mechanisms (elevated heart rate, increased breathing, etc.) are rapidly exhausted, leading to rapid dehydration, reduced concentration, and decreased performance. When heat dissipation is no longer possible, core body temperature rises to a dangerous level and heat stroke may develop, potentially resulting in a stroke.<sup>6</sup>

Urbán and Restás point out that firefighters are exposed to significant heat stress during interventions, which places a burden on their body's thermoregulation and circulatory system. Full-body protective clothing, high external temperatures and heavy physical work together rapidly increase body temperature, resulting in reduced performance and concentration. The authors emphasise that overheating may lead to exhaustion, heat stroke, fainting and in extreme cases death. Based on a review of the literature, the study presents various options and tools that may help reduce body temperature, especially during interventions. The main conclusion of the article is that the application of appropriate cooling solutions can contribute to more effective and safer work for firefighters. In my opinion, the study has provided and continues to provide an excellent basis for identifying development directions in this field, however, the presented solutions add extra weight for firefighters, which would mean additional physical strain, therefore I would only support proposal focusing on cooling.<sup>7</sup>

Pántya and Horváth highlight that the multi-layered design of firefighter's protective clothing is important not only for ensuring an adequate level of protection, but also for

<sup>2</sup> PÁNTYA–HORVÁTH 2023a.

<sup>3</sup> ERNST et al. 2025.

<sup>4</sup> OLIVEIRA et al. 2023.

<sup>5</sup> HORVÁTH 2023.

<sup>6</sup> DWORNIK–BINKOWSKA 2023.

<sup>7</sup> URBÁN–RESTÁS 2017.

meeting ergonomic and comfort requirements. In warm environments, one of the essential functions of the clothing is to absorb sweat and transport moisture away, thereby reducing the risk of heat exhaustion and heat stress. The thickness and material composition of the layers are determining factors in terms of thermal insulation and vapour permeability. The article emphasises that the material of the base-layer has the greatest effect on overall comfort, as it is in direct contact with the skin and play a primary role in sweat management.<sup>8</sup>

Matusiak and Sukhbat demonstrated through experimental methods that hygroscopic and capillary processes occurring between the base layer and the layers of protective clothing decisively influence sweat transport and the development of the skin-surface microclimate. Their investigations also showed that, in certain textile assemblies, sweat can accumulate, increasing the likelihood of heat stress. The authors emphasise that optimising the material, fabric structure, and fit of the base layer can significantly improve the wearability of protective clothing and, consequently, the user's performance.<sup>9</sup>

Stygiené et al. investigated double-layer knitted textiles in which the inner layer contained aramid yarn, while the outer layer consisted of an aramid-flame-retardant viscose blend. Their objective was to assess the suitability of these materials as base layers under extreme thermal exposure. The authors emphasised that such materials must provide not only flame resistance but also regulation of the microclimate in the immediate vicinity of the skin, which fundamentally determines perceived comfort during wear. During the study, knitted structures with different patterns and surface designs were tested, and flame resistance, liquid moisture management, water vapour and air permeability, as well as thermal resistance were analysed. Their results showed that all examined textiles met breathability requirements. The best overall performance was observed for materials whose skin-contact surface was porous and embossed. The research highlighted that heat and moisture regulation properties were influenced more strongly by the material structure and surface topology than by the fibre composition itself. In contrast, flame-resistance behaviour primarily resulted from the aramid and flame-retardant viscose yarns used and did not show substantial differences across the various structures. The study concluded that, in the development of base layers, it is not sufficient to merely apply appropriate flame-resistant materials; particular attention must also be paid to the structure and patterning, which can significantly improve thermal comfort.<sup>10</sup>

Zupin et al. explored the comfort and flame-resistance properties of knitted fabrics made from different materials and structures that can be used as base-layer garments for operational firefighters. They examined four different materials (cotton, Tencel, Micromodal) and one flame-resistant blend (Tencel, polyacrylate, Modacryl-Tayrilan). Their measurements showed that the knitting structure has a greater effect on fabric density and dimensional stability than fibre composition. The blend proved more stable after washing than cotton. Air permeability was influenced primarily by the material type: Tencel was the most breathable, while cotton was the least. In terms of thermal conductivity, cotton conducted heat most

<sup>8</sup> PÁNTYA-HORVÁTH 2023b.

<sup>9</sup> MATUSIAK-SUKHBAT 2024.

<sup>10</sup> STYGIENÉ et al. 2022.



effectively, whereas the flame-resistant blend provided greater insulation. Micromodal showed the best water vapour permeability, while the blend wetted through the slowest. Flame-resistance testing indicated that only the blend was truly flame resistant. Based on the results, this blend is suitable for manufacturing and use as a firefighter base layer, as it combines safety and comfort characteristics. The authors recommend further research to examine applicability within combinations of multi-layer protective clothing systems. In my view, the article addresses an issue that is already a relevant problem today, and it is indeed worth pursuing further research in this area.<sup>11</sup>

Eryuruk et al. examined firefighters' protective clothing and its heat and moisture transport properties, with a particular focus on a newly developed flame-resistant base layer. The starting point of their research was the recognition that balancing firefighters' comfort and safety remains challenging, as adequate thermal protection typically comes with less effective ventilation. In their investigation, they applied an innovative base layer made from a blend of para-aramid, flame-resistant viscose, and antistatic materials, and analysed its effects across different clothing-layer combinations. Standardised test methods were used, including FTIR<sup>12</sup> and SEM-EDX<sup>13</sup> analyses to characterise material structure. The new base layer had a favourable effect on one-way moisture transport, meaning that sweat was more effectively transferred from the skin-adjacent layers toward the outer layers. Based on thermal resistance measurements, multi-layer combinations provided greater protection but lower air permeability, clearly demonstrating the trade-off between comfort and protection. Overall, the results suggest that using the new base layer may improve firefighters' comfort during work and thereby indirectly enhance operational effectiveness, while not significantly compromising protective performance.<sup>14</sup> One strength of the study is that the authors combined physical material testing with comfort assessments and adopted a systems-level approach, enabling a detailed mapping of interactions between clothing layers. A limitation of the research is that the measurements were conducted under laboratory conditions; therefore, real firefighting environments were not modelled. Consequently, the study's findings primarily provide a theoretical and developmental basis.

According to the conclusions of the study by Šajatović et al., the protective clothing system examined can provide adequate protection under flame exposure only if it is fully intact and used together with a firefighter base layer. The authors emphasised that the base layer plays a decisive role in preventing injuries and that, in its absence, the user would suffer significantly more burn injuries. They considered simple cotton base layers to be particularly hazardous, as cotton absorbs moisture more quickly and the resulting steam would cause burn injuries to affect a larger area. The authors also pointed out that during prolonged interventions (e.g. wildland or vegetation fires), damaged clothing or improperly layered systems would not provide sufficient thermal protection. In the development of protective clothing, not only the selection of materials but also the functional interaction between layers is important. The

<sup>11</sup> ZUPIN–KNIFIC–ČUDEN 2022.

<sup>12</sup> FTIR: Fourier-transform infrared spectroscopy.

<sup>13</sup> SEM-EDX: Scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy.

<sup>14</sup> ERYURUK et al. 2022.

article highlights the need for closer cooperation among developers, manufacturers, materials engineers, and end users to ensure that the clothing truly meets practical demands.<sup>15</sup> In my assessment, the authors' emphasis on the necessity of such collaboration is fully justified, and I agree that only this type of joint effort can lead to modern protective clothing that performs adequately in real-world practice.

The literature review clearly indicates that an appropriate base layer – together with its material composition and design – plays a fundamental role in reducing heat strain and preventing injuries. Building on this insight, the next chapter presents a base-layer trial/test conducted by the author, which evaluates the performance of different solutions under real-world conditions. The results of the test are then analysed in detail.

## Functional base layer testing and user feedback

In the following, I present the results of a trial of a base-layer set consisting of a leggings (Figure 1) and long-sleeved top (Figure 2). Based on the author's request, the manufacturer modified the base layers, therefore their design and material composition differ from the specifications listed on the manufacturer's website.



Figure 1: Leggings

Source: compiled by the author



Figure 2: Long-sleeved top

Source: compiled by the author

<sup>15</sup> ŠAJATOVIĆ – FLINČEC GRGAC – ZAVEC 2022.

The material composition of both the top and the leggings is as follows:

- 57% modified acrylic
- 37% cotton
- 5% elastic fiber
- 1% antistatic fiber<sup>16</sup>

The design of both garments is intended to support ease of movement, stable thermoregulation, and compliance with safety requirements. A total of four Polish firefighters participated in the test and evaluated the comfort and usability of the garments based on short-term wearing experience during organised practical training sessions and real firefighting incidents. The questionnaire used was developed by the author; therefore, its structure and focus areas were aligned with the objectives of the research. Although, due to the small sample size and limited duration of the trial (approximately three weeks in July 2025), the results are only representative to a limited extent, they nevertheless provide an important starting point for further development. The trends emerging from the feedback clearly indicate how modifications may influence comfort and functional performance in practical use.

The Likert-scale questionnaire related to the base layers examined five main domains: perceived comfort, thermoregulation, freedom of movement, functionality and durability, and overall satisfaction. The use of a five-point scale made it possible for the trial participants' subjective experiences to be captured in a consistent structure and to become quantitatively comparable. The "Comfort" section assessed how well the garment fit the body, whether it caused any irritation, and how well it supported comfort during everyday use. The "Thermal sensation and thermoregulation" section evaluated the breathability, sweat management, and perceived comfort of the material across different temperature conditions. The "Freedom of movement" domain examined to what extent the garment hindered or supported movement during work and how compatible it was with protective clothing, particularly when donning the turnout gear. The "Functionality and durability" items focused on shape and material retention, cleanability, and the garment's contribution to the overall performance of the protective clothing system. Finally, the "Overall satisfaction" section assessed users' overall impression and their willingness to recommend the product. The selection of these domains was justified because they most strongly determine the practical usability of base layers in a firefighting environment. The questionnaire responses provided by the firefighters were averaged by the author within each domain, resulting in a single, standardised score for each category.

Based on Table 1, for the leggings, the highest score was obtained for "Functionality and durability" (4.58), indicating that the trial participants were satisfied with the material quality, shape retention, and the extent to which the garment contributed to the wearing comfort of the protective clothing system. "Comfort" received an average score of 4.33, suggesting that the leggings fit well and provided adequate comfort. The "Freedom of movement" score

---

<sup>16</sup> See: <https://pwkrystian.com>

of 4.25 is also favourable, as the garment did not meaningfully hinder performance during work. The "Thermal sensation and thermoregulation" score of 4.00 suggests that the leggings managed moisture and breathability appropriately, although there may be opportunities for fine-tuning in this area. The "Overall satisfaction" score of 4.00 reflects positive feedback overall: participants were generally satisfied with the base layer, and based on their overall impression, it provides a suitable starting point for further development.

Table 1: Summary of user feedback from the trial use of the base layer leggings

| Aspects                                | Rating |
|----------------------------------------|--------|
| Functionality and durability           | 4,58   |
| Comfort                                | 4,33   |
| Freedom of movement                    | 4,25   |
| Thermal sensation and thermoregulation | 4      |
| Overall satisfaction                   | 4      |

Source: compiled by the author

Table 2 presents the user evaluation of the base layer top, which showed moderate results. During the trial, the highest scores were given to "Freedom of movement" and "Thermal sensation and thermoregulation," both with a value of 4.25, indicating that the top adapted well to workloads of different intensity, did not restrict movement, and managed heat dissipation appropriately during the exercises. The result for "Comfort" (4.17) suggests that the trial participants had relatively positive experiences regarding wearability, although the score is slightly lower than the value observed for the leggings. This may indicate that certain details (e.g. seam placement) could require minor fine-tuning; nevertheless, comfort remains one of the strengths of the top. From the perspective of "Functionality and durability," the top achieved a score of 3.92, which is stable but somewhat more restrained. The lowest score was recorded for "Overall satisfaction" (3.75), indicating that the participants considered the top less outstanding than the leggings. Based on the feedback, the top may serve as a suitable starting point; however, the necessary fine-tuning could further increase overall user satisfaction.

Table 2: Summary of user feedback from the trial use of the base layer top

| Aspects                                | Rating |
|----------------------------------------|--------|
| Freedom of movement                    | 4,25   |
| Thermal sensation and thermoregulation | 4,25   |
| Comfort                                | 4,17   |
| Functionality and durability           | 3,92   |
| Overall satisfaction                   | 3,75   |

Source: compiled by the author

The results of the trial use align well with the principle that the development of protective clothing requires continuous testing and multiple iterations. As the tests were not conducted under laboratory conditions but in real training or intervention scenarios, the evaluation inherently reflects the subjectivity of user experience and the variability of everyday workload conditions. Due to the short duration and the limited number of participants, the findings cannot be considered comprehensive; however, they provide important guidance on which modifications improved comfort and functionality and where further development is justified. In this form, user feedback represents added value because it demonstrates garment performance in a realistic field environment, thereby contributing to the development of a base-layer set that is reliable in the long term and proven in practice.

In addition to subjective evaluation, instrument-based data collection can also provide useful information, as it can help confirm personal responses related to wearing the garments. In the following, the author presents a technology that, given the current state of the art, can be considered novel and is highly suitable for the objective interpretation and evaluation of the collected data.

## Instrument-based support

Equival's solution recommended for firefighter (first responder) applications can logically be described as the pairing of a wearable sensor and a central server/software platform. During interventions or training, continuous and objective data are available on firefighters' physiological workload, which can support the early identification of overload and heat-stress risk. One component of the system is the eq02+ LifeMonitor, which is worn as a chest strap/belt and is designed to measure multiple physiological parameters simultaneously. According to the manufacturer's specifications, the device is designed for environmental conditions that may be encountered during field use (e.g. temperature range, water resistance). The other wearable device is the eq LifeBand, which is provided in an armband format. Based on the available descriptions, the device connects to the Black Ghost system and enables the use of individualised thresholds and alerts; the manufacturer also emphasises alignment with professional heat-stress guidelines. The hardware components are integrated by the Black Ghost software, which provides centralised data visualisation and analysis, thereby offering command staff a clear, real-time overview of personnel workload.<sup>17</sup>

The Core Temperature Monitoring function within the system appears to be a particularly interesting innovation: it provides true core temperature data in addition to conventional physiological signals (e.g. respiratory rate, heart rate) by using an ingestible (non-digestible) capsule. According to the product page, this solution is implemented in conjunction with BodyCAP eCelsius capsules and the Equival sensor system. The capsule weighs only 1.7 g and reports values with an accuracy of  $\pm 0.2$  °C, enabling simultaneous monitoring of up to eight individuals. The description also provides information on battery life: 20 days when using

<sup>17</sup> See: <https://equivital.com/industry/first-response>

a 30-second measurement interval.<sup>18</sup> I consider the option for group monitoring particularly advantageous, because the measured and evaluated data make it possible to compare the physiological workload associated with different assignments and on-scene roles, which could later provide a basis for fine-tuning organisational practices.

I consider this solution particularly strong as a first step for piloting and proof of concept, primarily in a training environment and during interventions where heat strain is typically elevated (e.g. enclosed-space operations or work performed in summer heat). In addition, it could also be applied in the evaluation of the base layer experiment described, so that the assessment would not rely solely on firefighters' subjective feedback but could be supported by objective physiological data as well. When interpreted side by side, the measurement results and the numerical outputs of the wear-trial evaluation form can reinforce the conclusions; in cases of contradiction, they can also provide an early indication that a given factor (e.g. material, design) requires further review, allowing the necessary corrections to be implemented more quickly.

## Summary

Based on the results of the research, I have concluded that further development of base layer garments remains justified. The practical trials showed that the modified garments performed well in several respects, but did not produce equally strong results across all domains. Freedom of movement and comfort received particularly positive feedback; however, several remarks were made regarding overall satisfaction. These findings imply that the current solutions remain provisional. Due to the short testing period and the small number of participants, the conclusions are limited, but they clearly indicate the main directions for improvement.

The diversity of real intervention scenarios provided valuable feedback on how the materials perform in practice. Practical experience also brought to light several factors that cannot be assessed precisely under laboratory conditions. Workloads of different intensity revealed different potential failure points or comfort-related differences. Participants' observations highlighted that the behaviour of base layers is highly dependent on the type of intervention. Overall, the trial experience demonstrates that base layer development is not a one-off task; longer wear periods and a larger sample are required for a more robust assessment.

Based on the foregoing, it is evident that the experience gained from the wear trial is valuable; however, the reliability of the conclusions would be enhanced by complementing subjective feedback with objective physiological measurements. I also reviewed this possibility through a market example: Equivital's Core Temperature Monitoring solution applies ingestible capsule-based core temperature monitoring, which can quantitatively track workload and heat-stress trends in line with real operational conditions. As a result, research on base layer testing could rely not only on perceived sensations but also on measurable parameters confirming user experience when the findings align, and providing timely indication of the need for further fine-tuning when discrepancies occur.

<sup>18</sup> See: <https://equivital.com/products/bodycap-core-temperature-pills>

## References

- DWORNIK, Tadeusz – BINKOWSKA, Aneta (2023): The Impact of High Temperatures on the Work of a Firefighter in Nomex Protective Gear. *Critical Care Innovations*, 6(3), 21–36. Online: <https://doi.org/10.1097/01.JAA.0000979372.60619.dd>
- ERNST, Vanessa Sophie et al. (2025): Assessing Cancer Risk in Firefighters in Northern Germany: A Retrospective Cohort Study. *BMC Public Health*, 25(2998), 1–9. Online: <https://doi.org/10.1186/s12889-025-24342-3>
- ERYURUK, SH et al. (2022): Heat and Moisture Transfer Properties of a Firefighter Clothing with a New Fire-Resistant Underwear. *Journal of Industrial Textiles*, 51(3S), 4480S–4513S. Online: <https://doi.org/10.1177/1528083721993775>
- HORVÁTH, Lilla (2023): The Psychological Effect of Wearing Firefighter Personal Protective Equipment on the Firefighter. In ČABALOVÁ, Iveta (ed.): *ŠVOČ Student Scientific and International Conference*. Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen, 43–52.
- MATUSIAK, Małgorzata – SUKHBAT, Otgonsuren (2024): Analysis of Liquid Sweat Transport in Underwear Combined with Multilayer Fabric Assemblies for Firefighter Outfits. *Materials*, 17(23), 1–14. Online: <https://doi.org/10.3390/ma17235920>
- OLIVEIRA, Joana et al. (2023): Mental Health and Post-Traumatic Stress Disorder in Firefighters: An Integrated Analysis from an Action Research Study. *Frontiers in Psychology*, 14, 1–18. Online: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1259388>
- PÁNTYA, Péter – HORVÁTH, Lilla (2023a): Presentation of the Hazardous Environment in the Light of Firefighting Activity. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(1), 85–93. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.1.6>
- PÁNTYA, Péter – HORVÁTH, Lilla (2023b): Analysis of the Material Characteristics of Firefighter Personal Protective Clothing. *Hadmérnök*, 18(2), 73–81. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2023.2.4>
- ŠAJATOVIĆ, Anica Hursa – FLINČEC GRGAC, Sandra – ZAVEC, Daniela (2022): Investigation of Flammability of Protective Clothing System for Firefighters. *Materials*, 15(7), 2384, 1–15. Online: <https://doi.org/10.3390/ma15072384>
- STYGIEŃ, Laimutė et al. (2022): Flammability and Thermoregulation Properties of Knitted Fabrics as a Potential Candidate for Protective Undergarments. *Materials*, 15, 2647, 1–22. Online: <https://doi.org/10.3390/ma15072647>
- URBÁN, Anett – RESTÁS, Ágoston (2017): Making Body Temperature Lower to Raise the Safety Level of Firefighters' Intervention. *ECOTERRA – Journal of Environmental Research and Protection*, 14(1), 47–51.
- ZUPIN, Živa – KNIFIC, Karmen – ČUDEN, Alenka Pavko (2022): Comfort Properties of Functional Double Bed Knitted Fabric for Firefighters Underwear. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 33(3), 249–261. Online: <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1065942>



Baumann Szilárd<sup>1</sup> 

# Mi is szolgálunk!

## A kutya katonai alkalmazása

### We Also Serve!

#### The Military Use of Dogs

*A kutya és az ember kapcsolata egy történelmi távlatokon keresztül ívelő kapcsolat. Az emberiség írott történelme azonban ennek a kapcsolatnak nem csupán a vallási, kulturális vagy művészeti oldalát mutatja be, hanem a kutyaéknak az emberi konfliktusok során – sokszor a pusztítás eszközeként – betöltött szerepéről is megemlékezik. A faj sokoldalúsága, fizikai adottságai, a környezeti változások érzékelésében mutatott kiemelkedő képességei, az ember felé mutatott szeretete és ragaszkodása, szociális tanulása és taníthatósága lehetőséget nyújt a kutya különböző irányú képzésére. Ezen előnyös tulajdonságok ismeretében a katonai területeken felmerülő problémák és kihívások egy részére kézenfekvő megoldásként vetődik fel a célirányosan képzett kutya alkalmazása, amelyet nem kronologikus rendben, hanem az egyes történelmi korszakokban megjelenő új alkalmazási formák és képességek bemutatásán keresztül vizsgálunk. Kiemelendő tulajdonsága a szaglás, és ennek területén mutatott érzékelési tulajdonságai által – a 20–21. század hatalmas mértékű technikai fejlődése ellenére – rugalmasabb, kompaktabb és adott körülmények között hatékonyabb feladatellátást biztosít bármely gépesített technológiánál.*

*A tanulmány célja, hogy átfogó képet adjon a kutyák katonai alkalmazásának fejlődéséről, bemutatva azok történeti gyökereit, a különböző korszakokban kialakult felhasználási módokat, valamint a modern és posztmodern hadviselésben betöltött szerepüket. A vizsgálat külön hangsúlyt fektet a kutya szaglási képességeinek biológiai és kémiai alapjaira, és arra, hogy ezek miként járulnak hozzá a katonai feladatok – különösen a felderítés, robbanóanyag-keresés és nyomkövetés – hatékony végrehajtásához.*

**Kulcsszavak:** kutya, szaglás, védelem, felderítés

<sup>1</sup> Robbantástechnikai szakember, e-mail: [baumannszilard@gmail.com](mailto:baumannszilard@gmail.com)

*The relationship between dogs and humans spans the course of history. However, the written history of humanity not only highlights the religious, cultural, and artistic aspects of this relationship, but also commemorates the role dogs have played in human conflicts – often as instruments of destruction. The breed's versatility, physical attributes, outstanding ability to sense environmental changes, affection and devotion toward humans, as well as its capacity for social learning and trainability, offer opportunities for training dogs in various fields. Given these advantageous traits, the use of a purposefully trained dog emerges as an obvious solution to some of the problems and challenges arising in military contexts, which I examine not in chronological order but through the presentation of new forms of application and capabilities that emerged in specific historical periods. A key feature is their sense of smell and the sensory capabilities they demonstrate in this area – despite the massive technological advancements of the 20<sup>th</sup> and 21<sup>st</sup> centuries – which ensures more flexible, compact, and, under certain conditions, more effective task performance than any mechanised technology.*

*The aim of this study is to provide a comprehensive overview of the evolution of the military use of dogs, highlighting their historical roots, the ways they have been utilised across different eras, and their role in modern and postmodern warfare. The study places particular emphasis on the biological and chemical foundations of a dog's olfactory abilities and how these contribute to the effective execution of military tasks – particularly reconnaissance, explosive detection, and tracking.*

**Keywords:** dog, smell, protection, reconnaissance

## Bevezetés

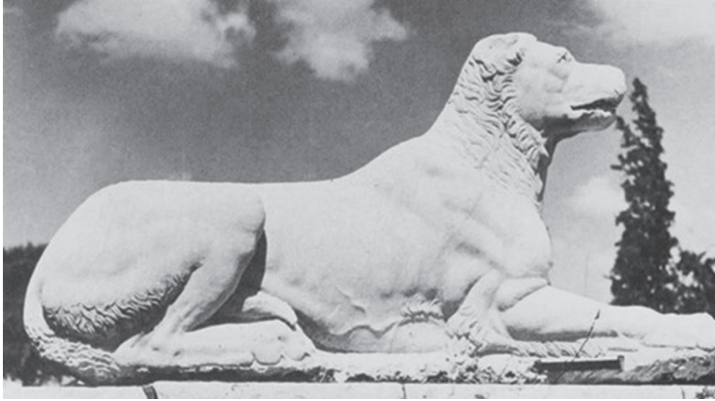
A kutyának az emberi történelem fegyveres konfliktusai során betöltött szerepéről az első írott mű Edward Seymour Forster (1879–1950) nevéhez fűződik, aki a görög klasszikusok oktatója volt a Sheffieldi Egyetemen. 1941-ben írt művében<sup>2</sup> törekedett összegyűjteni adatokat, jellemzően görög írásos emlékek alapján és azokat összehasonlítani a kutyáknak az akkor folyó háborúban történő alkalmazásával. Az általa fellelt és a klasszikus forrásokban feljegyzett legkorábbi alkalmazást Kr. e. 600 körül lüdiai Alüattész említette. Ennek során egy ókori sztyepei nép, a kimmerek elleni csatában harci kutyákat vetettek be, amelyek néhány ellenséges harcost megöltek és többeket megfutamítottak.

## Kutyák a háborúban

Az ókorban a kutyákat minden nép alkalmazta. A kor harci kutyája, a Canis Molossus nagy termetű, erős állat volt (1. ábra). A fajta valószínűsíthetően az ókori Görögország északnyugati és Dél-Albánia hegyvidékein élő pásztornéptől származhat. Fizikai alkata, ereje, kitartása és harckészsége miatt elsődlegesen az ember elleni erőszakra képezték őket, az igénybevételt elsődlegesen az őrzés és a járőrözés jelentette, a csatában páncélban és széles, tüskés nyakörvvel felszerelve vett részt a küzdelmekben.

---

<sup>2</sup> FORSTER 1941.



1. ábra: A molosszus kutya szobrán jól látható erőteljes testfelépítése

Forrás: *Albanian Studies* [é. n.]

A rómaiak kutyakiképző farmokat működtettek Capuában, ahol már szelektálták és a célnak megfelelően képezték a kutyákat. A harci kutyák sorában megjelent a krétai masztiff és a római molosszus vagy Canis Pugnax, amely a mai Cane Corso őse.

A kutyakiképzés az alábbi feladatokra összpontosult:

- közelharcra,
- hírek továbbítására,
- felderítésre.

Ez utóbbira jellemzően kisebb testű kutyákat használtak, mint a salento, az umbriai és etruszk kutyák.

A középkorban a kutya katonai alkalmazása Európában átalakult, hiszen a haditechnika fejlődésével nagy csatákban már nem vett részt, de – tekintve az őrzést és a járőrözést – szerepe nem szűnt meg. A társadalmi fejlődés következtében a kutya státusza megváltozott, előtérbe került a nemességen és az uralkodó osztályon belül. Képességeit a vadászatokon hasznosították, hiszen munkájával megkönnyítette a vad felderítését, üldözését és az elejtett vad felkutatását. Az uralkodócsaládok között egy-egy értékesebb kölyök vagy alom ajándékozása magas szintű gesztusnak minősült. A nagy munkaképességű kutyák jelentős értéket képviseltek, ezért gondozásukra jelentős figyelmet fordítottak.

Megjelentek a kedvtelésből, háziállatként tartott kutyák is, ami jórészt az arisztokrácia körében volt jelentős, annak ellenére, hogy az egyház helytelenítette ezt. A hölgyek – talán anyai ösztöneik miatt – előnyben részesítették a kistestű ölebeket, úgy vélekedtek: „minél kisebbek, annál több örömet okoznak”.

Angliában a kutyák hadviselésben való alkalmazásában jelentős változás nem történt, azokat a továbbiakban is az ókori elvek szerint vették igénybe. A lovasság elleni közdelemben az ír farkaskutya szerepe értékelődött fel, hiszen hatalmas termete és testtömege (2. ábra) lehetővé tette számára a lovas lerántását a nyeregből és a földön történő küzdelmet.

A harci taktika szerint a kutya nem egyedül, hanem vezetőjével együtt küzdött. Amíg a kutya támadása lekötötte az ellenséges harcos figyelmét, hiszen az eredetileg farkasok ölésére tartott kutya a támadása során jelentős sebzéseket okozott számára, addig a vezetője hidegfegyverrel küzdött ellene, és a lovas megölésével az alakzatot is megbonthatták.



2. ábra: A kan ír farkaskutya marmagassága 81–86 cm, testtömege legalább 55 kg  
Forrás: DOGX [é. n.]

Bár az alkalmazás módja számottevően nem változott, a kutya megfélemlítő pszichológiai hatását megfigyelték és kihasználták. Vallási szempontból az iszlámban a kutya tisztátalan állatnak számít (főleg a nyála), ezért sok muszlim kerüli a velük való érintkezést. Talán ennek is volt köszönhető, hogy a legenda szerint az angol uralkodó, I. (Oroszlánszívű) Richárd nagyon sok kutyaival indult az 1190. évi III. keresztes hadjáratba.

## Kutyák az I. világháborúban

A modern korban, 1885 októberében a kutyák katonai szolgálata „reguláris” lett, amikor a császári német hadsereg – eleinte csupán próbaképpen – néhány ebet hivatalos állományba vett, a kiképzési irányok az alábbiak voltak:

- hírvivő, hírszolgálatos,
- előőrs- és figyelőszolgálat,
- sebesültkutató.

A Nagy Háborúban a gépesített hadviselés megjelenésével soha nem látott mértékű pusztítás vette kezdetét. A modern tüzérség, a sorozatlövő tűzfegyverek, az aknavetők, a nagy hatású robbanóanyagok, a mérges gázok alkalmazása és az új taktikák kombinációja azonkívül, hogy számtalan katona életét követelte és számtalan sebesülést okozott, technikailag

megnehezítette a csapatok közötti kommunikációt és a csapatok ellátását, és számtalan, addig nem tapasztalt kihívást jelentett a katonák számára. A tűz vagy az ellenség megfigyelése, pásztázása alatt lévő harctéren maradt sebesült katonák kimentése óriási terheket rótt a felekre és közvetlen életveszélyt az abban részt vevőkre. A hadviselő felek – értékelve az addigi tapasztalatokat – új igénybevételi módot találtak a kutyák harctéri feladatainak ellátására.

A német Császári Hadsereg után hamarosan megjelentek az Osztrák–Magyar Monarchia, Olaszország, a cári Oroszország és Franciaország katonai egységeiben is, ahol a kommunikációs problémák – minthogy a kicsiny, de nagy teljesítményű rádiók kifejlesztése még csak kezdeti stádiumban volt – megoldására üzenetvivőként állították őket rendszerbe, így a híradó és futárszolgálatot igen gyakran a kutyák látták el. Ők vitték a parancsokat, térképeket vagy a nyakukra, hátukra kötött kábeltekerceket, a rájuk erősített tartókban a postagalambokat, amelyek segítségével ismét sikerült megteremteni az összeköttetést az egymástól elszakított egységek között. Erre a célra a német hadsereg megközelítőleg 20 ezer kutyát vetett be.

A háború előrehaladtával – a kialakult állásháború megtörésére – a hadviselő felek különböző gázokat vetettek be (3. ábra). Ezek kezdetben csupán irritáló anyagokat tartalmaztak, majd a védekezés fejlődésével más, egyre nagyobb pusztító hatás elérésére képes fojtó, hólyaghúzó hatású harcanyagokat, illetve ezek kombinációit. Mivel a kutyákat ebben a helyzetben sem lehetett nélkülözni, ezért gondoskodni kellett gázvédelmükről (4. ábra).



3. ábra: Gázfúvás során hátraküldött kutyák Saint-Quentin környékén, 1918-ban.

A kép jobb szélén futó kutya szinte észrevehetetlen

Forrás: MILLER 2017

Köztudott, hogy a kanári nagyon érzékeny a különböző természetes gázokra, ezért mélyművelésű bányában gyakran használták a tragédiák megelőzésére. A kutyákat – kiváló szaglásuk és kifinomult érzékeik miatt – a fronton vették igénybe a gázcsapások előrejelzésére.



4. ábra: Francia kutya kezdetleges gázárlarcban 1915-ben

Forrás: Rare Historical Photos [é. n.]

A háború kitörését követően a német szanitéc kutya egyesület lázas munkába kezdett. 1914 augusztusában már kiképzett kutyák jelentek meg a hadseregben, és 1916 elején 2500 kutyás szanitéc teljesített szolgálatot a német haderőben. Egészségügyi szolgálatra döntően német juhászkutyákat, airedale terriereket, dobermannokat és rottweilereket alkalmaztak. Megjelentek a sebesültkutató és mentőkutyák, amelyeket hámmal szereltek fel. A hámon lévő mellényben élelem, víz, szeszesital és a katona önellátására kötszer volt.

A kiképzés különlegessége volt, hogy a kutyáknak a feladatuk végrehajtása során nem szabadott nyomot követnie, hanem légszimattal kellett keresniük. Eleinte úgy képezték ki őket, hogy ugatással jelezzék, ha sebesülthez találtak, ezzel azonban gyakran az ellenséges mesterlövészek figyelmét is felkeltették. Később a kiképzés során különös hangsúlyt fektettek arra, hogy a kutya nesztelenül mozogjon, ne ugasson, és se a sebesülthöz, se elhagyott, gazdátlan tárgyhoz (ami lehetett akár akna is) lehetőség szerint ne érjen hozzá. A sebesült katona azonosítását követően a kutya a sebesült valamely tárgyát – erőszak alkalmazása nélkül – magához vette, majd a vezetőjéhez vitte. A kutya tehát a tárggyal jelezte, hogy kutatása eredménnyel járt, ezt követően a vezető az ebet pórázra vette, és az a sebesülthöz vezette (5. ábra).

Az abszolút csendes keresést az jelentette végül, amikor a Bringsel-módszerben<sup>3</sup> egy kis bőrdarabot erősítettek a kutya nyakörvére, amelyet a kutya a szájába vett, amint sebesült katonát talált, majd visszament a gazdájához, és így „jelentette” a találatot.<sup>4</sup>

<sup>3</sup> A módszert a mai napig használják, a tanításról videó elérhető a <https://www.mddogs.org/md-dogs-blog/training-a-bringsel-alert> oldalon.

<sup>4</sup> LORENZ 2017.





5. ábra: A hadikutya segítségével a német szanitéc csapatok ráakadnak egy sebesültre

Forrás: Országos Széchényi Könyvtár [é. n.]

A belga csapatok előszeretettel, de az angolok is használtak kutyafogatokat a felszerelés, géppuska szállítására (6. ábra). A belga masztiffot<sup>5</sup> (Chien de Trait Belge) robusztus testfelépítése, szakadatlan munkakedve tette alkalmassá a feladatra, mindamellett jó védőösztönökkel rendelkezett.



6. ábra: Igavonó kutyák a belga csapatoknál

Forrás: The National World War I Museum and Memorial [é. n.]

<sup>5</sup> A gazdáján kívül senkit nem fogadott el. A két világháború pusztítása következtében a fajta a 20. század második felében kipusztult.



A kiképzett kutyák az előretolt állásokban, a figyelő- és az őrszolgálatok során is nagy szolgálatot tettek. Az állatok – kifinomult érzékszerveikkel – viszonylag nagy távolságról észlelték és jelezték a közeledő személyeket akár a szaguk, akár lépéseik hangja alapján. Az észlelésen túl őrző-védő képességeik is voltak, megtámadták a vonalba belépő ellenséget.

## Kutyák a II. világháborúban

A kutyák bizonyítottak a Nagy Háborúban. A 20 éves fegyverszünet<sup>6</sup> alatt az országok – lehetőségeik függvényében – felkészültek az újabb igénybevételekre, illetve a korábbi harci tapasztalatokat igazították a fejlettebb technikai eszközökhöz. Az amerikai hadsereg kanadai segítséggel ejtőernyős kutyákat képzett ki, amelyeket az elszigetelt helyeken lezuhant pilóták felkutatására szándékoztak bevetni (7. ábra). A kutyák kiképzésük során 10 kg felszereléssel – amit a pilóta utánpótlásának szántak – akár 75 mérföldet (~121 km) is meg tudtak tenni és megtanultak repülőből ugrani, ám a bevetés végül nem valósult meg.



7. ábra: Gépelhagyás a kiképzés közben

Forrás: DOLAN–HYMEL 2004

A szovjet hadsereg a Szovjetunió területére benyomuló ellenséges csapatok feltartóztatására kutyákkal végzett 1941–42-ben páncélelhárítási kísérleteket.

Az elgondolás lényege az volt, hogy a kutya az ellenséges harckocsi alá kúszva helyez el robbanószerkezetet. A kiképzés során azonban ezt nem tudták megtanítani, így a robbanószerkezetet a kutya hátára szerelték, hogy azt egy döntőpálcás gyújtóval – élő aknaként – a harckocsi alatt hozza működésbe (8. ábra). A kiképzést követően a harctéri tapasztalatok nagyon kedvezőtlenek voltak.

<sup>6</sup> Ferdinand Foch francia generalisszimusz, katonai teoretikus kijelentése a versailles-i békéről: „Ez nem béke, csak fegyverszünet 20 évre.”



8. ábra: Páncéelhárító kutya kiképzése

Forrás: NAVARRO [é. n.]

A jelentések szerint sűrűn előfordult, hogy a kutyák – hátukon a már élesített robbanószerkezettel – az indítást követően visszatértek vezetőjükhöz, vagy nem a német harckocsik felé véve az irányt közvetlen életveszélyt jelentettek a saját erőkre. Ezen körülmények miatt a programot törölték.

Ennél sokkal életképebb és távlati hatású elképzelés volt a német gyártmányú, minimális fémtartalmú aknáknak kutyákkal történő keresztetése, az 1942-ben megalakult angol Királyi Hadikutya-kiképző Iskolában. A német hadianyagok között a Glasmine 43, a Schützenmine 42 és a Topfmine család variánsai voltak ilyenek, amelyek felderítése a kor körülményei között nehéz és hosszadalmas feladat volt. Az 1944. június 6-i partraszállást követően Angliából négy kutyas szakasz érkezett Normandiába, a kutyák igénybevétele növelte az aknamezők felderítésének hatékonyságát, a korabeli vélekedés szerint annak a leggyorsabb módja volt.

Az eddig bemutatott példák összefoglalják a kutyák katonai képességeinek ismertetését a második világháború végéig tartó időszakban. Az ember őrzésvédelmi célja elérése érdekében kihasználta a kutya testi felépítését, erejét, kitartását, küzdőképességét és igénybe vette érzékszerveit. Míg a fizikai tulajdonságai könnyen értelmezhetők, az észleléssel, ezen belül a szaglással kapcsolatos ismereteket szükséges jobban kibontani.

## A kutya adottságai

A kutya minden olyan dolog – ide számítva az élő személyeket és a holttesteket is – keresésére kiképezhető, amelynek egyedi vagy rá jellemző szaga van. A megállapítás vizsgálatához szükséges a mondat összetevőinek elemzése.

Elsősorban azt fontos leszögezni, hogy nem minden fajta alkalmas a keresőmunkára. Az egyed kiválasztása a jövőbeli munka megalapozásának az egyik, ha nem a legfontosabb

tevékenysége, amely mindig egy ökölszabállyal kezdődik. Mindig a tervezett tevékenységnek megfelelő fajtából származó, egészséges egyedeket kell választani. Társállatnak nyugodt, kiemelkedő szociális képességekkel és adottságokkal, míg munkakutyának megfelelő keresőképességgel, temperamentummal, ösztönkészséggel, kommunikációs képességekkel, munkastílussal rendelkező egyedeket. Ez egyrészt biztosítja a tanulási folyamat egyenletességét, másrészt a póráz mindkét végén sikerélményt biztosít a kiképzés során.

## Az idegrendszer típusai

Anélkül, hogy átlépném e cikk kereteit, szükséges röviden ismertetni a kutyák idegrendszerének típusleírását, amelyet vérmérsékletként vagy temperamentumként is aposztrofálhatunk. A vérmérsékleten tulajdonképpen azt értjük, hogy a kutya idegrendszere miképpen válaszol a környezet különböző ingereire. Az állat vérmérsékletét az anyagcsere, a belső elválasztású mirigyek (például a pajzsmirigy) működése is jelentős mértékben befolyásolja.

A kutyákat Pavlov típusrendszere alapján négy idegalkati, viselkedésbeli alaptípusba sorolhatjuk be; ezek a következők:

- ingerlékeny, féktelen típus (kolerikus): A kolerikus kutyák ingerlékenyek, fékezhetetlenek, minden ingerre gyorsan reagálnak, a gátlások (fékezhetőség) kialakulása lassú bennük. Az ilyen állatok fáradhatatlanok, gyorsan és nagy energiával dolgoznak, de nagyon nehéz őket önuralomra, fegyelemre szoktatni. Igaz, hogy rendkívül rámenősek, harciasak, és ez bizonyos fajtáknál olykor inkább előny, mint hátrány.
- élénk, mozgékony típus (szangvinikus): A szangvinikus ebek mozgékonyak, kiegyensúlyozottak, a feltételes reflexek gyorsabban kialakulnak bennük, kitartók, megbízhatók, ezek a kutyák a legjobban képezhetők.
- nyugodt, lassú típus (flegmatikus): A flegmatikus állatok kiegyensúlyozottak, nyugodtak, lassúak, sőt kifejezetten lusták. A feltételes reflexek viszonylag hosszabb idő után alakulnak ki bennük, viszont tartósan és szilárdan megmaradnak. A flegmatikus ebek kiképezhetők, de csak hosszú idő és sok kitartás, türelem árán.
- gyenge típus (melankolikus): A melankolikus kutyák gyávák, félénkek, gátlásos állatok, és rendkívül nehezen taníthatók. A körülmények kedvező összejártsága, a kiképző halatlan türelme és szakértelme, gazda és kutyája szerencsés egymásra találása szükséges ahhoz, hogy az ilyen kutyából használható eb váljék.

Pavlov hangsúlyozta, hogy ezek az idegalkati kategóriák természetesen csak meglehetősen elnagyolt vázai a kutyák tényleges karakterének. Annál is inkább, mert a négy idegalkati alaptípus nagyon ritkán fordul elő tisztán, önmagában. A kutyák idegalkati osztályozásával kapcsolatban azt is hangsúlyozni kell, hogy a veleszületett öröklődő tulajdonság mellett a szocializálás körülményei, a környezet, a nevelés nagymértékben befolyásolhatja. A kutya idegalkati típusa tehát bizonyos keretek között megváltoztatható. Az állatok viselkedését

és a környezetükből érkezett ingerekre adott válaszait nagy részben a velük született ösztönök és az érzelmi reaktivitásuk<sup>7</sup> határozzák meg. Azok a kutyák, amelyek hosszú évtizedeken keresztül egy adott célra voltak szelektálva, és őseik között a mai napig akadnak dolgozó egyedek, jellemzően erősebb ösztönökkel bírnak. A magas (de nem kezelhetetlen) zsákmányösztön – megfelelő irányítás és kontroll mellett – biztosítja a munka lendületét, a kutya törekvését, idegrendszeri kitartását.

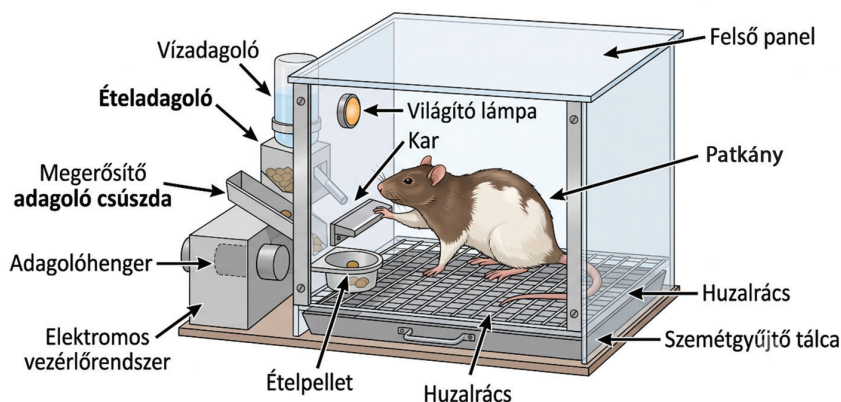
## A kondicionálás

A kutya kiképzése egy nagy gyakorlatot, alapos tudást és mély hozzáértést feltételező tevékenység, ahol a kiképző rugalmasan a kutya idegalkatának és aktuális állapotának megfelelően, következetesen viszi végig a képzési programot. A kiképzés tulajdonképpen egy tanulási folyamat, ahol a kutyát megfelelően beállított helyzetekben és interakciókban tanítják. A legtöbb kiképzési technika a klasszikus és operáns kondicionálási elvekre támaszkodik, amelyek megértéséhez egy kicsit át kell lépni a pszichológia területére.

A klasszikus kondicionálás története Pavlovval indul. A kutató a kutyákkal folytatott kísérletezés közben kivarrta a kutya nyálcsövét, kivezette és vizsgálta annak az emésztéssel összefüggő termelődését. A kísérlet során arra figyelt fel, hogy az állat nyáleválasztása nem az ételnek a szájba juttatásakor – kvázi az ízérzet kialakulásakor – hanem már az étel vagy az ételt hozó személy látványától is beindult. A kísérleti szituációban közvetlenül azelőtt, hogy a kutya megkapta az ételt, megszólalt egy csengő. Ezt többször megismételve azt tapasztalta, hogy a nyáleválasztás már a csengőszóra beindul. A fentiek alapján megállapította, hogy az étel és a nyáladzás között feltétlen kapcsolat van, tehát egy feltétlen inger képes generálni egy feltétlen reakciót. Azt is észrevette, hogy a kutya tudatában a csengőszó feltételesen társul az ételhez, de a társítás után már önmagában is kiváltotta a nyáltermelést, amit ebben az esetben feltételes válasznak nevezett. Azt is megfigyelte, hogy a csengőszó után adott étel megerősítette a választ, de amikor elmaradt az étel adása, tehát a megerősítés, a válasz viszonylag hamar elmaradt, azaz kioltódott.

Az operáns kondicionálás kifejezés egy olyan típusát írja le a viselkedésnek, amelyben a kísérlet alanya valamilyen formában aktívan befolyásolja a környezetét. Amennyiben a befolyásolás végeredménye számára kedvező, a befolyásoló viselkedés megjelenési valószínűsége megnő. Amennyiben a viselkedés következménye számára előnytelen, annak megjelenési valószínűsége csökken.

<sup>7</sup> SHERMAN et al. 2015.



9. ábra: A Skinner-doboz elvi vázlata

Forrás: a szerző szerkesztése

Úttörő jellegű volt Burrhus Frederic Skinner<sup>8</sup> (1904–1990) operáns kondicionálás tanulmányozására kidolgozott módszere (9. ábra):

„A skinneri kísérletben egy éhes állatot (általában patkányt vagy galambot) helyeznek egy dobozba, amelyet népszerű nevén Skinner-doboznak neveznek. A doboz belseje teljesen csupasz, kivéve egy kiálló pedált, amely alatt egy etetőtál van. A pedál felett egy kis fényt kapcsolhat be a kísérletvezető. Egyedül hagyva a dobozban, a patkány körbejár, vizsgálódik. Esetleg megnézi a pedált, és megnyomja. A pedálynomás gyakoriságának alapszintje a kezdeti pedálynomási gyakoriság. Miután megállapította az alapszintet, a kísérletvezető bekapcsolja a dobozon kívül elhelyezkedő ételadagolót. Ettől kezdve ahányszor csak a patkány megnyomja a pedált, egy kis ételgalacsin hullik a tálba. A patkány megeszi az ételt, majd hamarosan ismét megnyomja a pedált; az étel megerősíti a pedálynomást, és a nyomkodás gyakorisága drámaian megnő. Ha az ételtartályt lekapcsoljuk a dobozról, tehát a továbbiakban a pedálynomás nem eredményez ételt, a pedálynomás gyakorisága csökken. Az operánsan kondicionált választ a megerősítés hiánya éppen úgy kioltja, mint a klasszikus kondicionálásnál.”<sup>9</sup>

A megerősítés elengedhetetlen eszköze a motivációnak egy viselkedés folytatására, gátlására vagy akár megállítására, a legtöbb kutya számára a megfelelő kiképzési programtól függően, mivel viselkedésük és tanulási folyamataik is egyéniek.

<sup>8</sup> Amerikai pszichológus és író. Úttörő munkát végzett a kísérleti pszichológia és a behaviorizmus területén. Az ő nevéhez fűződik az operáns kondicionáló kamra, valamint a radikális behaviorizmus. A 20. század egyik legbefolyásosabb pszichológusaként tartják számon.

<sup>9</sup> ATKINSON et al. 1999.

## A szagok természete

Természetesnek tűnik, hogy az illatot aromák biztosítják, amelyek kézenfekvően jelen vannak egyes anyagokban, illetve az is, hogy a virágnak kellemes illata van, míg a rothadó anyagoknak nem. Tudjuk azt is, hogy az illatoknak számtalan területen kiemelkedő fontosságuk van a szaporodástól (például feromonok) kezdve a veszély felismeréséig (például metil-merkaptán<sup>10</sup>).

A szaganyagok tulajdonságai közül a legfontosabb az illékonyság, más néven volatilitás. Kémiai szempontból a volatilitás az anyag azon tulajdonsága, amely meghatározza, hogy milyen mértékben képes gőz formájában az őt körülvevő levegőbe párologni.

Az anyagok volatilitását vizsgálva az alábbi tényezők válnak fontossá:

**Molekulatömeg:** egyenlő az alkotó atomok atomtömegének összegével. Az illékonyság szempontjából a kisebb molekulatömeg a fontos paraméter, mert az ilyen anyagok könnyebben párolognak, mint a nagyobb molekulatömegű társaik.

**Hidrogénkötés:** a legerősebb másodlagos kémiai kötés, mert a hidrogén erősen kötődik más molekula nagy elektronegativitással rendelkező nemkötő elektronjához, ezzel gátolja az illékonyt. A szagok ugyan a nedves felületeken is feloldódnak, ám oldhatósági együtt-hatójuk a vízben tízszer vagy akár ezerszer is nagyobb lehet, mint a levegőben.

**Intermolekuláris erők:** a molekulák közötti – a közöttük lévő távolsággal – kiegyensúlyozott erők, tehát a molekulák és atomok olyan távolságra helyezkednek el egymástól, amely kiegyensúlyozza a közöttük lévő vonzó-taszító erőket. Adott esetben külső energia közvetítésével ezt az egyensúlyt pozitív irányban fel lehet borítani, ezáltal a molekulák egymáshoz viszonyított távolításával az anyag volatilitása megnő.

**Hőmérséklet:** az anyagok hőmérséklete az illékonyt alapvetően befolyásolja, minél magasabb, az utóbbi mértéke is megnő.

Természetes, hogy a kutya más-más anyagok kipárolgását keresi a különböző képzettségek szerint. Az ellenséges katona észlelése során<sup>11</sup> az élő személyekre jellemző szagok válnak fontosá, amelyek az ember anyagcseréjéből származó, egyes testrészeinek nedveiből, a bőrsejtekből, az izzadmányokból származó illékony szerves vegyületek, és ahogy egyező ujjnyomat, úgy két egyforma anyagcseréjű ember sem létezik.

Az emberi bőr felső rétege, a hámsejt – amely egyébként a házi por fő alkotóeleme is – folyamatosan cserélődik. Ennek során a test nagyjából 40 ezer hámsejtet veszít percenként, amelyek mindegyike hordozza a személy egyéni szagát. Ezek a hámsejtek nagyon könnyűek, a légmozgással nagy távolságra is eljutnak. A természeti behatásokra nagyon változatosan reagálnak. Jellemző, hogy míg a nagy mennyiségű csapadék megsemmisítheti azokat, a pára felerősíti a szagukat, a közvetlen napfényben könnyen elveszítik szagtartalmukat. Ez a hátrahagyott szagfelhő segíti a kutyát akár a nyomkövetésben, akár a személykeresésben.

E két tevékenység közötti különbség, hogy a nyomot követő kutya a nyomot fektető személy haladása során okozott talajsérülés és a talajra hullott hámsejtek által hordozott

<sup>10</sup>  $\text{CH}_3\text{SH}$  – a merkaptánok családjába tartozó szintelen, erősen bűzös illatú, tűzveszélyes gáz, a szagtalan földgáz jelölésére is használják. A merkaptánok változatai felelősek a kellemetlen szájszagért és a görény bűzösségéért is.

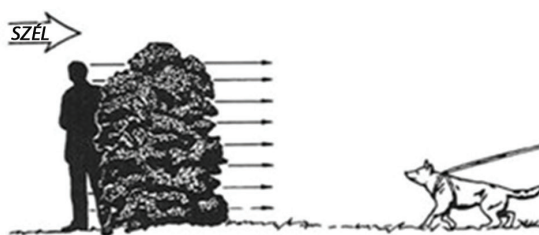
<sup>11</sup> 1943-ban az amerikai katonák Új-Guineában 1000 yardos (~ 914 m) észlelési távolságról tettek jelentést.

személyi szagnyom kombinációjával halad a hátrahagyott nyomon. Ehhez a kutya az orrát alacsonyan, úgynevezett „mély orrtartással” a föld felett kell tartsa, hogy mindkét komponens érzékelhetővé váljon számára.

A személykereső kutya viszont a levegőben lévő – és a közbeeső felületeken megta-  
padt – hámsejtek szagát érzi és dolgozza fel, úgynevezett légszimattal dolgozva (10. ábra). A nyomkövető kutya tehát egy személy szagát követi, a személykereső kutya viszont egy adott területen, épületben lévő összes személyt jelzi.



A talajszimat



A légszimát

10. ábra: A szimatmunka egyik különbsége

Forrás: SZINÁK et al. 2000

A robbanóanyag-kereső kutya a robbanóanyag által kibocsátott szagot keresi, amely egyszerű vagy összetett szagként jellemezhető. Az egyszerű szagok egyetlen kémiai vegyületből származnak, ilyen például a nitrometán, amely egy erős, robbanóanyagokban használt energetizáló. A nitrometánnak ( $\text{CH}_3\text{NO}_2$ ) szobahőmérsékleten jelentős gőznyomása van, így ebből feltételezhető, hogy a szagnyomban maga az anyag kipárolgása érzékelhető.<sup>12</sup> A legtöbb robbanóanyag viszont az összetett kategóriába tartozik, mivel ezek több kémiai vegyületből, a robbanóanyagból és a hozzáadott, a felhasználásnak megfelelő fizikai tulajdonságokat létrehozó adalékokból állnak. Ezekben a keverékekben a szaganyag – egy adott mintán belül – több molekulából, valamely molekula bomlástermékeiből vagy mindkettő kombinációjából származhat.

<sup>12</sup> DARUKA 2010.



A hadiiparban széles körben alkalmaznak rendkívül alacsony gőznyomású robbanóanyagokat, mint például a hexogén ( $C_3H_6N_6O_6$ ; RDX), amelyek koncentrációja a rendelkezésre álló párolgási térben olyan alacsony, hogy a gőz észlelése szobahőmérsékleten rendkívül nehéz. Ezért az RDX-alapú robbanóanyagokban, például a Composition-4 összetételben, az illékonyabb oldószerek, adalékok és a gyártás során visszamaradó szennyeződések kipárolgásai uralják a rendelkezésre álló párolgási teret. Feltételezhető, hogy e vegyületekből származó kipárolgások szagnyomai alkotják a robbanóanyag szagának összetettségét, a szagok tulajdonképpeni „csokrárt”.<sup>13</sup>

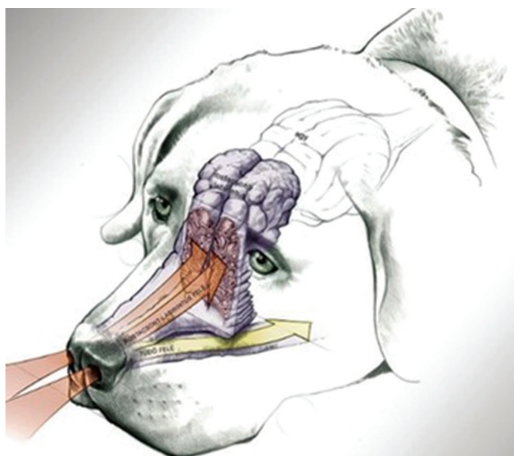
Egyéb szagok keresése az anyag azonosított összetevőinek vagy jelölőanyagainak ismeretében – illetve a molekulából származó szaganyag terjedési képességeinek ismeretében – lehetséges, legyen az kábítószer vagy cigaretta, esetleg bankjegy, elektronikai tárolóeszköz vagy lítiumion-akkumulátor.

## A kutya szaglása

A kutya alapvetően zsákmányszerző ősoktól származik, és a céltudatos tenyésztésnek hála ennek az életmódnak a biológiai feltételei fizikálisan jelen vannak a kutyában. Az állat mozgásszervei, az ízületek, a gerinc és a vázrendszer, a légzés és a keringés rendszere mind-mind a gyorsan mozgó zsákmányállatok hosszú távú, kitaró üldözésére alkalmasak, illetve lehetővé teszik a falkához tartozó territórium ellenőrzését vagy a szükségessé váló jelentős távolságú vándorlást. Azonban a vadászó életmódban sok esetben a zsákmány felderítése, majd egy vércsapán történő esetleges üldözésének körülményei kizárták a vizuális kontaktust, tehát a környezeti tényezőkhöz történő alkalmazkodás során a kutya ősei más érzékszerveinek (hallás, szaglás) kellett tökéletesednie a sikeres zsákmányejtés, tágabb értelemben a túlélés érdekében. Ennek – természetes közegében – a farkas ős, majd a szelektív tenyésztés eredményeképpen a kutya tökéletesen megfelelt, hiszen az egyedfejlődés során a szaglószervei funkcionálisan fejlődtek.

A szagmolekula elhelyezkedését tekintve lehet a levegőben szabadon lebegő és valamely dologhoz tapadt anyagminta felületén lévő. Miután a kutya szaglás útján, szimatolással (11. ábra) veszi fel a számára érdekes szagmolekulákat, meghatározta a szag forrását. A szimatolás – a légzéstől eltérően – egy szagztatott légvétél, amelynek során a levegő sokkal erősebben áramlik be a kutya orrüregébe. Ezzel együtt a kilégzés is intenzívebb lesz, hiszen a kiáramló levegő nagyobb légáramot kelt, így segítve a molekulák megmozdítását a különböző felszínekről.

<sup>13</sup> HARPER–ALMIRALL–FURTON 2005.

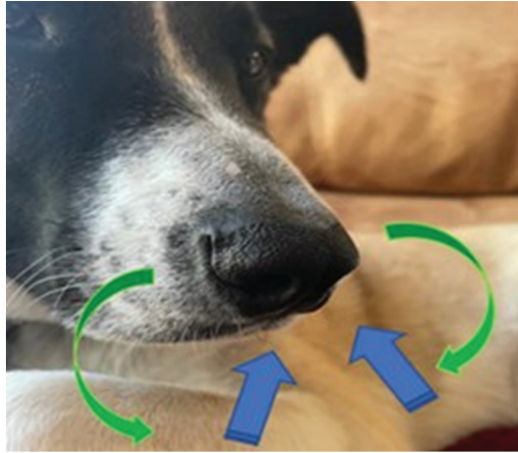


11. ábra: A levegő útja a szimatolás során

Forrás: KUBINYI 2015

A kutya orra szőrtelen, pigmentált terület, amelyet felhám borít és amit az orrmirigyek által termelt váladék tart nedvesen. E váladéknak az a szerepe, hogy megtapadjanak rajta az információkat tartalmazó szagmolekulák. Ha egy kutya szimatol, azt is megfigyelhetjük, hogy gyakran megnyalja az orrát. Ennek magyarázata az, hogy a lenyalt szaganyagokat a száj- és orrüreget összekötő vomeronazális szervébe, az úgynevezett Jacobson-szerv felé továbbítja, így ebben a szervben minden akció alkalmával halmozódnak a szagmolekulák. A jelenség azt a célt szolgálja, hogy a kutya a szimatolással a kis koncentrációban előforduló szagmolekulákat olyan mértékben tudja felhalmozni, amellyel számára már feldolgozhatóvá válik a szaganyag. Az érzékelősejtek információi az elsődleges szaglórendszerrel ellentétben nem az agy szaglókérgébe jutnak, hanem az érzelmek feldolgozásáért felelős amigdala és a hormonális rendszer központjába, a hipotalamuszba.

Gyakran előfordul, hogy a kutya a szimatolást egy erős fújtatással kezdi, ilyenkor a speciális üreget ezzel a fújtatással tisztítja ki. A kutya orrának formája sem pusztán véletlen, minden a funkcionalitásnak van alárendelve, az esztétikum megtartása mellett. Magát az orrot több porc és izom tartja nyitott helyzetben, amelyek az orrüreg kezdeti, porcos szakaszával együtt biztosítanak mozgathatóságot. Míg belélegzőskor a levegő a két orrlyukon keresztül egyenesen jut be az orrüregbe, addig kilélegzőskor a kutya orrán lévő két, bevágásra emlékeztető orrcimpája biztosítja, hogy a kiáramló levegő egy része ne előre távozzon, hanem kissé oldalt és lefelé (12. ábra). Ez az oldalirányú légmozgás örvénylést okoz a környező levegőben, elősegítendő a szagmolekulák felkeveredését. Az orrcimpa kiképzése és a porcok, tartóizmok által biztosított mobilitás együttese által a kutya – optimális esetben – a szag forrásának az irányát is képes meghatározni.



12. ábra: A be- és kilégzés során a levegő mozgásának irányai

Forrás: Good Paws 2025

A szimatolás elősegítésére, a szagmolekulák földről történő megmozdítására a külszervek is fejlődhetnek a tenyésztés során, ami az állat segítségére lehet. Például a kiemelkedő szaglóképeségű fekete-cser mosómedvekopó – amelyet ténylegesen az amerikai mosómedve vadászatára tenyésztettek ki, de mára a világ számos bűnüldöző szervezete nagy időkiesésű személyi szagnyom követésére is használ – amikor fejét lehajtja és úgynevezett „mély orrtartással” halad a nyomon, a fülei legyezőként működve keltenek légáramlatokat, így segítve a szaganyagok földről való felkeverését.

A másik példa a kutyák között a nyomkövetés mesterének tartott angol véreb (13. ábra), amely ugyan fülméretben szerényebb adottságokkal rendelkezik, de pófaredőzete is elősegíti a szagot hordozó részecskék felkeverését, és az orra – a benne lévő szaglóhám nagyságában és a receptorok számában – felülmúlhatatlan.



13. ábra: Angol véreb mély orrtartással keres

Forrás: LÁSZLÓ 2022

Tovább követve a levegő útját, az orrlyukba jutott levegő a négy, orrkagylónak nevezett, turbinaként működő labirintuszerű csontba (14. ábra) ütközik, amely miatt turbulencia lép fel benne, de az orrkagylókat összekötő vérbő szöveteken áthaladva egyben fel is melegszik, így elősegítve a molekulák kémiai volatilitásának fokozását.



14. ábra: A kutya orrkagylójának metszete

Forrás: <https://picryl.com/search?q=nose%20tooth%20anatomy%20health%20medical>

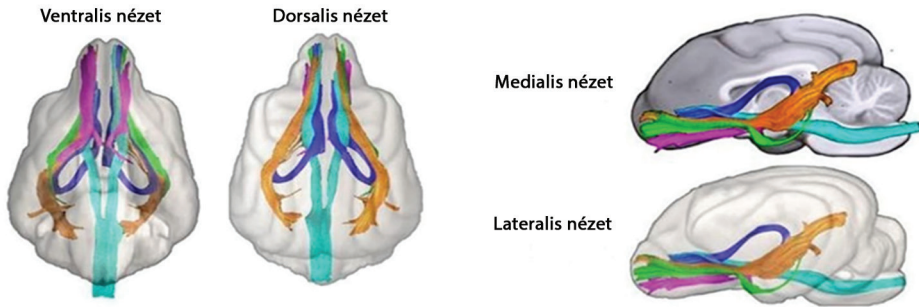
A levegő innen az orrhámra jut, amelynek számos funkciója van. Kezdeti része nyálkát termel, amely egyrészt megköti a szaganyagokat megakadályozza, hogy azok a légutakba jussanak, másrészt viszont nedvesíti a bekerült illatanyagot, tovább oldva azokat (lásd az oldhatósági együttható fontosságát). A hátsó részén viszont a szaglóreceptorokat tartalmazza, amelyekkel a turbulenciára kényszerített levegő többszörösen ütközik, így biztosítva a „többszörös mintavételt”. A receptorok olyan kis neuronok, amelyek kiterjesztik a hajszérű nyúlványukat (csillók) az orrüregben áthaladó levegőbe. A csillók érzékelik a levegőben lévő szagmolekulákat, és ezeket az ingereket – hasonlóan, mint az ember esetében – elektromos impulzusokká alakítják, ezeket a szaglóhagymába továbbítják, ahol megkezdődik az információk feldolgozása. A kutya szaglásának feltérképezése során számos ismeretet szereztünk, ellenben a szaglóhagyma és a szagkéreg kapcsolatát biztosító idegi összefüggések feltárása szinte gyerekcipőben jár. A szagkéreg feladata a legszélesebb értelemben a szagokat érzékelni és feldolgozni. Ez a feldolgozás magában foglalja többek között azt a képességet is, hogy az eb emlékezzen az egyes szagokra is. A kutya esetében a szagérzékelés az egyetlen olyan észlelés, amely beavatkozás nélkül érinti a talamuszt, és közvetlenül az agykéregbe jut.

Az érzékelést követően tisztázni szükséges, hogy az érzet feldolgozása milyen módon megy végbe. Ezt sokáig nem sikerült megállapítani, de a legújabb lehetőség, a diffúziós tenzoros képalkotás és traktográfia (DTI) – amely olyan speciális MRI-módszer, amellyel rekonstruálható a vízmolekulák háromdimenziós mozgása – lehetővé tette ennek jobb megértését.

A DTI során extra, meghatározott irányú mágneses gradienseket kapcsolnak be, amelyek irányában a vízmolekula mozgása mérhető. Ezzel, illetve egy speciális boncolási módszerrel (háromdimenziós szálbboncolás) igazolták, hogy a szaglóhamból induló két különböző idegpályán

(15. ábra), öt agyi traktussal (agytörzs, kisagy, piriform cortex, szaglógümő, halántéklebény) is funkcionális kapcsolat létezik.<sup>14</sup>

A szaglás során keletkezett ingerek feldolgozása tehát nagyon nagy kapacitással, intenzív módon történik, ami megmagyarázhatja a kutyanak a keresés során fellépő átmeneti idegi kifáradásának alapjait.



15. ábra: A kutya idegpályái színekkel jelölve a szag feldolgozása során

Forrás: ANDREWS et al. 2022

A vizsgálatok szerint alapesetben az agy működése a táplálékkal bevitt energia nagyjából 20%-át igényli az idegrendszer elektromos aktivitásának fenntartására. A kutya idegrendszere terhelését és az ezzel járó átmeneti kifáradást a receptorok által felvett és az idegek által továbbított ingerületek agyi feldolgozása okozza, amelynek mértéke a keresési feladatok végrehajtása során elérheti a teljes agyi kapacitás 30%-át.

Összegzőképpen elmondható, hogy az ember és a kutya szaglásának mértékében nagyságrendi eltérések vannak, ami a szagok felvételére és feldolgozására kialakult biológiai szervek különbözőségében, illetve a szaglásnak az élőlény létezésében meglévő szerepével, annak volumenével magyarázható. Az egyre fejlettebb vizsgálatok elvégzése által a kutya esetében a szaglás funkciójának megítélése (például szaporodás, táplálékszerzés, territóriális funkció) nagymértékben kibővült, hiszen – úgy tűnik – ez az anyagi világ megismerésének a legfontosabb érzékszerve.

## Kutyák a modern hadseregekben

A 20. század további fegyveres konfliktusainak aszimmetrikus hadviseléséből származó kihívások miatt felértékelődött a robbanóanyag-kereső kutyák munkája, hiszen a meglepő aknáknak (*booby traps*) és a rögtönzött robbanószerkezetek (*improvised explosive device*, IED) felderítésében mutatott hatékonyságukat technikai eszközzel nem lehetett felülmúlni.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> ANDREWS et al. 2022.

<sup>15</sup> DARUKA 2009.

A második világháború lezárását követően az ott szerzett tapasztalatokat felhasználva a brit hadsereg kutyákat alkalmazott Palesztinában a felkelők által elrejtett fegyverek felkutatására.<sup>16</sup> Az amerikai hadsereg a vietnámi háborúban megközelítőleg 4000 német juhászkutyát és laborador retrievereket használt a trópusi körülmények között nyomkövetésre, fegyver- és robbanóanyag-keresésre, illetve az ellenséges alagutak vagy akár a vízben elrejtőzött és nádszálon keresztül lélegző harcosok felderítésére. Megemlítendő, hogy az ausztrál hadsereg is jelentős tapasztalatra tett szert a nyomkövető kutyák alkalmazása terén.

## Kutyák a posztmodern hadseregekben

A hadsereg a mai technikai viszonyok között sem tudja nélkülözni a kutyák képességeit és munkavégzését. A kiképzések színvonala, az alkalmazott kinológiai módszerek és eszközök természetesen már össze sem hasonlíthatók az akár 50 évvel ezelőttiekkel. Egy új, kiemelkedő képességű fajta jelent meg az alkalmazható kutyák között, amely számos területen felveszi a versenyt a korábban uralkodó fajtákkal.

A belga juhászkutyák közé tartozó Malinois fizikumával, képezhetőségével, intelligenciájával, széles körű alkalmazhatóságával rövid idő alatt nagy népszerűsége tett szert akár a rendvédelmi, akár katonai területen. Kiképzés során azonban nagy fokú odafigyelést igényel, érzékenyebb, de cserébe munkamániás. Képességei lehetővé teszik az úgynevezett „duál képzettséget”, amelyben a járőrmunka mellé valamilyen – jellemzően robbanóanyagra vagy kábítószerre irányuló – keresőképeség is társul. Az említett előnyök miatt a munkavonalú egyedekre komoly kereslet alakult ki, ennek köszönhetően áruk az egekbe szökött, ami miatt az Amerikai Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma a Katonai Munkakutya-tenyésztési Programján keresztül saját tenyésztésbe kezdett, azonban az itt született 50–90 munkakutya a kereslet mintegy 13%-át adja.

A hadsereg különleges alakulatainál 2001. szeptember 11-ét követően szemléletváltás történt. A Navy Seals ismét bevezette a harci rohamkutya (Combat Assault Dog, CAD) programot, amely során olyan magas minőségű<sup>17</sup> és téteményképességű kutyákat képeztek, amelyek a különleges bevetések során is állták a sarat, és például Oszama bin Laden elfogásában is közreműködtek. A hadsereg „duál képzettségű” kutyái nagy segítséget jelentettek az iraki és az afganisztáni bevetések során, amikor a felfedett rögtönzött robbanóeszközökön maradt személyi szagnyomot követve megtalálták a telepítést végző személyt, annak rejtékhelyét vagy bázisát.<sup>18</sup> A kutya orrának hatékonyságát jól jellemzi, hogy az emberi szagot a visszamaradó törmeléken még a peroxidtöltetű eszközök robbantása után is érzékelhetik.<sup>19</sup>

Az ausztrál hadsereg felelevenítette nyomkövető kutyáival a vietnámi háborúban szerzett tapasztalatait, és újra kutyákat képzett azzal a különbséggel, hogy ezek „egyfázisú”, kifejezetten nyomkövetésre képzettek, amelyeket nemzetközi missziókban és békefenntartó feladatokban alkalmaznak.

<sup>16</sup> BRICE O'DONNELL 2014.

<sup>17</sup> Az „1%-os kutyák”, amelyek a képzésbe vont egyedek felső százalékából kerülnek ki.

<sup>18</sup> CSURGÓ–DARUKA 2017.

<sup>19</sup> CURRAN–PRADA–FURTON 2010.

A lengyel hadsereg az afganisztáni nemzetközi missziói során a különleges erők kötelékében „duál képzettséggel” rendelkező harci rohamkutyát alkalmazott a robbanóanyag-raktárak felkutatására és megsemmisítésére. A bevetések elemzését követően igazolva látták a várakozásaikat.

Az indiai hadsereg megközelítőleg 1200 kutyával látja el szolgálatait, beleértve az őrszolgálatot, a járőrözést és a robbanóanyagok, köztük az improvizált robbanószerkezetek (IED-k) felderítését, az aknakeresést, a tiltott tárgyak, köztük a kábítószerek szűrését. A belbiztonsági szervekkel együttműködve a kutyák jelentős szerepet játszanak bűnözők és terroristák felkutatásában is. A fajtaválasztékot tekintve érdekesség, hogy berni pásztorkutyát, bakharwal kutyát,<sup>20</sup> illetve a kecses mudhol houndot<sup>21</sup> is megtaláljuk közöttük.

Az izraeli hadsereg az amerikai és a saját – jellemzően beépített területeken folytatott – harcainak tapasztalatait a 90-es években kezdte alkalmazni a kutyás egységeiben. A kiképzés során előtérbe került a póráz nélküli, rádióan adott parancsokkal történő irányítás, ahol a kutyavezető olykor a látótéren kívül irányítja kamerával felszerelt kutyáját. A szokatlan irányítást az tette szükségessé, hogy a harcok során az ellenség alagutakba rejtőzött, illetve rejtett lakásokat, objektumokat használt, amelyek felderítése veszélyes volt. A kutya viszont részben autonóm módon tudja átvizsgálni ezeket az objektumokat, és felderítette, adott esetben elműködtette az ezekben telepített csapdákat, vagy felvette a harcot a bent lévőekkel.

Vizonylag új irány és képzettség az elektronikus adattárolók keresése. Az erre kiképzett kutyák képesek kiszagolni az elektronikai eszközökben található vegyületeket. Az elektronikai eszközök közös jellemzője, hogy trifenilfoszfin-oxid (TPPO) vegyületet tartalmaznak, amely az áramkörüi lapkát védi a túlmelegedéstől. A másik gyakori vegyület a hidroxí-ciklohexil-fenilketon (HPK), amely a nem elektronikus adattárolók anyagában található.

## Ha véget ér a szolgálat

Ma már természetesnek tűnhet, hogy a szolgálati kutya – amennyiben eléri alkalmazhatóságának felső határát – a kutyavezető otthonában töltse megérdemelt pihenését, ez azonban nem mindig volt így.

A vietnámi háborúban nagyon sok ausztrál katonának okozott lelki gyötrelmet, hogy a leszolgált egy év után kutyáját hátra kellett hagynia, mivel a kormány – megspórolva a szükséges karantén költségeit – nem engedélyezte azok hazaszállítását, még abban az esetben sem, amikor az elesett kutyavezető családja ezt kérvényezte. Hasonló gondokkal szembesültek az amerikai kutyavezetők, akiknek kutyáit a helyi erőknek adták, rosszabb esetben, egészen egy 2000-ben hozott törvény hatálybalépéséig, elaltatták. Szintén elaltatta kutyáit az indiai hadsereg is, ennek az elítélendő gyakorlatnak csak 2015-ben vetettek véget.

Mára a kiöregedett vagy sérülés, betegség miatt szolgálatra alkalmatlanná vált szolgálati kutyák megbecsült tagjai a családnak és a társadalmi közösségeknek, helytállásukat széles

<sup>20</sup> Gaddi Kuttának, tibeti masztiffnak is nevezik őket, többnyire határ menti területeken fordulnak elő, és helyben képezik ki a bakharwal és a gudzsar törzsek.

<sup>21</sup> Kizárólag Indiából származnak, ezért tartják őket a legjobbnak az indiai időjáráshoz. Határőrizeti és IED-felderítési feladatokra képzik.



körben propagálja a hadsereg vagy a kormányzat. Ebben az USA élenjáró, hiszen jellemzően veterán katonák magánalapítványai különböző programok finanszírozásán keresztül fizikai és mentális szinten is gondoskodnak nemcsak a nyugdíjazott, hanem olykor még a tengeren túl szolgálatot teljesítő négylábúakról is.

## Az állatok szolgálatának elismerése

Az állatok számára számos díjat alapítottak, amelyek közül talán a leghíresebb az angol Dickin-medál, amelyet a Beteg Állatokról Gondoskodó Emberek Szervezetének (People's Dispensary for Sick Animals, PDSA) alapítója, Maria Elisabeth Dickin a második világháború alatt, 1943-ban alapított. Bár a kitüntetés – amelynek egyik oldalán a „Mi is szolgálunk”, a másik felén pedig a „Bátorságért” felirat látható – nem része az Egyesült Királyság kitüntetési rendszerének, a hadsereggel történő szimbolikus együttműködés miatt sokan a Viktória-keresztel egyenrangúnak tartják, hiszen ez az állatok számára adományozható legmagasabb katonai kitüntetés. Olyan állatok érdemesek rá, amelyek az adott körülmények között kiemelkedő bátorságról vagy kötelességtudatról tesznek tanúbizonyságot.

Amerikai részről az Állatok a Háborúban és Békében Bátorságért Érmek 2019-ben alapították, amely szintén egy magánszervezet díja. A szervezet szintén szimbolikus együttműködésben áll az állammal, hiszen védnökei szenátorok, és az átadás helye a Capitolium. Az adományozás természetesen nem kizárólag kutyákat érint, és a díj érdekessége, hogy – mintegy pótolva az évtizedek mulasztását – posztumusz adományozások is előfordultak.

Ezt megelőzően az állatok elismerése egészen rapszodikus módon történt. Az első világháború idején Stubby kutya egyedülálló módon – harc közben, szabályos felterjesztésre – egészen az őrmesteri rendfokozatig vitte, és hőstetteiért (gáztámadásra figyelmeztetett, német kémet csípett el), valamint 18 hónap frontszolgálatáért egy aranyérmet, két sebesülési sávot és két Bíborszívet kapott. Stubby őrmester olyannyira katona volt, hogy még tisztelni is megtanult.<sup>22</sup>



16. ábra: Stubby kitüntetésekkel teli kiskabátjában

Forrás: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sergeant\\_Stubby](https://en.wikipedia.org/wiki/Sergeant_Stubby)

<sup>22</sup> Stubby őrmestert a Connecticutban lévő emlékművén a Veteránok Emlékparkjában ebben a pózban örökítették meg.

## Segítség a háború után is

A kutyák nagyon nagy segítséget jelenthetnek háborús veteránok életében, akik a harci cselekmények folyamánként poszttraumás stressz-szindrómában vagy egyéb pszichés megbetegedésben szenvednek. Egykori tagjainak az amerikai hadsereg egyik múzeuma és egy kutyatenyésztéssel és kiképzéssel foglalkozó kanadai magáncég pszichotraumatikus terápiában biztosítanak kutyákat, amelyeket speciálisan erre a szerepkörre képeznek ki, amely során nagy odafigyelést fordítanak a gazda képzésére és a folyamat utánkövetésére is.

A Bundeswehr a koblenzi Központi Kórházában – szigorú higiéniai koncepció mentén – alkalmaz hasonló célból terápiás kutyát. A programban történő részvétel önkéntes, és a végrehajtó szakemberek részéről komoly előrelátást és körültekintést igényel annak biztosítása, hogy a terápia során mindkét élőlény pozitív élményeket szerezzen. A kutya segítsége nem önálló gyógymód, de segíthet a betegség bizonyos tüneteinek – például az elfogadás vagy a társas együttlét nehézségeinek – feloldásában, csökkentheti a szorongást, javítja a hangulatot és az alvás minőségét, ezáltal a gyógyszerfelhasználás mérsékelhető.<sup>23</sup>

Arra is van példa, hogy a szolgálat során fogatékosságot okozó sebesülést vagy sérülést szenvedett veteránoknak biztosítanak speciálisan a mindennapi élet tevékenységeinek megkönnyítésére képzett segítőkutyákat.

## Utószó

A vizsgálat alapján megállapítható, hogy a kutyák katonai alkalmazása a technológiai fejlődés ellenére sem veszített jelentőségéből. Különösen a szaglásra épülő feladatok esetében olyan képességekkel rendelkeznek, amelyek jelenleg sem teljes mértékben helyettesíthetők technikai eszközökkel. A jövő hadviselésében várhatóan tovább erősödik a technológia és a biológiai képességek integrált alkalmazása, amelyben a kutyák továbbra is meghatározó szerepet tölthetnek be. Felmerül a kérdés, hogy mi az a tényező, amivel a kutya még az életére veszélyes körülmények között is ragaszkodik az emberhez és teszi mindazt, amire kiképezték.

A tudomány válaszaként megemlíthető, hogy a 20. századi orvostudomány fejlődése lehetővé tette az emberi idegrendszer és a belső elválasztású mirigyek tanulmányozását. Az etológia és a kinológia fejlődése pedig felfedte a kutatók előtt az állatok, a kutya viselkedésének jellemzőit. A különböző tudományágak eredményeinek értékelését követően megállapították, hogy a kutyának az emberhez való vonzódása egy hormonhoz köthető, ez pedig az oxitocin. Ezt szokták „szeretethormonként” is aposztrofálni, hiszen olyan alapvető befolyása van, amely a nemi aktus és a megtermékenyítés során, továbbá a szülés folyamatában, a szoptatás, a tejelválasztás segítségével mutatkozik meg. Az agy működésében neuromodulátorként vagy neurotranszmitterként főként a boldogság, a vonzalom és a bizalom érzetének kialakulását tekintve fontos, így például a szülői kötődés, az anya–gyermek kapcsolat felépülése során játszik főszerepet. A kutya szervezetében az oxitocin jelenléte és a vele együtt járó érzelem okozza a kötődés kialakulását, ami alapvetően megegyező az emberi csecsemőkorban tapasztalható

<sup>23</sup> RODRIGUEZA et al. 2021.

folymattal. Az oxitocin szintjének megemelkedését mutatták ki mindkét faj esetében a közös interakciók során, tehát a hatás ellenhatást vált ki, pro és kontra. A fentiek alapján belátható, hogy – amennyiben az képes kialakulni – a kutyának az ember felé fennálló és megnyilvánuló érzelmeit milyen alapvető biológiai folyamatok befolyásolják.

A jelenség szemléltetésére ennek érzelmi mozgatórugóját és a két harcos közötti kötődést, a Navy Seal múzeum kutyás emlékművének egy részletét idézném az olvasó elé, amely így hangzik:

„Önzetlenül feláldoznám az életemet érted és a Csapatért.

Melletted minden nap a jutalmam.

Napjaimat lépteid jövőtele és menése méri.

Te vagy a megnyugvás hangja, amikor beteg vagyok és a tekintély hangja, amikor iránymutatást keresek.

Jobb kardoként szolgállok, készen álló kardoként az oldaladon.

Életemet a te, a Csapat és nemzetünk szolgálatának szentelem.

Te és én olyan köteléken osztozunk, amin senki más.

Melletted állok, türelmetlenül várom parancsaidat és soha nem ítélek.

Örökké éber és hűséges maradok hozzád.

Amikor együtt töltött időnk lejár és te tovább élsz, kedves gondolatokkal emlékezz rám, és mesélj történeteket arról az időről, amikor verhetetlenek voltunk.

Ha újra találkozánk egy másik csatáért, újra örömmel vállalom melletted a harcot.”

## Felhasznált irodalom

- Albanian Studies [é. n.]: *Molossian Dog*. Online: <https://albanianstudies.weebly.com/molossian-dog.html>
- ANDREWS, Erica F. – PASCALAU, Raluca – HOROWITZ, Alexandra – LAWRENCE, Gillian M. – JOHNSON, Philippa J. (2022): Extensive Connections of the Canine Olfactory Pathway Revealed by Tractography and Dissection. *Journal of Neuroscience*, 42(33), 6392–6407. Online: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2355-21.2022>
- ATKINSON, Rita – ATKINSON, C. Richard – SMITH, E. Edward – BEM, Daryl J. (1999): *Pszichológia*. Budapest: Osiris.
- BRICE O'DONNELL, Kimberly (2014): Military Working Dogs, Past, Present and Future. *History & Policy*, 2014. június 6. Online: <https://historyandpolicy.org/opinion-articles/articles/military-working-dogs-past-present-and-future/>
- CURRAN, Allison M. – PRADA, Paola A. – FURTON, Kenneth G. (2010): Canine Human Scent Identifications with Post-Blast Debris Collected from Improvised Explosive Devices. *Forensic Science International*, 199(1–3), 103–108. Online: <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.03.021>
- CSURGÓ, Attila – DARUKA, Norbert (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: Slovenská spoločnosť pre trhacie a vŕtacie práce, 32–43.
- DARUKA Norbert (2009): A robbanóanyag-kereső kutyák alkalmazhatósága repülőterek átvizsgálása során. *Repüléstudományi Közlemények*, 21(2), 209–216. Online: [https://epa.oszk.hu/02600/02694/00048/pdf/EPA02694\\_rtk\\_2009\\_2\\_Daruka\\_Norbert.pdf](https://epa.oszk.hu/02600/02694/00048/pdf/EPA02694_rtk_2009_2_Daruka_Norbert.pdf)

- DARUKA Norbert (2010): Robbanóanyag-kereső kutyák a Magyar Honvédségben és a missziós területeken. *Honvédségi Szemle*, 64(2), 15–19.
- DOGX [é. n.]: *Ír farkaskutya*. Online: <https://dogx.hu/kutyafajtak-leirasa/ir-farkaskutya>
- DOLAN, Michael – HYMEL, Kevin (2004): Raining Dogs! U.S. Army Parachute Animals in World War II. *Warfare History Network*, 2004. május. Online: <https://warfarehistorynetwork.com/article/raining-dogs-u-s-army-parachute-animals-in-world-war-ii/>
- FORSTER, Edward S. (1941): Dogs in Ancient Warfare. *Greece and Rome*, 10(30), 114–117. Online: <https://doi.org/10.1017/S0017383500007427>
- Good Paws (2025): How Does a Dog's Sense of Smell Compare to Yours? *Good Paws*, 2025. november 22. Online: <https://goodpawsbakery.com/blogs/dog-topics/how-does-a-dogs-sense-of-smell-compare-to-yours>
- HARPER, Ross J. – ALMIRALL, Jose R. – FURTON, Kenneth G. (2005): Identification of Dominant Odor Chemicals Emanating from Explosives for Use in Developing Optimal Training Aid Combinations and Mimics for Canine Detection. *Talanta*, 67(2), 313–327. Online: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.05.019>
- KUBINYI Enikő (2015): Illetlen kutyák? *National Geographic*, 2015. február 11. Online: <https://ng.24.hu/tudomany/2015/02/11/illetlen-kutyak/>
- LÁSZLÓ Enikő (2022): Angol véreb fajtaleírás: a fáradhatatlan nyomkövető, akinek szimata sosem csal. *We Love Dogz*, 2022. február 28. Online: <https://welovedogz.hu/fajtaleiras/angol-vereb-fajtaleiras/>
- LORENZ, J. (2017): „Such verwundet!” – Das Sanitätshundewesen in Deutschland bis 1918. *Military Medicine*, 2017. január 23. Online: <https://military-medicine.com/such-verwundet-das-sanitaetshundewesen-in-deutschland-bis-1918/>
- MILLER, Jacob (2017): 27 Photographs of the Heroic Animals of WWI. *History Collection*, 2017. július 24. Online: <https://historycollection.com/27-photographs-heroic-animals-wwi/>
- NAVARRO, Hector [é. n.]: *The Russian Anti-Tank Dogs of World War II*. Online: <https://factschology.com/factschology-articles-podcast/russian-anti-tank-dogs-world-war-ii>
- Országos Széchenyi Könyvtár [é. n.]: *DKA-057118*. Online: <https://dka.oszk.hu/html/kepoldal/index.phtml?id=057118>
- Rare Historical Photos [é. n.]: *Rare Photographs of War Dogs with Gas Masks From 1915–1970*. Online: <https://rarehistoricalphotos.com/war-dogs-with-gas-masks-1915-1970/>
- RODRIGUEZA, Kerri E. – ANDERSON, Lindsey M. – OTT, Carol A. – O'HAIREA, Marguerite E. (2022): The Effect of a PTSD Service Dog on Military Veterans' Medication Regimens: A Cross-Sectional Pilot Study. *Anthrozoös*, 34(3), 393–406. Online: <https://doi.org/10.1080/08927936.2021.1898219>
- SHERMAN, Barbara L. – GRUEN, Margaret E. – CASE, Beth C. – FOSTER, Melanie L. – FISH, Richard E. – LAZAROWSKI, Lucia – DEPUY, Venita – DORMAN, David C. (2015): A Test for the Evaluation of Emotional Reactivity in Labrador Retrievers Used for Explosives Detection. *Journal of Veterinary Behavior*, 10(2), 94–102. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2014.12.007>
- SZINÁK János et al. (2000): *A kutyakiképzés alapjai*. [H. n.]: ORFK Kutyavezető-képző Iskola.
- The National World War I Museum And Memorial [é. n.]: *Dogs in WWI*. Online: <https://www.theworld-war.org/learn/about-wwi/dogs-wwi>

# Tartalom

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| VÉGH KRISZTIÁN: <i>Az erők védelme: a drónok kihívása</i>                                                                                                                           | 5   |
| HEGEDŰS GERGELY, MOLNÁR PÉTER, DARUKA NORBERT:<br><i>Robbanóanyag-feldolgozó üzem technológiai<br/>környezetének tervezése</i>                                                      | 19  |
| ÁBEL PÁLMA ROXÁNA: <i>A robbantások detektálásának<br/>lehetősége ionoszonda alkalmazásával</i>                                                                                     | 39  |
| PAP ANDREA, VÉG RÓBERT LÁSZLÓ: <i>Térszemlélet<br/>fejlesztése a katonai logisztikában 3D-nyomtatás<br/>és számítógéppel támogatott műszaki<br/>modellezés (CAD) által, 3. rész</i> | 51  |
| DRUZSIN JÓZSEF: <i>A honi légvédelem SzA-75M Dvina<br/>és Sz-75M Volhov közepes hatótávolságú<br/>légvédelmi rakétarendszerei</i>                                                   | 65  |
| HORVÁTH KRISZTIÁN: <i>Vízi és víz alatti járművek csatolt<br/>vibroakusztikai modellezése</i>                                                                                       | 87  |
| MÉSZÁROS ZALÁN, BEREK TAMÁS: <i>A 2M39 Poszeidón<br/>nukleáris fegyverrendszer hatásainak vizsgálata víz<br/>alatti nukleáris robbantások eredményei alapján</i>                    | 111 |
| KOVÁCS-SZEGEDI ILDIKÓ, DOBOR JÓZSEF: <i>Agrárvevyszerek:<br/>kockázatkezelés és jogi keretek, 1. rész</i>                                                                           | 125 |
| LILLA HORVÁTH: <i>The Importance of Base Layer<br/>in Firefighting Operations</i>                                                                                                   | 143 |
| BAUMANN SZILÁRD: <i>Mi is szolgálunk!</i>                                                                                                                                           | 153 |