



REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

Kiemelt közlemények

ISTVÁN PAPP, LÁSZLÓ SZILVÁSSY:
PL-15(E) Air-to-Air Missile

LÁNYI ALADÁR, BALAJTI ISTVÁN:
Magyar sikerek az űrkutatásban

JEVUCZÓ GÁBOR, BAUER PÉTER:
*Mágneses szenzorhibák
monokamerakép-alapú detektálása*

37. évf. (2025)
1. szám

HU ISSN 1789-770X (elektronikus)
HU ISSN 1417-0604 (nyomtatott)



LUDOVIKA
EGYETEMI KIADÓ

Repüléstudományi Közlemények

A Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar tudományos kiadványa

Elektronikus kiadás
HU ISSN 1789-770X

Nyomtatott kiadás
HU ISSN 1417-0604

A szerkesztőbizottság elnöke:

Prof. Dr. Restás Ágoston (katonai műszaki tudományok, gazdálkodás- és szervezéstudományok)

A szerkesztőbizottság tagjai:

Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dudás Zoltán (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dunai Pál (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Károly Krisztián (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Kavás László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Major Gábor (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Óvári Gyula (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Palik Mátyás (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Pokorádi László (Óbudai Egyetem)
Dr.h.c. doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD, MBA, LL.M. (Kassai Műszaki Egyetem, Szlovákia)
Prof. Dr. Szabolcsi Róbert (Óbudai Egyetem)
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Vas Tímea (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

Szerkesztőség

Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem) főszerkesztő
Dr. Szilvássy László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem) szerkesztő
Törőcsik Tímea (Nemzeti Közszolgálati Egyetem) szerkesztőségi titkár

Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.

Levelezési címe: 5008 Szolnok, Pf. 1.

e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu

Kiadó

Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Ludovika Egyetemi Kiadó
1083 Budapest, Ludovika tér 2.
kiadvanyok@uni-nke.hu, +36 1 432 9000
A kiadásért felel: Deli Gergely rektor

Borítókép: Szilvássy László



Tartalom

POKORÁDI LÁSZLÓ: Hibafaelemzés korrelációs érzékenységvizsgálata	5
BAUER PÉTER: Determinisztikus szenzor mérési hibák kétértelműsége és ennek feloldása GNSS-IMU fúziós állapotbecslő algoritmusok esetén	17
JUHÁSZ OSZVALD: A Magyar Honvédség JAS 39 repülőgépeinek kiszolgálása közúti leszállóhelyen	33
ISTVÁN PAPP, LÁSZLÓ SZILVÁSSY: PL-15(E) Air-to-Air Missile	47
LÁNYI ALADÁR, BALAJTI ISTVÁN: Magyar sikerek az űrkutatásban	63
GÁBOR TERPECZ, GYÖRGY SCHUSTER: Reliability Factors of Unmanned eVTOL Vehicles. . .	83
JEVUCZÓ GÁBOR, BAUER PÉTER: Mágneses szenzorhibák monokamerakép-alapú detektálása pilóta nélküli légi járműveken valós repülési adatok felhasználásával . .	103
BELLER BALÁZS: A Force Protection repülésbiztonsági szemmel	123
HAJNAL KORNÉL, BÉKÉSI BERTOLD: Precíziós növényvédelmi kijuttatás légi és földi megvalósításának rendszerszintű összehasonlító elemzése	139
BALAJTI ISTVÁN: Miért és hogyan válhatunk hatékony és sikeres mérnökké?	149

Pokorádi László

Hibafaelemzés korrelációs érzékenységvizsgálata

A hibafaelemzés egy szisztematikus, logikai és diagramalapú kockázatértékelési, megbízhatóságelemzési eszköz, amely bemutatja egy adott nemkívánatos eseményhez, az úgynevezett csúcseseményhez vezető ok-okozati összefüggéseket. Azok az események, amelyek már nem bonthatók tovább, az alapesemények. A valószínűségi hibafaelemzés egy kvantitatív elemzési módszer, amelyet a csúcsesemény bekövetkezési valószínűségének meghatározására használnak az alapesemények valószínűségeinek függvényében. A különböző szintű események megbízhatóságai, bekövetkezési valószínűségei közötti korrelációs együtthatók elemzése hatékony módszer a rendszer megbízhatóságára legnagyobb hatást gyakorló kritikus alapesemények, elemek kiválasztására. A tanulmány célja egyrészt egy korrelációalapú módszer kidolgozása a valószínűségi hibafaelemzés érzékenységeinek vizsgálatára. Másrészt az így kapott érzékenységi eredmények összehasonlítása a szerző korábban kidolgozott lineáris hibafa érzékenységi modell eredményeivel.

Kulcsszavak: megbízhatóság, kockázatbecslés, hibafaelemzés, korreláció, érzékenységvizsgálat

1. Bevezetés

Úgynevezett nemkomplex kapcsolatú (*System with Simple Interconnections* – SwSI) rendszerekről akkor beszélhetünk, ha a teljes rendszer megbízhatósága az elemek soros, illetve párhuzamos kapcsolatokba (részrendszerekbe) rendezésével, az így kapott részrendszerek megbízhatóságának ismeretében meghatározható. [5]

Soros megbízhatóságúnak nevezzük azt a rendszert, amelyikben bármelyik elem meghibásodása a rendszer üzemképtelenségét okozza.

Párhuzamos megbízhatóságúnak nevezzük azt a rendszert, amelyik mindaddig üzemképes, amíg egyetlen eleme is még működőképes. Egy párhuzamos rendszer redundáns, azaz mindig tartalmaz tartalékot.

Fontos hangsúlyozni, hogy a megbízhatóság szempontjából vizsgált modellekben a soros és párhuzamos kapcsolat nem azonos az elemek valóságban (térben és/vagy időben) elfoglalt helyzetével. A modell készítésekor fontos tisztában lennünk a szerkezet működésével, és ez alapján kell meghatároznunk az elemek közti megbízhatósági kapcsolatot.

A nemkomplex kapcsolatú rendszerek hibafaelemzése (*Fault Tree Analysis*, FTA) során egy feltételezett rendszerhibából vagy nemkívánatos eseményből, az úgynevezett főeseményből (*Top Event*, TE) indulunk ki, és fokozatosan derítjük fel azokat a részrendszer- és alkotóelem-meghibásodási lehetőségeket, amelyek az adott, nem kívánt esemény bekövetkezéséhez

vezetnek vagy vezethetnek [2], [7]. Ez utóbbiakat, amelyek már nem bonthatók tovább, elemi eseményeknek (*Basic Events*, BEs) nevezzük.

Az elemző munkát fastruktúrájú gráf megjelenítés segíti, amit különböző, például megbízhatósági számítások is kiegészíthetnek. A felállított hibafa felhasználásával a csúcsesemény bekövetkezési valószínűsége meghatározható az elemi események valószínűségeinek függvényében. Ezt nevezzük valószínűségi hibafaelemzésnek (*Probabilistic Fault Tree Analysis*).

Két jelenség közötti kapcsolatot sztochasztikusnak nevezünk, ha az egyik lefolyása befolyásolja a másikat, de nem egyértelműen [4]. Két véletlen változó sztochasztikus kapcsolatának erősségét a korrelációs együtthatójukkal lehet jellemezni. Hibafaelemzés esetén a különböző – főleg a fő- és az elemi – események bekövetkezési valószínűségei közti korrelációs együtthatók alkalmasak a felsőbb szintű esemény megbízhatóságára legnagyobb hatást gyakorló kritikus események, elemek kiválasztására.

A korrelációs együtthatók korrekt meghatározásához a meghibásodási adatok statisztikai sokaságára van szükségünk. Napjaink technikai rendszereinél a kellő számú adatok beszerzése nehézséget okozhat, mert viszonylag hamar avulhatnak el. Új technikai rendszer tervezésekor a korábbi, hasonló szerkezetű rendszerek üzemeltetési tapasztalatai használhatók fel. Ezért a megfelelő számú kiinduló adat nyerésére, és így a megbízhatósági számítások elvégzésére a Monte Carlo-módszert célszerű alkalmazni. Ekkor a rendszer gerjesztéseinek minden lehetséges eleméhez valamilyen valószínűségi eloszlást rendelünk, és ez alapján a rendszer kimenő jellemzőinek valószínűségi eloszlásait határozzuk meg. Ha az adatok valószínűségi eloszlásai ismertek, elméletileg mindegyik alternatíva következményeinek eloszlását is megtudhatjuk. Ez a vizsgált rendszer vagy folyamat kvalitatív tulajdonságának valószínűségi eloszlását jelenti.

A kutatómunka célja egyrészt egy korrelációalapú vizsgálati módszer kidolgozása a valószínűségi hibafaelemzés érzékenységeinek meghatározására, másrészt a kapott eredmények összehasonlítása a szerző korábban – a [10] és [11] publikációiban – kidolgozott lineáris hibafa érzékenységi modell (*Linear Fault Tree Sensitivity Model*, LFTSM) eredményeivel.

Mivel a jelen tanulmány célja a kidolgozott eljárás módszertanának bemutatása, a kis méretű hibafát vizsgáljuk, amelyben nem a valóságos technikai rendszerek meghibásodási adatait használjuk a szemléletesebb eredmények érdekében.

2. Hibafaelemzés

A hibafaelemzés módszertanát részletesen az IEC 1025 [2] és MSZ EN 1050 [7] szabványokból tudjuk megismerni. Az 1. táblázat mutatja be a hibafaalap jelölésrendszerét.

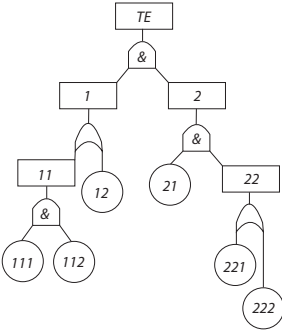
Az elemzés lehetővé teszi:

- a főeseményhez vezető összes hiba és hibakombináció felderítését;
- a különösen kritikus események és/vagy eseményláncolatok kimutatását;
- megbízhatósági elemzések elvégzését a hibafa ágain végighaladva;
- a meghibásodási mechanizmusok tiszta és áttekinthető dokumentálását.

1. táblázat
A hibafaelemzés főbb jelölései [a szerző]

	ÉS kapu A kimeneti esemény csak akkor következik be, ha az összes bemeneti esemény bekövetkezik (párhuzamos kapcsolat).	$P = \prod_{i=1}^n P_i$
	VAGY kapu Azt jelenti, hogy ha legalább egy bemeneti esemény bekövetkezik, kimeneti esemény akkor következik be (soros kapcsolat).	$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$
	Elemi esemény Az elemi esemény nem igényel további feltárást, vagy nem tárható fel.	
	Közbülső esemény Az esemény bekövetkezik, ha egy vagy több olyan megelőző ok merült fel, amelyek logikai kapukon keresztül fejtik ki hatásukat az adott eseményre.	

Az 1. ábra az esettanulmány során elemzett hibafát szemlélteti.



1. ábra
Hibafa (példa) [a szerző]

Első lépésként az elemi események azonos bekövetkezési valószínűségeivel határozzuk meg a főesemény bekövetkezési valószínűségét. A számítási eredményeket szemlélteti a 2. ábra. Látható, hogy a főesemény bekövetkezési valószínűsége nem lineárisan változik az elemi események (azonos) bekövetkezési valószínűségei függvényében. Ez azt jelenti, hogy a hibafaelemzés megbízhatósági modellje nemlineáris rendszert alkot.

A vizsgált hibafa megbízhatósági, azaz a szimulációs eljárás magmodellje:

$$P_{TE} = P_1 P_2 \tag{1}$$

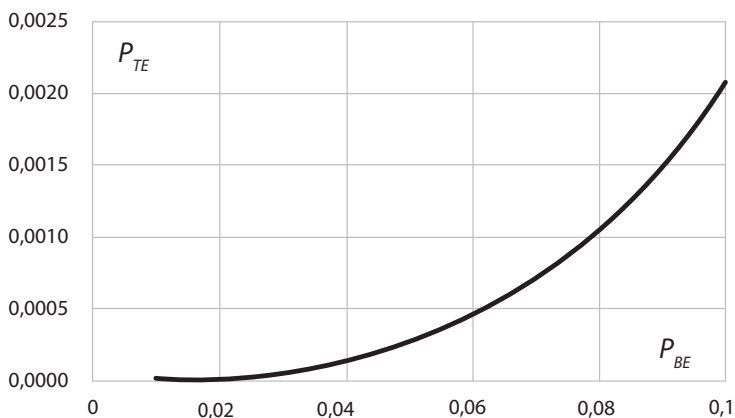
$$P_1 = 1 - ((1 - P_{11})(1 - P_{12})) \tag{2}$$

$$P_2 = P_{21} P_{22} \tag{3}$$

$$P_{11} = P_{111} P_{112} \tag{4}$$

$$P_{22} = 1 - ((1 - P_{221})(1 - P_{222})) \tag{5}$$

A további vizsgálatunkhoz először az elemi események – névleges (átlagos vagy jellemző) bekövetkezési valószínűségeit kell meghatároznunk, amelyeket a 2. táblázat tartalmaz. Ezek alapján, az (5)–(1) egyenletek felhasználásával (visszafelé haladva) meghatározhatók a közbülső események, valamint a főesemény névleges bekövetkezési valószínűsége (3. táblázat).



2. ábra

A főesemény bekövetkezési valószínűsége az elemi események (azonos) valószínűségei függvényében [a szerző]

2. táblázat
Kiinduló meghibásodási adatok [a szerző]

$P_{12} = 0,01$	$P_{21} = 0,02$	$P_{111} = 0,05$
$P_{112} = 0,06$	$P_{221} = 0,04$	$P_{232} = 0,03$

3. táblázat
Számított valószínűségi értékek [a szerző]

$P_{22} = 0,068800$	$P_{11} = 0,003000$
$P_2 = 0,001376$	$P_1 = 0,012970$
$P_{TE} = 1,178461 \cdot 10^{-5}$	

3. Korrelációs érzékenységelemzés

Egy korrelációs együttható két véletlen változó közti sztochasztikus kapcsolat lineáris erősségét jellemzi [1].

A véges pozitív átlagértékű η és μ véletlen változók közti keresztkorrelációs együttható a következő formában írható fel:

$$R(\eta, \mu) = \frac{M((\eta - M(\eta))(\mu - M(\mu)))}{D(\eta)D(\mu)} \quad (6)$$

ahol:

M – várható (átlag) érték;

D – szórás.

A korrelációs együttható mindig -1 és $+1$ között van, azaz

$$-1 \leq R(\eta, \mu) \leq 1 \quad (7)$$

Ha η és μ nem függenek egymástól, akkor

$$R(\eta, \mu) = 0 \quad (8)$$

Véges pozitív átlagértékű η és μ véletlen változók korrelációs együtthatója ($R_{\eta\mu}$) a következő egyenlettel becsülhető meg:

$$R_{\eta\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{j=1}^n x_j \right) \left(y_i - \sum_{j=1}^n y_j \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^n y_j \right)^2}} \quad (9)$$

az $x_1, x_2, \dots, x_n$ és $y_1, y_2, \dots, y_n$ minták segítségével, amelyek az η és μ változókhoz tartoznak [4].

4. Monte Carlo-szimuláció

Monte Carlo-módszereknek nevezzük a matematikai feladatok megoldásának véletlen mennyiségek modellezését felhasználó numerikus módszereit és azok jellemzőinek statisztikus értékelését [12]. A Monte Carlo matematikai eszköz, amely alkalmas arra, hogy véletlen események sorozatával oldjunk meg determinisztikus problémákat [3].

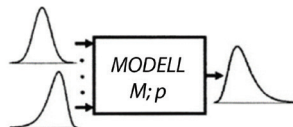
A szimulációs elemzési eljárás alapvetően Metropolis és Ulam [6] publikációjához köthető, amelyben a szerzők a módszert Monte Carlo-nak nevezték el. Őket megelőzően is már alkalmaztak statisztikai mintavételezési elemző módszereket a természettudományokban. Talán a legkorábbi dokumentált véletlenszerű mintavétel az integrál megoldásának megtalálására Comte De Buffon (1777-ben) nevéhez fűződik, illetve William Thomson (más néven: Lord Kelvin) 1901-ben a klasszikus rendszerek belső energia-egyensúlyát vizsgálta az atomok és molekulák véletlen ütközéseinek modellezésével [8].

A szimulációs eljárás lényege, hogy az egyes bizonytalan tényezőkhöz rendelt valószínűségeloszlások alapján véletlenszerűen választunk ki értékeket, amelyeket a szimulációs vizsgálat egy-egy kísérletében felhasználunk.

A technikai rendszerek szimulációs elemzése esetén a következő lépéseket alkalmazzuk:

1. kellő számú független, adott eloszlású mintahalmazt generálunk;
2. a generált mintahalmaz alapján – a rendszer vagy folyamat (alap vagy mag) matematikai modelljének felhasználásával – határozzuk meg a rendszer lehetséges válaszait;
3. a kapott válaszártékek statisztikai, valószínűségi elemzésével meghatározzuk a rendszer kimenő jellemzőinek várható valószínűségi eloszlásait.

Ezt szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra
A Monte Carlo-szimuláció [a szerző]

A vizsgált rendszer bemenő jellemzőinek értékeit a mérési eredmények statisztikai kiértékelései alapján generáljuk. Ehhez a leginkább ismert eljárások:

- a) inverz eloszlásfüggvény módszer;
- b) direkt transzformációs módszer;
- c) dob-elvet (*hit and miss*) módszer.

Valószínűségi mintahalmazok generálása során mérnöki szempontból fontos figyelembe vennünk a valószínűségi eloszlásfüggvények egyik általános „hibáját”, azt, hogy értelmezési tartományuk a két végtelen érték között található. Mivel ez nem teszi lehetővé a műszaki gyakorlatban előforduló, reális – adott intervallumon belüli (például, hogy egy esemény bekövetkezési valószínűsége értékének a $[0;1]$ intervallumon belül kell lennie) – értékek vizsgálatát.

A műszaki gyakorlatban alkalmazott Monte Carlo-módszer előnye, hogy nincs szükség a sokszor igen bonyolult analitikus, esetleg numerikus módszerekkel történő modellmegoldásra, hanem „csupán” véletlen számok generálásával válaszolhatók meg a feltett szakmai kérdések. A modellgenerálást kellő számban elvégezve, a kapott eredményeket elemezve megbecsülhetjük – és adott szakmai szempontból értékelhetjük – a várható rendszerválaszok valószínűségi eloszlásait.

5. Esettanulmány

Esettanulmányunkban az 1. ábrán látható hibafát elemezzük. A 2. táblázatban megadott kiinduló adatokat vettük fel, úgy, hogy a szórásaik a várható értékek egy századszorosai. (Ez utóbbi feltételezést a későbbi összehasonlító elemzési szempontok tették szükségessé.)

A következő lépésben a „kellő számú mintahalmazt” generálva futtatjuk le a magmodellt és rögzítjük a futási eredményeket. Ekkor a legkényesebb kérdés a „kellő szám” meghatározása. Ezt szakmai szempontból döntően befolyásolja a szimulációs elemzéssel szemben elvárt pontosság.

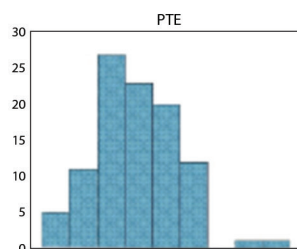
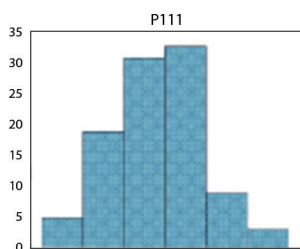
Vizsgálatunkban a „relatív 0,01” pontosságot választottuk, amit úgy értelmeztünk, hogy a fokozatosan növekvő gerjesztéssel végzett szimuláció közti legnagyobb relatív eltérés kisebb legyen, mint 10^{-2} . A korrelációs együtthatók csak -1 és $+1$ közötti értékkel bírhatnak, így – a szakmai tapasztalatok alapján is – prognosztizálható nagyságrendjük 10^{-1} . Ezért, a kívánt relatív pontosság ismeretében a gerjesztések számát addig célszerű növelni, amíg a legnagyobb eltérés, az egymást követő korrelációs mátrixok azonos elemei közti relatív eltérés kisebb, mint 10^{-3} .

A 4. ábra szemlélteti, hogy a gerjesztésszám növekedésével a felhasznált eredmények és a szimuláció eredményei egyre jobban közelítik a feltételezett valószínűségi eloszlásokat. Példaképpen az 5. ábra a 111 elemi és a fő esemény bekövetkezési valószínűségei közti korrelációs együttható változását, a 6. ábra pedig a legnagyobb relatív eltéréseket szemlélteti a gerjesztésszám függvényében. A diagramból látható, hogy a szimuláció kezdetekor meghatározott pontossági követelmény az 1 000 000-s gerjesztésszám esetén teljesült.

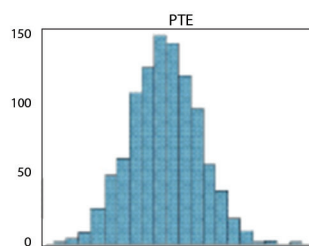
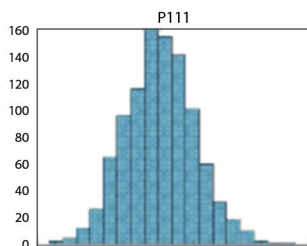
6. Következtetések

A Monte Carlo-szimuláción alapuló korrelációs elemzés, valamint lineáris hibafa érzékenységi modell [10], [11] eredményeinek megbízhatósági mérnöki szempontból történő értékelésével a következő következtetések vonhatók le:

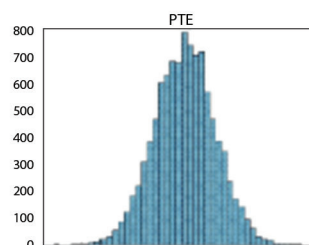
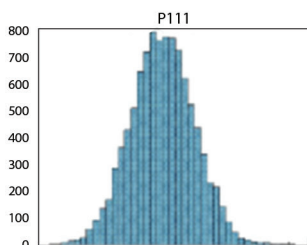
1. A magmodell nemlineáris – lásd a (1)–(5) egyenleteket és a 2. ábrát.
2. A Monte Carlo-szimuláción alapuló korrelációs és lineáris hibafa érzékenységi modell módszer eredményei hasonlóak, lásd 7. ábra.



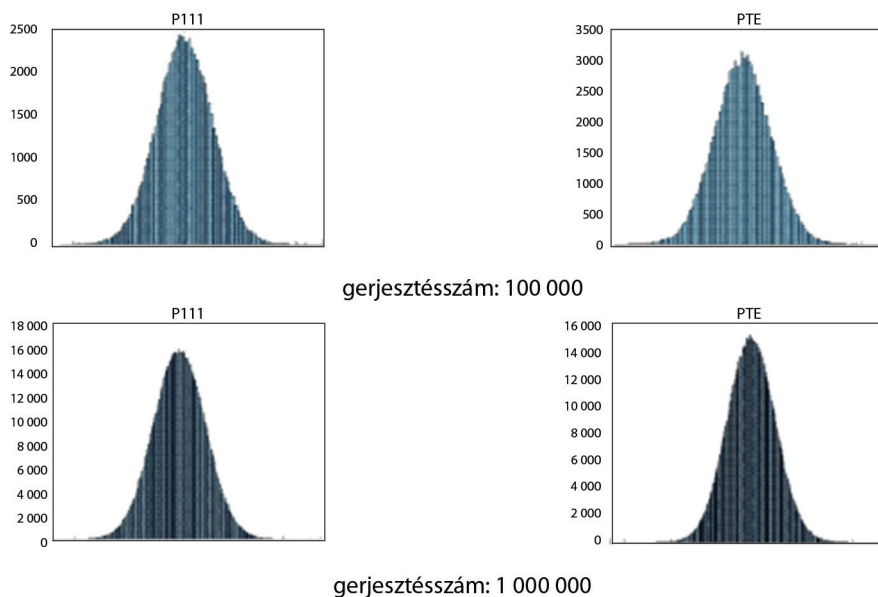
gerjesztésszám: 100



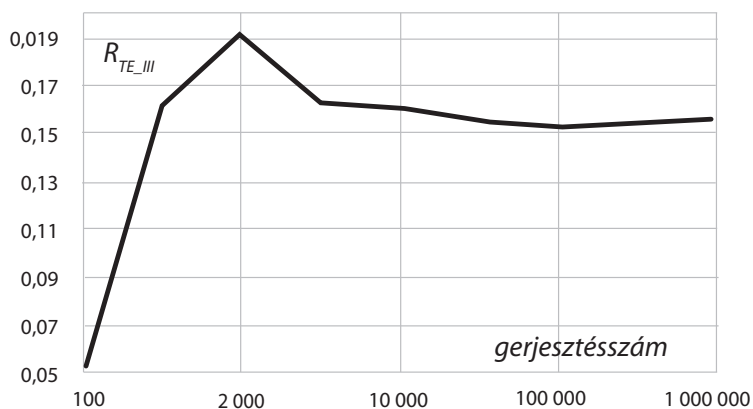
gerjesztésszám: 1000



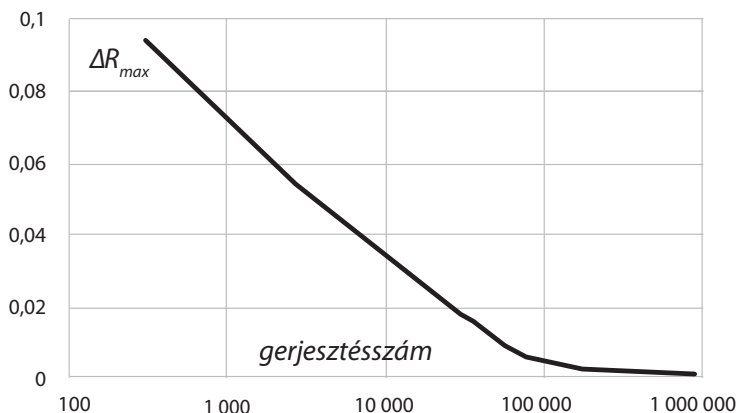
gerjesztésszám: 10 000



4. ábra
A 111 elemi és a fő esemény hisztogramjai különböző gerjesztésszámok esetén [a szerző]



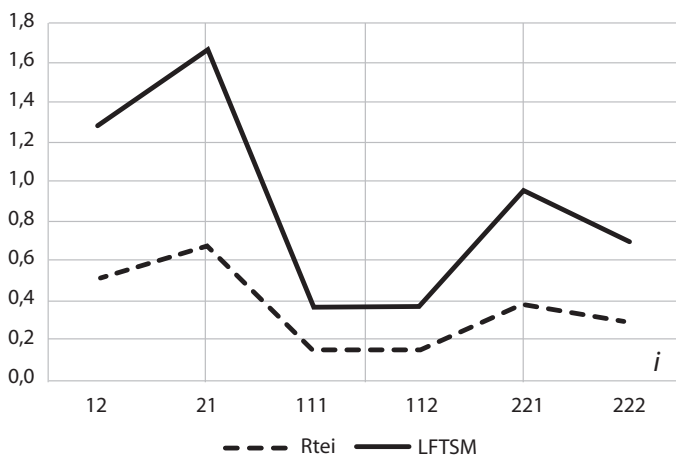
5. ábra
A 111 elemi és a fő esemény bekövetkezési valószínűségei közti korrelációs együttható változása a gerjesztésszám függvényében [a szerző]



6. ábra

Az egymás követő korrelációs együtthatók közti ΔR_{max} maximális relatív különbségek változása a gerjesztésszám függvényében [a szerző]

A fő esemény valószínűségérzékenységek sorrendje és aránya megegyezik a 7. ábra szerint.



7. ábra

A Monte Carlo-szimuláción alapuló korrelációs módszer és a lineáris hibafa érzékenységi modell eredményeinek összehasonlítása [a szerző]

A fent említett hasonlóságok ellenére a korrelációalapú és a lineáris érzékenységi módszerek eredményei numerikusan (nagyságrendben) eltérnek egymástól.

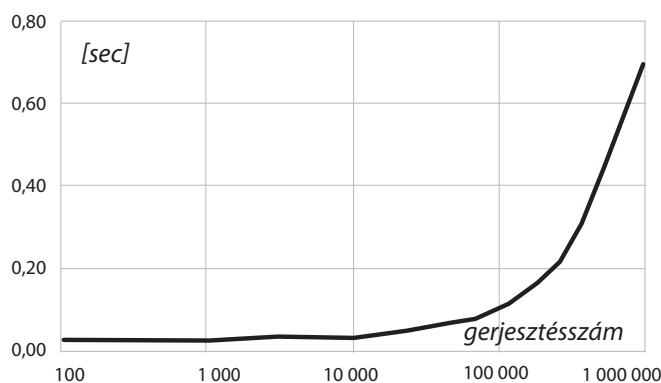
Egyrészt a lineáris érzékenységi módszer linearizálja az eredetileg nemlineáris alapmodellt (lásd a 2. ábrát), ezért numerikus bizonytalanságokhoz vezethet. A Monte Carlo-szimuláción alapuló korrelációs módszer képes kezelni ezeket a nemlineáris problémákat, így pontosabb

eredményt ad. Másrészt a lineáris érzékenységi elemzés során az elemi események valószínűségeinek változását „egyenként” modellezik.

A Monte Carlo-szimulációs érzékenységi elemzés hátránya, hogy jelentősen nagyobb számítási és számítógépes memóriakapacitást igényel.

Ezt szemlélteti a 8. ábra. Igaz, a szimuláció futási ideje eléggé kicsi. Egyrészt, ne felejtjük, hogy az elemzett hibafa a gyakorlati mérnöki feladatoknál jóval kisebb. Másrészt ez az egyszerű példa is jól szemlélteti, hogy a Monte Carlo-szimuláció lefuttatásának ideje (és így a szükséges számítási kapacitás és memóriaigény) exponenciális jelleggel növekszik a pontosabb eredményt adó nagyobb gerjesztésszámok esetén.

A Monte Carlo-szimuláció eredményei felhasználhatók a technikai rendszerek megbízhatóságának más szempontokból történő vizsgálatára is. Például a szükséges pótalkatrészek számának becslésére és a meghibásodások számának meghatározására, a szükséges becslési bizonytalanság (a megengedett pótalkatrészhiány valószínűsége) függvényében.



8. ábra

Az egymást követő korrelációs együtthatók közti maximális különbségek változása a gerjesztésszám függvényében [a szerző]

7. Összefoglalás

A modern gépészetben számos nemkomplex kapcsolatú rendszer található. Az ilyen típusú berendezések megbízhatóságát hibafaelemzéssel lehet modellezni. Ez a tanulmány egy korrelációalapú módszert javasol, amely alkalmazható a valószínűségi hibafaelemzés műszaki megbízhatósági szempontú vizsgálatára.

A javasolt szimuláció eredményeinek műszaki megbízhatósági értékelése alapján fontos következtetéseket lehet levonni a vizsgált rendszer megbízhatóságával kapcsolatban.

A szerző ezen alkalmazott matematikai és műszaki megbízhatósági területekhez kapcsolódó, jövőbeli tudományos kutatásai között szerepel új matematikai modellezési módszerek kidolgozása, amelyek segítenek a műszaki vezetés döntéseiben a műszaki rendszerek megbízhatóságának növelése érdekében.

Felhasznált irodalom

- [1] I. N. Bronstejn, *Matematikai kézikönyv*. Budapest, Typotext, 2005.
- [2] *IEC 1025 Fault Tree Analysis (FTA)*. Genf, International Electrotechnical Commission, 1990.
- [3] M. H. Kalos, P. A. Whitlock, *Monte Carlo Methods*. Wiley VCH, 2008. Online: <https://doi.org/10.1002/9783527626212>
- [4] G. A. Korn, T. M. Korn, *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. Courier Corporation, 2000.
- [5] E. Labašová, „Reliability Assessment of the Systems with Simple Interconnections,” *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 29. évf. 49. sz. pp. 36–42. 2021. Online: <https://doi.org/10.2478/rput-2021-0022>
- [6] N. Metropolis, S. Ulam, „The Monte Carlo Method,” *Journal of the American Statistical Association*, 44. évf. 247. sz. pp. 335–341. 1949. Online: <https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310>
- [7] *MSZ EN 1050, Gépek biztonsága – A kockázatértékelés elvei*. Budapest, Magyar Szabványügyi Testület, 1999.
- [8] M. E. J., Newman, G. T., Barkema, *Monte-Carlo Methods in Statistical Physics*. New York, Oxford University Press, 1999, p. 475. Online: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198517962.001.0001>
- [9] L. Pokorádi, *Rendszerek és folyamatok modellezése*. Debrecen, Campus, 2008.
- [10] L. Pokorádi, „Mátrixalgebrai Hibafa-érzékenységelemzés,” *Multidiszciplináris Tudományok*, 103–110. 2011. Online: <https://ojs.uni-miskolc.hu/index.php/multi/article/view/68/66>
- [11] L. Pokorádi, Sensitivity Investigation of Fault Tree Analysis With Matrix-Algebraic Method, *Theory and Applications of Mathematics & Computer Science*, 1. sz. pp. 34–44. 2011.
- [12] E. Zio, *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Springer, 2013. Online: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-4588-2>

Correlation-based Sensitivity Analysis of Fault Tree

The Fault Tree Analysis (FTA) is a systematic, top-down logical and diagrammatic risk assessment tool, which shows the causal relations leading to a given undesired event, so-called Top Event (TE). The events that cannot be further developed are the Basic Events (BEs). Probabilistic Fault Tree Analysis (PFTA) is a quantitative analysis method used to calculate the probability of TE depending on probabilities of BEs. Analysing the correlation coefficients between the reliabilities of TE and BEs is effective in selecting the critical elements that have the greatest impact on system reliability. The aim of the study is, on the one hand, to develop a correlation-based method for examining the sensitivity of probabilistic fault tree analysis. On the other hand, to compare the sensitivity results obtained in this way with the results of the Linear Fault Tree Sensitivity Model developed by the Author earlier.

Keywords: reliability, risk assessment, Fault Tree Analysis, correlation, sensitivity analysis

Pokorádi László, CSc
professor emeritus
Óbudai Egyetem
Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet

pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0003-2857-1887

László Pokorádi, CSc
Professor Emeritus
Óbuda University
Institute of Mechatronics and Vehicle
Engineering

pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0003-2857-1887

Bauer Péter

Determinisztikus szenzor mérési hibák kétértelműsége és ennek feloldása GNSS-IMU fúziós állapotbecslő algoritmusok esetén

Jelen cikk a globális navigációs műholdrendszer (GNSS) és a tehetetlenségi mérőegység (IMU) mérései alapján végzett helyzet- és szenzortorzítás-becslés témakörével foglalkozik. Bár e terület széles körben kutatott, a szakirodalomban gyakran elmarad az állapotmegfigyelhetőség szigorú vizsgálata, ami megalapozatlan feltételezések gyanúját veti fel. Jelen munka ezt megerősíti azáltal, hogy megfigyelhetőségi számítások segítségével rámutat: egy rendszer pozíciójának, sebességének, orientációjának, valamint a gyorsulás- és szögsebességszenzor torzításainak becsléséhez a GNSS-alapú pozíció- és sebességmérések mellett orientációval kapcsolatos mérések bevonása is szükséges. Ilyen kiegészítő mérés lehet például a mágneses tér vektorának meghatározása. Az elméleti eredményeket valós repülési körülmények között rögzített GNSS- és IMU-adatokon végzett vizsgálatok támasztják alá, amelyeket egy DJI M600 Pro típusú multikopter szolgáltatott. Az eredmények összehasonlításához referenciaként a fedélzeti DJI becslő algoritmus kimeneteit használtam.

Kulcsszavak: navigációs állapotbecslés, kiterjesztett Kálmán-szűrő, GNSS-IMU adatok fúziója, megfigyelhetőségi problémák, megfigyelő tervezése nemlineáris rendszerhez

1. Bevezetés

A globális navigációs műholdrendszer (GNSS¹) és a tehetetlenségi mérőegység (IMU²) információinak fúzióját széles körben alkalmazzák a helyzet (pozíció és orientáció) becslésére légi vagy földi járművek esetében egyaránt [2], [3], [4], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]. A pozíció és az orientáció mellett rendszerint a sebesség becslése is cél, sőt gyakran figyelembe veszik a gyorsulás- és szögsebesség-érzékelők determinisztikus mérési hibáit is (*Bias*). Ezeket a tömörség kedvéért a továbbiakban a *bias* kifejezésnek megfelelő torzítás megnevezéssel illetem. A [8] forrás kizárólag az orientáció becslésére összpontosított, ugyanakkor hangsúlyozta a giroszkóp torzításának becslési fontosságát alacsony költségű szenzorrendszerek esetén.

Az [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [10], [11], [13], [14], [15] hivatkozások a pozíció-, sebesség- és orientációbecslést célozzák. Ezek közül a szenzortorzítások becslését a [4], [7], [9], [10], [11],

¹ Global Navigation Satellite System: globális műholdas helymeghatározó rendszer.

² Inertial Measurement Unit: inerciális mérőegység.

[14], [15] munkák tárgyalják, azonban az állapotok megfigyelhetőségének vizsgálata kizárólag a [7], [9] hivatkozásokban jelenik meg. Az előbbi a pozíció- és sebességhibák megfigyelhetőségét vizsgálta, a gyorsulás- és szögsebesség-torzítások megfigyelhetőségének elemzése nélkül. Az utóbbi esetében a linearizált rendszer megfigyelhetősége nem teljesült, azonban kimutatták, hogy a nemlineáris megfigyelhetőség figyelembevételével és több, tartós gerjesztést biztosító becslési lépés alkalmazásával az állapotok mégis becsülhetők.

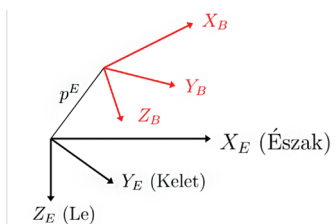
Az IMU mágneses méréseinek (a gyorsulás- és szögsebességmérések mellett) alkalmazását a [7], [9], [10] hivatkozások tárgyalják, de a pozíció-, sebesség- és orientációbecslés együttes vizsgálata kizárólag a [7], [9] munkákban jelenik meg. Az előbbi az IMU, a légadat-rendszer és a távolságmérő berendezések fúzióját vizsgálja GNSS-kimaradások esetére, míg az utóbbi a GNSS- és IMU-adatok szorosan csatolt (*Tightly Coupled*) fúzióját elemzi.

A szerző legjobb tudomása szerint ugyanakkor nem áll rendelkezésre olyan munka, amely az állapotok megfigyelhetőségére és a mágneses mérések esetleges szükségességére figyelve módszeresen vizsgálná a lazán csatolt (*Loosely Coupled*) GNSS-IMU-fúziót – az IMU gyorsulás- és szögsebességméréseit felhasználva –, amelyet korlátozott számítási kapacitású fedélzeti rendszerekben széles körben alkalmaznak. Jelen munka célja e hiány pótlása.

A cikk felépítése a következő: a 2. fejezet bemutatja a nemlineáris kinematikai egyenleteket, amelyek alkalmazhatók a pozíció-, sebesség-, orientáció- és szenzortorzítások becslésére, figyelembe véve a GNSS-pozíció- és sebességméréseket, az IMU gyorsulás és szögsebesség adatait, valamint opcionálisan a mágneses méréseket is. E fejezet két különböző becslési koncepciót is ismertet. A 3. fejezet az állapotok megfigyelhetőségével foglalkozik a két koncepció figyelembevételével. Ezt követi a 4. fejezet, amely valós repülési szenzoradatokon alapuló hangolást és a két koncepció összehasonlítását mutatja be, reflektálva a megfigyelhetőséggel kapcsolatos megállapításokra. Végül az 5. fejezet összegzi a cikk eredményeit.

2. A rendszer egyenletei

A becslési megoldások kidolgozása során figyelembe vett koordináta-rendszereket az 1. ábra szemlélteti. Ezek a földhöz (X_E, Y_E, Z_E) és a testhez rögzített (X_B, Y_B, Z_B) koordináta-rendszerek, ahol az előbbi az Észak–Kelet–Le (*North–East–Down*) rendszerrel egybeesik. Tekintettel arra, hogy a vizsgált járművek viszonylag rövid távolságokat tesznek meg, a földi rendszer inerciarendszernek tekinthető, így az IMU mérései ehhez viszonyítva értelmezhetők. A továbbiakban az E és B felső indexek rendre az adott vektor föld, illetve test koordináta-rendszerbeli reprezentációját jelölik. Feltételezem, hogy az IMU és a mágneses szenzorok a test koordináta-rendszerhez illesztve, ahhoz mereven rögzítve helyezkednek el.



1. ábra
A test (B) és föld (E) koordináta-rendszerek [a szerző]

A teljes állapotbecsléshez szükséges a pozíció, a sebesség és az orientáció dinamikájának felírása, figyelembe véve a gyorsulás- és szögsebességméréseket, valamint azok torzításait és zaját. A kinematikai egyenletrendszert az (1) egyenlet tartalmazza (tankönyvi források alapján, lásd például [10]).

Itt $p^E = [N \ E \ h]^T$ a jármű északi (N), keleti (E) pozícióját és repülési magasságát (h) jelöli. A $v^E = [v_N \ v_E \ v_D]^T$ rendre az Észak–Kelet–Le (NED) irányú sebességkomponenseket tartalmazza, míg G a lefelé irányuló sebesség és a magasságváltozási sebesség közötti transzformációt reprezentálja. Az $a_m^B = [a_x \ a_y \ a_z]^T$ a test koordináta-rendszerben mért gyorsulás a testhez rögzített IMU feltételezése mellett. A $b_a = [b_{a_x} \ b_{a_y} \ b_{a_z}]^T$ a gyorsulásmérő torzításvektora, míg $n_a \in \mathbb{R}^3$ a gyorsulásmérés zérus várható értékű, Gauss-eloszlású zajvektora, amelynek kovarianciamátrixa $Q_a \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$. A $g^E = [0 \ 0 \ g]^T$ a gravitációs gyorsulás vektora a föld koordináta-rendszerben. A $q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ az elfordulás egységkvaterniók reprezentációja (lásd például [5]). Az $R_{EB}(q)$ a kvaternió alapú, test koordináta-rendszerből a föld koordináta-rendszerbe történő transzformációt megadó forgatási mátrix, amint azt a (2) egyenlet mutatja:

$$\dot{p}^E = G \cdot v^E, G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{v}^E = R_{EB}(q)(a_m^B - b_a - n_a) + g^E \quad (1)$$

$$\dot{q} = Q(q)(\omega_m^B - b_\omega - n_\omega)$$

$$\dot{b}_a = n_{b_a}$$

$$\dot{b}_\omega = n_{b_\omega}$$

$$R_{EB}(q) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q(q) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

A (3) egyenletben szereplő $Q(q)$ a kvaterniószorzás nem zérus részét reprezentáló mátrix $\begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}$ szögsebesség-vektor esetén. Az $\omega_m^B = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ a test koordináta-rendszerben mért szögsebesség, a $b_\omega = [b_{\omega_x} \ b_{\omega_y} \ b_{\omega_z}]^T$ ennek torzításvektora, míg $n_\omega \in \mathbb{R}^3$ a szögsebességmérés zérus várható értékű, Gauss-eloszlású zajvektora, $Q_\omega \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ kovarianciamátrixszal.

A szenzortorzítás-vektorokat lassan változó, fehér zajvektorok ($n_{b_a} \in \mathbb{R}^3, n_{b_\omega} \in \mathbb{R}^3$) által gerjesztett Markov-folyamatokként modellezem, amelyek kovarianciamátrixai rendre $Q_{b_a} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, Q_{b_\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

A GNSS-alapú pozíció- és sebességmérések, valamint a földi mágneses vektor test koordináta-rendszerben történő mérése az alábbi módon reprezentálható:

$$\begin{aligned} p_m^E &= p^E + n_p \\ v_m^E &= v^E + n_v \\ H_m^B &= R_{BE}(q)H^E + n_H \end{aligned} \quad (4)$$

Itt $H^E = [H_x \ H_y \ H_z]^T$ a Föld mágneses térerősség vektora az adott földrajzi helyen, $R_{BE}(q) = R_{EB}(q)^T$, továbbá $n_p \in \mathbb{R}^3$, $n_v \in \mathbb{R}^3$, $n_H \in \mathbb{R}^3$ zérusvárható értékű, Gauss-eloszlású mérési zajvektorok, amelyek kovarianciamátrixai rendre $R_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $R_v \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $R_H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$.

A bemutatott egyenletek alapján az u bemeneti, az x állapot és az y , mérési vektorok a következőképpen képezhetők:

$$u = [(a_m^B)^T \ (\omega_m^B)^T]^T \in \mathbb{R}^6 \quad (5)$$

$$x = [(p^E)^T \ (v^E)^T \ q^T \ b_a^T \ b_\omega^T]^T \in \mathbb{R}^{16} \quad (6)$$

a mágneses mérések elhanyagolásával

$$y_1 = [(p_m^E)^T \ (v_m^E)^T]^T \in \mathbb{R}^6 \quad (7)$$

vagy figyelembevételével

$$y_2 = [(p_m^E)^T \ (v_m^E)^T \ (H_m^B)^T]^T \in \mathbb{R}^9 \quad (8)$$

A következő rész a javasolt becslési algoritmust foglalja össze, amelynek célja a rendszer-állapotok meghatározása a rendelkezésre álló mérések alapján.

Az (1) és (4) egyenletekben megadott rendszer az állapotváltozók tekintetében nemlineáris, ezért alkalmazása nemlineáris becslési módszert igényel. A szakirodalomban leggyakrabban alkalmazott eljárások közé tartozik a kiterjesztett Kálmán-szűrő (*Extended Kalman Filter*, EKF) és a hibaállapotú Kálmán-szűrő (*Error State Kalman Filter*, ESKF), lásd például [10], [14]. Jelen munkában az EKF-megoldást választom, mivel az egyszerűbb megvalósítást tesz lehetővé, mint az ESKF.

A vizsgált feladatra vonatkozó diszkrét idejű EKF-egyenletek az alábbiak szerint adhatók meg. A predikciós egyenletek a (9) egyenletben, míg a korrekciós egyenletek a definiált két különböző mérési halmaz (y_1, y_2) esetén a (10) és (11) egyenletekben találhatók.

$$\bar{x}(k+1) = \hat{x}(k) + \begin{bmatrix} G \hat{v}^E(k) \\ R_{EB}(\hat{q}(k)) (a_m^B(k) - \hat{b}_a(k)) + g^E \\ B(\omega_m^B(k)) \hat{q}(k) - Q(\hat{q}(k)) \hat{b}_\omega(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta t + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (R_{EB}(\hat{q}(k)) (a_m^B(k) - \hat{b}_a(k)) + g^E) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta t^2 \quad (9)$$

$$\bar{P}(k+1) = F_x(k) \bar{P}(k) F_x(k)^T + F_i(k) Q F_i(k)^T$$

Itt a $\bar{\cdot}$ jel az előrejelzett (prediktált), míg a $\hat{\cdot}$ jel a korrigált becsléseket jelöli. A $P \in \mathbb{R}^{16 \times 16}$ az állapotbecslési hiba kovarianciamátrixa. $B(\omega_m^B(k))$ a szögsebesség és az egységkvaternió közötti kvaterniószorzat reprezentációja a (12) egyenletnek megfelelően.

$F_x(k)$ és $F_i(k)$ rendre a diszkrét idejű, Jacobi-mátrixon alapuló linearizált állapotátmeneti, illetve zajhatásmátrixok $F_x(k)$ és $F_i(k)$ részletes alakját lásd a Függelékben. E mátrixokat az aktuális $\hat{x}(k)$ állapotbecslés, valamint az $a_m^B(k)$ és $\omega_m^B(k)$ mérések behelyettesítésével határozom meg.

$$H_1(k+1) = [I_6 \ 0_{6 \times 10}]$$

$$K(k+1) = \bar{P}(k+1) H_1(k+1)^T (H_1(k+1) \bar{P}(k+1) H_1(k+1)^T + R_1)^{-1}$$

$$\hat{x}(k+1) = \bar{x}(k+1) + K(k+1) (y_1(k+1) - h_1(\bar{x}(k+1))) \quad (10)$$

$$\bar{P}(k+1) = (I_{16} - K(k+1) H_1(k+1)) \bar{P}(k+1) (I_{16} - K(k+1) H_1(k+1))^T + K(k+1) R_1 K(k+1)^T$$

$$\begin{aligned}
 H_2(k+1) &= \begin{bmatrix} I_6 & 0_{6 \times 4} & 0_{6 \times 6} \\ 0_{3 \times 6} & B_1(\bar{q}(k+1), H^E) & 0_{3 \times 6} \end{bmatrix} \\
 K(k+1) &= \bar{P}(k+1)H_2(k+1)^T(H_2(k+1)\bar{P}(k+1)H_2(k+1)^T + R_2)^{-1} \\
 \hat{x}(k+1) &= \bar{x}(k+1) + K(k+1)(y_2(k+1) - h_2(\bar{x}(k+1)))
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{P}(k+1) &= (I_{16} - K(k+1)H_2(k+1))\bar{P}(k+1)(I_{16} - K(k+1)H_2(k+1))^T + K(k+1)R_2K(k+1)^T \\
 B(\omega_m^B) &= -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ -\omega_x & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ -\omega_y & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_z & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{12}$$

A fenti egyenletekben Q a blokkdiagonális szerkezetű bemeneti zaj kovarianciamátrixa, míg R_1 és R_2 a blokkdiagonális felépítésű mérési zaj kovarianciamátrixok:

$$\begin{aligned}
 Q &= \begin{bmatrix} Q_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{b_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{b_\omega} \end{bmatrix} \\
 R_1 &= \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_v \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} R_p & 0 & 0 \\ 0 & R_v & 0 \\ 0 & 0 & R_H \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{13}$$

$h_1(\bar{x})$ és $h_2(\bar{x})$ a prediktált állapotokból számított becslött kimeneteket adják meg, feltételezve, hogy a földi mágneses vektor H^E – a megtett távolságok kis mértéke miatt – állandónak tekinthető:

$$h_1(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \bar{p}^E \\ \bar{v}^E \end{bmatrix}, \quad h_2(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \bar{p}^E \\ \bar{v}^E \\ R_{BE}(\bar{q})H^E \end{bmatrix} \tag{14}$$

A $B_1(q, H^E) = \frac{\partial(R_{BE}(q)H^E)}{\partial q}$ tagot a Függelék részletezi.

3. Megfigyelhetőség

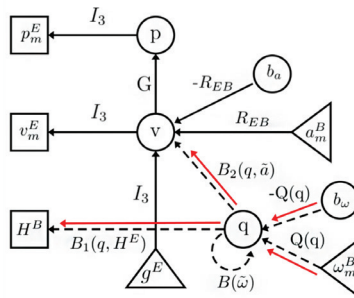
A linearizált rendszer megfigyelhetősége az (F_x, H_1) és (F_x, H_2) párokból felépített megfigyelhetőségi mátrixok alapján vizsgálható (lásd például [7]). A megfigyelhetőségi mátrixokat a MATLAB Symbolic Math Toolbox alkalmazásával határoztam meg, majd különböző állapot- és mérési értékeket helyettesítettem be.

Az első esetben, mágneses mérés nélkül (H_1), a minimális rang 11-nek adódott a következő paraméterek mellett: $q = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, $a_m^B = R_{BE}(q)g^E$, $p^E = [0 \ 0 \ 100]^T$, $v^E = [10 \ 0 \ 0]^T$, valamint zérus szögsebesség és torzítások (megjegyezve, hogy nem zérus magasságot és északi irányú sebességet feltételeztem). Nem zérus szögsebesség alkalmazásával a rang 13-ra növekedett, azonban több reális, nem zérus paraméterkombináció vizsgálata mellett sem érte el a szükséges 16-os értéket (az állapotvektor dimenzióját). A b_a vagy b_ω

torzításvektorok valamelyikének elhagyása 13-ra csökkentette az állapotok számát, miközben a rang 13 maradt, így teljes állapotmegfigyelhetőség adódott. Ez azt mutatja, hogy mindkét torzításvektor egyidejű megfigyelése további mérések nélkül nem lehetséges.

A második esetben mágneses méréssel (H_2) a minimális rang 15 volt (azonos paraméterek mellett), és bármely nem zérus szögsebesség vagy szögsebesség-torzítás alkalmazása esetén 16-ra növekedett, azaz a mátrix teljes rangúvá vált. Következésképpen a mágneses mérés bevonása a rendszert megfigyelhetővé teszi megfelelő, tartós forgási gerjesztés mellett.

Részletesebb és intuitívabb megfigyelhetőségi vizsgálat végezhető gráfalapú megközelítéssel (lásd például [1]), amely segíti a függőségek feltárását, valamint a szingularitás miatt potenciálisan megszűnő kapcsolatok részletes elemzését. A rendszer következtetési diagramja, amely már a mágneses mérést is tartalmazza a 2. ábrán látható. Az ábra jelöli a potenciálisan megszűnő kapcsolatokat, azaz a lehetséges szinguláris $Q(q)$, $B_1(q, H^E)$, $B_2(q, \tilde{a})$, valamint $B(\tilde{\omega})$ mátrixokat (a részletes definíciókat lásd fentebb és a Függelékben).



2. ábra

A becslő következtetési diagramja

Megjegyzés: A folytonos fekete vonalak a soha el nem tűnő, a szaggatottak pedig a potenciálisan eltűnő kapcsolatok. A piros vonalak a potenciálisan eltűnő kapcsolatok vizsgálata során megtalált valós esetben soha el nem tűnő kapcsolatokat mutatják [a szerző]

A $Q(q)$ mátrix rangja mindig három (azaz teljesrangú), mivel az egységkvaternió elemei különböző sorokban szerepelnek, és az egységkvaternió nem lehet zérusvektor. A $B_1(q, H^E)$ mátrix csak akkor lehet szinguláris, ha $\det(B_{1i}) = 0$, $\forall i \in [1 \dots 4]$ mivel H^E sohasem zérus. A kvaternió-elemek figyelembevételével a $\det(B_{1i})$ determinánsok vektora $8[q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T = 8q$, amely sohasem zérus, így szingularitás nem léphet fel. Hasonló megállapítás érvényes a $B_2(q, \tilde{a})$ mátrixra is, mivel a transzponált mátrixok determinánsai megegyeznek. Itt $\tilde{a}$ csak abban az esetben lehet zérus, ha a gyorsulásszenzor torzításvektora megegyezik a mért gyorsulással, azonban a gyorsulásmérések a gravitációt is tartalmazzák (tehát nem lehetnek zérusak). Ez a gyakorlatban lehetetlen eset. A $B(\tilde{\omega})$ mátrix zérussá válhat, ha $\tilde{\omega} = 0$, így ez potenciálisan megszűnő kapcsolatot jelent. Ez azonban kizárólag a kvaternióorientációnak a saját dinamikájára gyakorolt hatását érinti, és nem befolyásolja az állapotok és a mérések közötti kapcsolatokat.

A soha meg nem szűnő kapcsolatok vizsgálata azt mutatja, hogy a mágneses vektor mérése nélkül a gyorsulás- és a szögsebesség-torzításokra vonatkozó információ kizárólag a sebességállapoton keresztül nyerhető ki, ami potenciális kétértelműséget okozhat a becslésükben. Ez megerősíti a lineáris megfigyelhetetlenségre vonatkozó eredményeket.

Ez a kétértelműség könnyen levezethető az (1) egyenletben szereplő sebességdinamikából, feltételezve egy ΔR forgáshibát, amelyet a szögsebesség-torzítás okoz. Ez a hiba elfedhető egy megfelelően megválasztott gyorsulástorzítási taggal (b'_a), amely az ideális és a hibás egyenletek azonosságát eredményezi:

$$\begin{aligned} \dot{v}^E &= R_{EB}(q)(a_m^B - b_a) + g^E = R_{EB}(q)\Delta R(a_m^B - b'_a) + g^E \\ b'_a &= (I - \Delta R^T)a_m^B + \Delta R^T b_a \end{aligned} \quad (15)$$

Eközben a mágneses vektor mérése a gyorsulástól független információt szolgáltat a szögsebesség dinamikájáról és annak torzításáról, ezáltal megszüntetve a gyorsulás- és szögsebesség-torzítás közötti kétértelműséget. Következésképpen, amennyiben a helyzet (pozíció és orientáció) mellett mind a gyorsulás-, mind a szögsebesség-torzítás becslése is cél, úgy elengedhetetlen valamely orientációval kapcsolatos mérés – például a mágneses mérés – alkalmazása.

A következő fejezet az eljárások összehasonlítását mutatja be egy multikopter valós repülési szenzoradatainak felhasználásával.

4. Tesztelés valós repülési adatokon

Valós repülési IMU- és GNSS-adatokat gyűjtöttem egy DJI M600 Pro multikopterrel [6], amely a ZalaZONE Smart City tesztpályamodul felett téglalap alakú repülőgépszerű (bedöntéseket alkalmazó) repülési mintát hajtott végre. A DJI fedélzeti helyzetbecslő algoritmust alkalmaz, ezért a becsült orientációs adatok (Euler-szögek) is rendelkezésre állnak összehasonlítás céljából. Ezeket a becsléseket a drón szabályozására használják, ami nagy pontosságú, ezért a fedélzeti becslések referenciaként megfelelően pontosnak tekinthetők.

A repülés kezdeti, mozdulatlan szakaszát figyelembe véve meghatároztam az IMU-mérések kovarianciáit, valamint a normalizált H^E földi mágneses vektort (amelyet a teljes repülés során állandónak tekintettem). A GNSS-pozíció- és sebességmérések zajkovarianciáit reális értékekre állítottam, anélkül hogy azokat közvetlenül a mérésekből becsültem volna, mivel nyugalmi állapotban nem zajszerű ingadozás, hanem inkább lassú *drift* figyelhető meg, így a reális kovarianciák nem határozhatók meg megbízhatóan az adatokból.

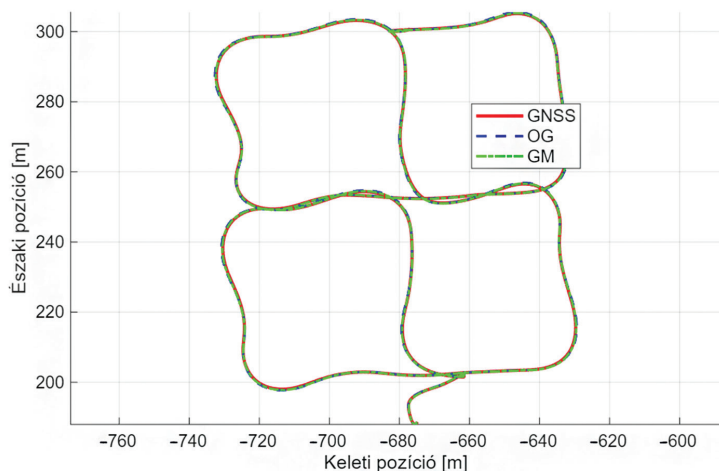
Mindkét szűrőt próbálgatásos módszerrel hangoltam, az eredeti zajkovarianciák skálázásával, annak érdekében, hogy a DJI-adatokhoz viszonyítva a lehető legjobb becslési eredményeket érjem el. A mérésekhez nem adtunk hozzá további gyorsulás- vagy szögsebesség-torzítást. A becslési eredményeket a 3–7. ábrák mutatják be. Az „OG” jelölés kizárólag GNSS-mérések alkalmazását jelenti [a (10) egyenlet szerint], míg a „GM” jelölés GNSS + mágneses mérések együttes felhasználását a (11) egyenlet szerint] a szűrőben. Bár a felszállás utáni repülési idő mindössze 150 s, a drón ez alatt körülbelül 750 m távolságot tett meg (a repülési sebesség 5 m/s) több fordulót végrehajtva, így az eredmények reprezentatívnak tekinthetők.

A 3. ábra azt mutatja, hogy a GNSS által mért pozíciótrajektóriát mindkét becslő megfelelően követi; ez nem meglepő, hiszen közvetlen mérésről van szó, és a hangolás lehetővé teszi a mért jelek pontos követését.

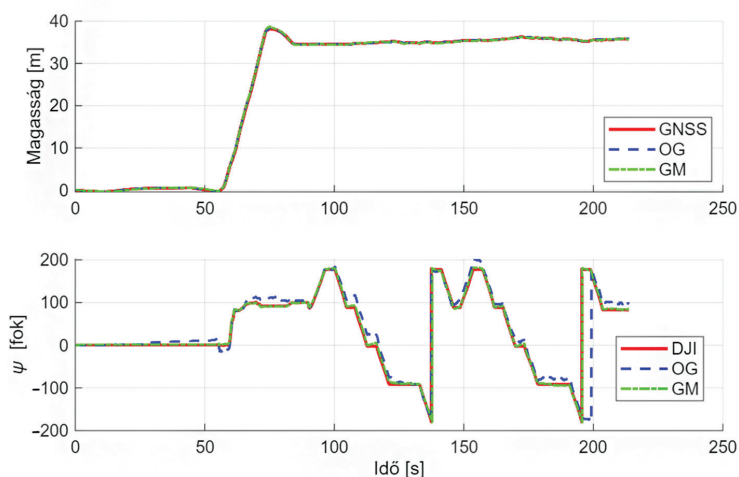
A 4. ábra szemlélteti, hogy a magasságmérést mindkét módszer jól követi. Az Euler-szögek tekintetében az eredmények összevethetők a DJI fedélzeti becsléseivel, amelyek a robotpilóta működésének alapját képezik, így pontos referenciának tekinthetők. Az OG-szűrő által

becsült legyezési szög egyes szakaszokon jelentős hibát mutat, míg a GM-szűrő jól követi a DJI-becsléseket. Az 5. ábra a bedöntési és bólintási szögek becsléseit mutatja, hasonló tendenciával: a GM-szűrő pontosabb eredményeket szolgáltat.

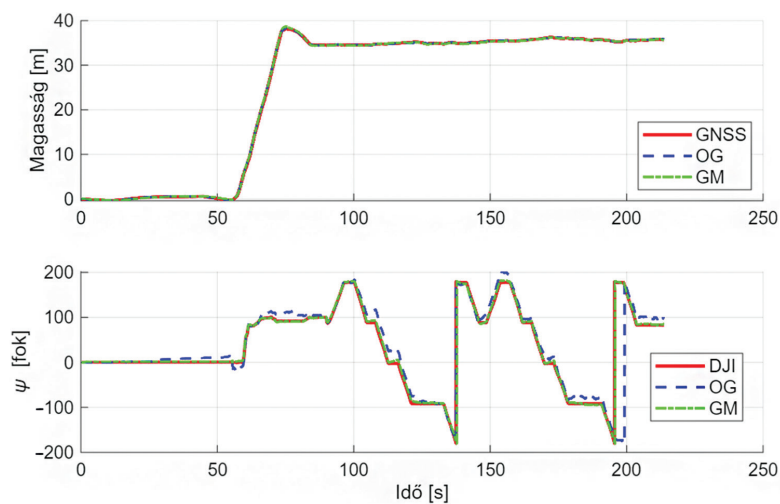
A zérus hozzáadott torzítások melletti torzításbecsléseket vizsgálva megállapítható, hogy a GM-szűrő teljesítménye kedvezőbb, mivel a becsült torzítások közelebb esnek a zérushoz (lásd 6. és 7. ábra). Megjegyzendő, hogy a becsült értékek itt sem pontosan zérusak, különösen a gyorsulástorzítások esetében (6. ábra), ami a mért adatokban ténylegesen jelen lévő torzítások következménye lehet. A DJI azonban nem publikálja a saját torzításbecsléseit, így azokkal a közvetlen összehasonlítás nem lehetséges.



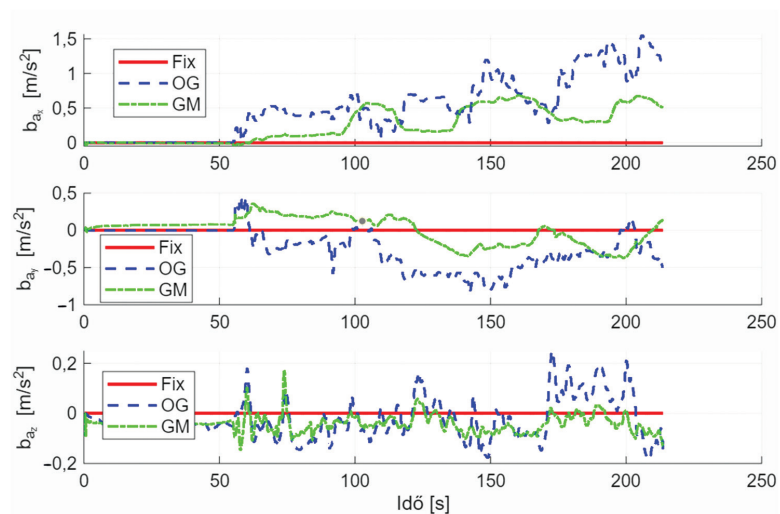
3. ábra
Mért és becsült repülési pályák az észak-kelet síkon [a szerző]



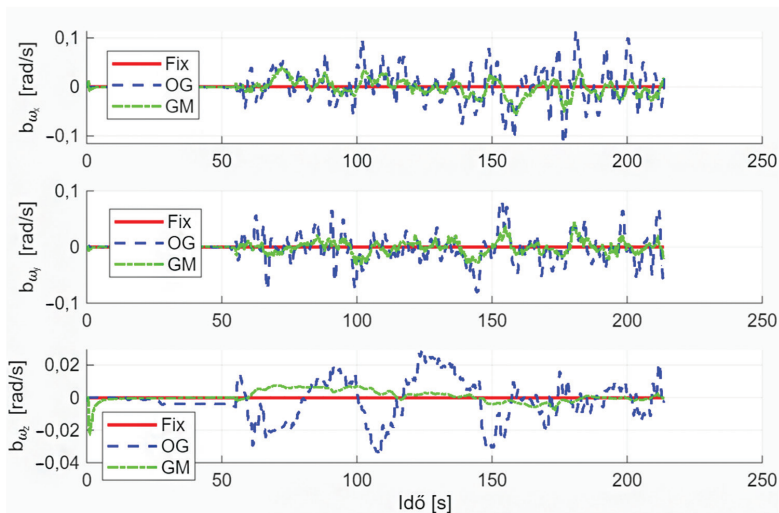
4. ábra
Mért és becsült repülési magasság és legyezési szög [a szerző]



5. ábra
Mért és becsült bedöntési és bólintási szögek [a szerző]



6. ábra
Valós és becsült gyorsulásszenzor-torzítások [a szerző]



7. ábra

Valós és becsült szögsebességszenzor-torzítások [a szerző]

A szűrők zérus hozzáadott torzításokra hangolását követően $b_a = [1, -0,5, 2]^T \left[\frac{m}{s^2} \right]$ és

$b_\omega = [0,08, -0,05, 0,03]^T \left[\frac{rad}{s} \right]$ torzításokat adtunk a mért értékekhez a hangolt algo-

ritmusok torzítástűrésének vizsgálata céljából. Az eredmények az OG-konceptió működésképtelenségét és a GM-megközelítés sikerességét mutatják. A 8. ábra szemlélteti, hogy az OG-szűrő legyezési szög becslése elfogadhatatlan: gyors váltásokat mutat $\pm 180^\circ$ között, valamint jelentős eltérést a DJI-becslésekhez képest. Ezzel szemben a GM-szűrő a hozzáadott torzítások ellenére is jól követi a DJI-referenciabecsléseket.

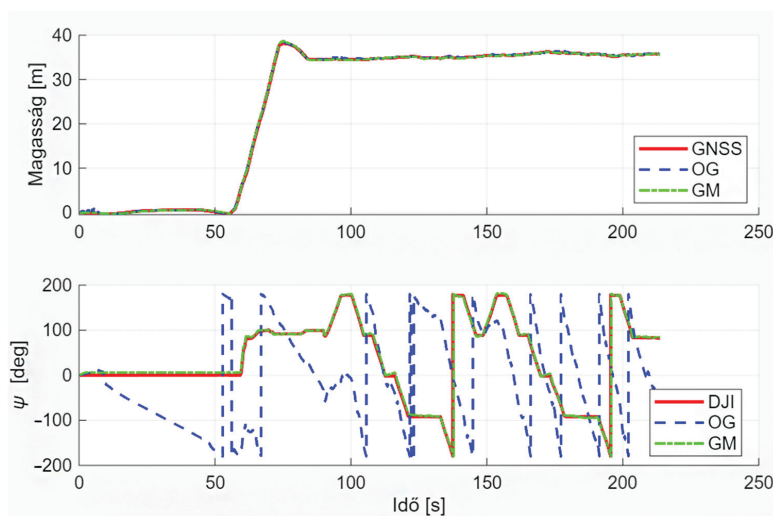
Az OG-szűrő bedöntési és bólintási szög becslései szintén elfogadhatatlanok, mivel a DJI-referenciabecslésekhez viszonyítva néhol még előjel tekintetében is ellentétes értékeket szolgáltatnak. Ezzel szemben a GM-szűrő becslései továbbra is közel maradnak a DJI által szolgáltatott referenciaértékekhez (9. ábra).

A 10. és 11. ábrákon bemutatott torzításbecslések megerősítik ezeket az eredményeket: a GM-szűrő sikeres torzításbecslést végez, míg az OG-módszer jelentős hibákat mutat. A 10. ábra szerint a GM-módszer esetében a b_{ay} komponensben állandó eltérés figyelhető meg, valamint a drón mozgásának megkezdése előtt közel állandó értékek adódnak, azonban a mozgás elindulását követően a becslések gyorsan konvergálnak a megadott torzításértékekhez. A b_{ax} esetében nagyobb eltérés tapasztalható, azonban ez a torzításmentes esetben is jelen volt (lásd 6. ábra). Az OG-szűrő ezzel szemben jelentős eltéréseket mutat, különösen a b_{ax} komponens esetében.

A 11. ábra azt szemlélteti, hogy a GM-szűrő szögsebesség-torzítás becslései közel esnek a megadott értékekhez, míg az OG-módszer nagy hibákat, sőt a $b_{\omega z}$ komponens esetében

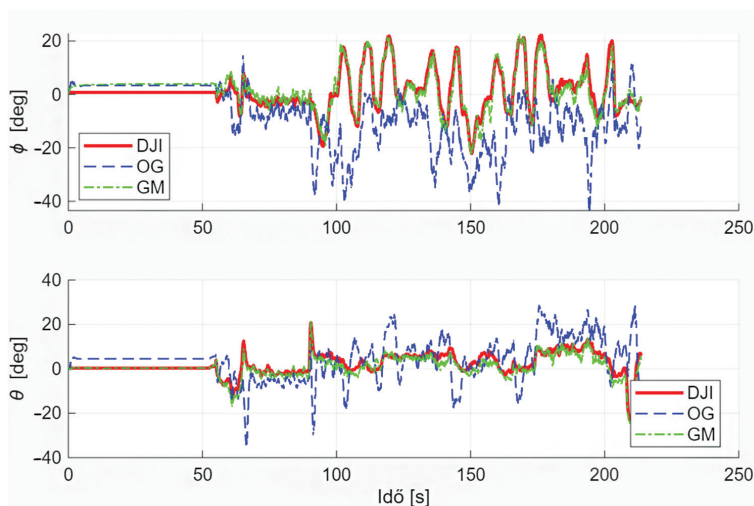
divergenciát mutat. Ez magyarázatot ad a legyezési szög becslésében megfigyelhető többszöri 360°-os elfordulásokra, amelyek a rendszer valós dinamikájában nem jelentkeznek.

Összefoglalásként megállapítható, hogy a megfigyelhetőségi vizsgálatok eredményeit a szűrőkön végzett kísérleti tesztek is alátámasztják: amennyiben cél mind a gyorsulás, mind a szögsebesség-érzékelők torzításainak becslése, úgy a GNSS-alapú pozíció- és sebességmérések mellett mágneses (vagy más, orientációval kapcsolatos) mérések alkalmazása is szükséges.



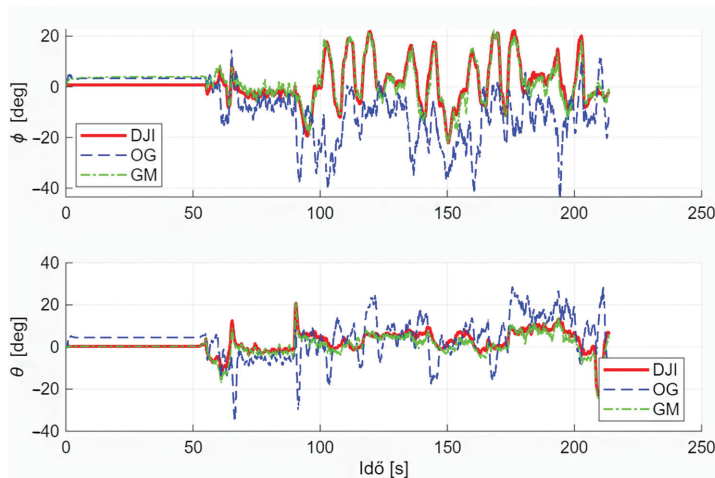
8. ábra

Mért és becsült repülési magasság és legyezési szög [a szerző]

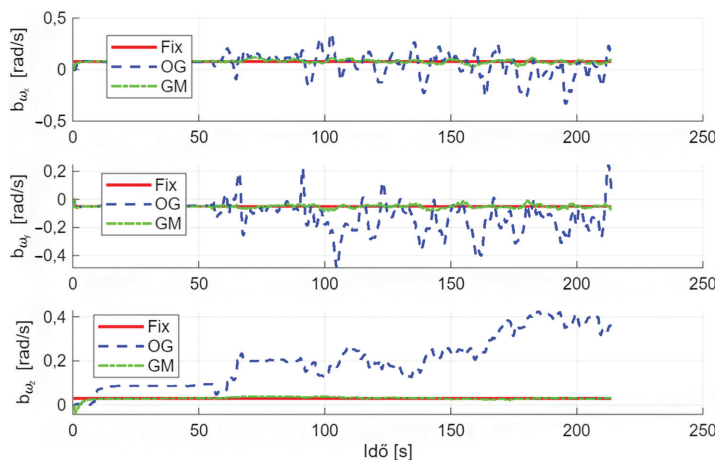


9. ábra

Mért és becsült bedöntési és bólintási szögek [a szerző]



10. ábra
Valós és becsült gyorsulásszenzor-torzítások [a szerző]



11. ábra
Valós és becsült szögsebességszenzor-torzítások [a szerző]

5. Összegzés és továbblépés

Jelen cikk a szenzortorzítás-becslés kétértelműségének problémájával foglalkozik GNSS-IMU-mérésfúzió alapuló helyzetbecslés esetén. A vonatkozó szakirodalom rövid áttekintését követően megfogalmazza a pozíció-, sebesség- és orientációdinamikát leíró kinematikai egyenleteket, figyelembe véve a gyorsulás- és szögsebességméréseket. A lassan változó, lehetséges gyorsulás- és szögsebesség-torzítások modellezése és figyelembevétele szintén megtörténik.

Két kiterjesztett Kálmán-szűrő (EKF) alapú állapotbecslőt valósított meg: az egyik kizárólag GNSS-alapú pozíció- és sebességméréseket alkalmaz, míg a másik ezeket mágneses mérésekkel egészíti ki. Az állapotok megfigyelhetőségét mindkét mérési halmaz esetén vizsgáltam, a linearizált modell mátrixai, valamint a nemlineáris rendszer következtetési diagramja alapján. Mindkét megközelítés azt mutatja, hogy a gyorsulás- és szögsebesség-torzítások együttesen csak akkor figyelhetők meg, ha a mágneses méréseket is bevonom. Ellenkező esetben kétértelműség áll fenn a torzításértékek között.

Mindkét szűrőt egy multikopter valós repülési GNSS- és IMU-adatai alapján hangoltam, zérus hozzáadott torzítások mellett. Az eredményeket a multikopter fedélzeti, gyári állapotbecsléseivel hasonlítottam össze. A mágneses méréseket is alkalmazó második szűrő a hangolást követően kedvezőbb teljesítményt mutatott, és a mérésekhez hozzáadott torzítások esetén is megfelelően működött, míg az első szűrő elfogadhatatlan eredményeket adott.

Összegzésként megállapítható, hogy a pozíció, sebesség és orientáció, valamint mind a gyorsulás-, mind a szögsebesség-torzítások pontos becsléséhez a GNSS-alapú pozíció- és sebességmérések mellett szükséges valamilyen orientációval kapcsolatos információ (például mágneses mérés) bevonása is.

Függelék: részletes rendszermátrixok

$B_1(q, H^E) = \frac{\partial(R_{BE}(q)H^E)}{\partial q}$ a test rendszerbeli mágneses mérés kvaternió szerinti deriváltja

az alábbiak szerint:

$$\begin{aligned} B_1(q, H^E) &= 2[B_{11}H^E \quad B_{12}H^E \quad B_{13}H^E \quad B_{14}H^E] \\ B_{11} &= \begin{bmatrix} q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix}, \quad B_{12} = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \\ q_2 & -q_1 & q_0 \\ q_3 & -q_0 & -q_1 \end{bmatrix} \\ B_{13} &= \begin{bmatrix} -q_2 & q_1 & -q_0 \\ q_1 & q_2 & q_3 \\ q_0 & q_3 & -q_2 \end{bmatrix}, \quad B_{14} = \begin{bmatrix} -q_3 & q_0 & q_1 \\ -q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_1 & q_2 & q_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (F1)$$

Az F_x diszkrét idejű, Jacobi linearizált állapot átmeneti mátrix (9) alapján az alábbi alakban adható meg:

$$F_x = \begin{bmatrix} I_3 & G\Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_3 & B_2(q, \tilde{a}_m)\Delta t & -R_{EB}(q)\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & I_4 + B(\tilde{\omega}_m)\Delta t & 0 & -Q(q)\Delta t \\ 0 & 0 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (F2)$$

ahol $B_2(q, \tilde{a}_m) = 2[B_{11}^T \tilde{a}_m \quad B_{12}^T \tilde{a}_m \quad B_{13}^T \tilde{a}_m \quad B_{14}^T \tilde{a}_m]$, $\tilde{a}_m = a_m^B(k) - \bar{b}_a(k)$ (az idő-indexeket az egyszerűség kedvéért elhagytam) és $\tilde{\omega}_m = \omega_m^B(k) - \bar{b}_\omega(k)$ a további tagokat a 2. fejezetben definiáltam.

Az F_i diszkrét idejű, linearizált zajhatás mátrix az alábbi formában adható meg (1) és (9) alapján (minden elemét már korábban definiáltam):

$$F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_{EB}(q) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q(q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (F3)$$

Felhasznált irodalom

- [1] L. A. Aguirre, L. L. Portes, C. Letellier, „Structural, Dynamical and Symbolic Observability: From Dynamical Systems to Networks,” *PLOS One*, 13. évf. 10. sz. 2018. Online: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206180>
- [2] C. V. Angelino, V. R. Baraniello, L. Cicala, „UAV Position and Attitude Estimation Using IMU, GNSS and Camera,” *2012 15th International Conference on Information Fusion*, pp. 735–742. 2012.
- [3] M. N. Cahyadi et al., „Analysis of GNSS/IMU Sensor Fusion at UAV Quadrotor for Navigation,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1276(1). 2023. Online: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1276/1/012021>
- [4] H.-J. Chu et al., „GPS/MEMS INS Data Fusion and Map Matching in Urban Areas,” *Sensors*, 13. évf. 9. sz. pp. 11280–11288. 2013. Online: <https://doi.org/10.3390/s130911280>
- [5] J. Chou, „Quaternion Kinematic and Dynamic Differential Equations,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 8. évf. 1. sz. pp. 53–64. 1992. Online: <https://doi.org/10.1109/70.127239>
- [6] DJI M600 Pro Hexacopter. 2017. Online: <https://www.dji.com/hu/matrice600-pro>
- [7] M. Farkas, *Position and Attitude Estimation of Moving Platforms Using a Tightly Coupled Sensor Fusion*, PhD Thesis, Budapest University of Technology and Economics Hungary, 2025. Online: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstreams/f8af0efe-fb2f-45d6-9876-4dd3d084d02a/download>
- [8] D. Gebre-Egziabher, R. Hayward, J. Powell, „A Low-Cost GPS/Inertial Attitude Heading Reference System (AHRS) for General Aviation Applications,” *IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium (Cat. No.98CH36153)*, pp. 518–525. 1998. Online: <https://doi.org/10.1109/PLANS.1998.670207>
- [9] D. Gebre-Egziabher, *Design and Performance Analysis of a Low-Cost Aided Dead Reckoning Navigator*, PhD Thesis, California, Stanford University, 2002. Online: <https://web.stanford.edu/group/scpnt/gpslab/pubs/theses/DemozGebreEgziabherThesis01.pdf>
- [10] D. Gebre-Egziabher, S. Gleason, *GNSS Applications and Methods*. Artech House, 2009.
- [11] K. Gustavsson, *UAV Pose Estimation using Sensor Fusion of Inertial, Sonar and Satellite Signals*, Master's Thesis, Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology, Mathematics and Computer Science, Department of Information Technology, Division of Systems and Control, 2015. Online: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:827236/FULLTEXT01.pdf>
- [12] C. Jekeli, *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. Berlin, New York, De Gruyter, 2001.

- [13] A. Nemra, N. Aouf, „Robust INS/GPS Sensor Fusion for UAV Localization Using SDRE Nonlinear Filtering,” *IEEE Sensors Journal*, 10. évf. 4. sz. pp. 789–798. 2010. Online: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2009.2034730>
- [14] M. L. Sollie, T. H. Bryne, T. A. Johansen, „Pose Estimation of UAVs Based on INS Aided by Two Independent Low-Cost GNSS Receivers,” *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 1425–1435. 2019. Online: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2019.8797746>
- [15] R. Wolf et al., *An Integrated Low Cost GPS/INS Attitude Determination and Position Location System*. Munich, Institute of Geodesy and Navigation (IfEN), University FAF, 2016.

Sensor Bias Ambiguity in GNSS-IMU Pose Estimation and its Solution

This article deals with the topic of pose and sensor bias estimation based on global navigation satellite system (GNSS) and inertial measurement unit (IMU) measurements, which is a widely discussed topic but usually by omitting the rigorous check of state observability leading to the suspicion of invalid assumptions. The current work underlines this suspicion by pointing out through observability calculations that to estimate position, velocity, orientation and acceleration, and angular rate biases of a system, orientation-related measurements should be included besides GNSS position and velocity data. Such measurement can be the magnetic vector. Theoretical results are underlined by tests considering real flight GNSS and IMU data of a DJI M600 Pro multicopter and comparing the results to the onboard DJI pose estimator.

Keywords: *estimation and filtering, vehicle pose, extended Kalman filter, GNSS–IMU fusion, autonomous systems, observers for nonlinear systems, sensor fusion, observability issues*

Dr. Bauer Péter, PhD
tudományos főmunkatárs
HUN-REN Számítástechnikai
és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI)
Széchenyi István Egyetem (SZE)
bauer.peter@sztaki.hun-ren.hu
[orcid.org/ 0000-0002-1925-2270](https://orcid.org/0000-0002-1925-2270)

Péter Bauer, PhD
Senior Research Fellow
HUN-REN Institute for Computer Science
and Control (SZTAKI)
University of Győr
bauer.peter@sztaki.hun-ren.hu
[orcid.org/ 0000-0002-1925-2270](https://orcid.org/0000-0002-1925-2270)

A publikációban szereplő kutatást a HUN-REN SZTAKI és az SZE az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

A TKP2021-NVA-01 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Juhász Oszvald

A Magyar Honvédség JAS 39 repülőgépeinek kiszolgálása közúti leszállóhelyen

Jelen publikáció célja, hogy bemutassa a Magyar Honvédség JAS 39 Gripen repülőgépeinek ismételt harcfeladatra történő felkészítésének logisztikai támogatási lehetőségét közúti leszállóhelyeken.¹ A tanulmány rávilágít arra, hogy a statikus repülőterek növekvő sebezhetősége miatt elkerülhetetlen a horizontális széttelepítés,² azon belül is a speciálisan kialakított gyorsforgalmi úthálózatok repülési célú, ideiglenes igénybevétele. A kutatás részletesen elemzi egy négy repülőgépből álló kötelék földi kiszolgálásának repülőműszaki feltételrendszerét, fókuszálva a minimális logisztikai lábnyomra. A cikk kiemelt célja továbbá annak hangsúlyozása, hogy e stratégiai képesség kialakítása nem pusztán hadművelleti kérdés. A sikeres és biztonságos alkalmazáshoz elengedhetetlen, hogy ne csupán a (had)művelleti állományt, hanem a repülőműszaki és más logisztikai szakállományt is már a helyszínek kiválasztásakor és a követelmények formálásakor bevonják.

Kulcsszavak: közúti leszállóhely, horizontális széttelepítés, repülőműszaki kiszolgálás, logisztikai támogatás, JAS 39

1. Bevezető

Sokunk számára ismeretesek azok a bemutatófilmek [1], amelyeket a SAAB (gyártó) vagy a Svéd Légierő képviselői mutattak be a JAS 39 magyarországi rendszerbe állítása előtt. A filmek középpontjában szinte minden esetben egy gyorsforgalmi úton, vagy egy külön ilyen célra alkalmas közúti szakaszon végrehajtott, ismételt repülési feladatra való felkészülést mutattak be. Habár a kiépített repülőterek, repülőbázisok kiemelt erőkitetési platformok – így szerepük megkérdőjelezhetetlen –, stratégiai fontosságuk miatt a támadásoknak való kitettségük is nagy, így az alternatív, ideiglenes fel- és leszállóhelyek kialakítására is célszerű figyelmet fordítani. A modern hadviselés dinamikája és a jelenkori konfliktusok empirikus tapasztalatai egyértelműen bizonyítják a hagyományos katonai légibázisok fokozott sebezhetőségét. A repülőterek hatalmas, statikus objektumok, amelyek a precíziós fegyverek és drónrajok elsődleges céljaivá váltak. Bár a légi fölény kivívásának legbiztosabb módja az ellenség földi infrastruktúrájának megsemmisítése, a technológiai fölény percek alatt elvész a repülőterek bénulásával. Erre a kihívásra az egyik leghatékonyabb passzív védelmi stratégia a horizontális széttelepítés, ezen

¹ Az angolszász *Highway Airstrip* terminológiából.

² Az angolszász *Horizontal Dispersion* terminológiából.

belül is a közúti leszállóhelyek alkalmazása. Míg számos légierő ezt a rendszert már alkalmazza, a Magyar Honvédség JAS 39 repülőgépeinek kiszolgálását közúti leszállóhelyen korábban publikáltan még senki nem vizsgálta. Jelen értekezés célja – gondolatébresztőként – ennek a tudományos úrnek a részleges betöltése, fókuszálva a hazai alkalmazás lehetőségeire, és egy konkrét példán keresztül bemutatva a logisztikai, valamint repülőműszaki támogatás specifikus követelményrendszerét.

2. A légibázisok szerepe

2.1. A légibázis mint geostratégiai és műveleti tényező

A katonai bázisok, és különösen a légibázisok, hagyományosan a fegyveres erők elhelyezésére, kiképzésére és a haditechnikai eszközök megóvására szolgáló objektumok, amelyek egy állam nemzeti érdekszférájának védelmét szolgálják. Csengeri János PhD-értekezésének [2] egyik fontos megállapítása, hogy a légibázis nem csupán technikai létesítmény (fel- és leszállóhely), hanem komplex „képességsomag”, amely meghatározza az ott települő légierő harci, harctámogató és harcokszolgáló lehetőségeit. Geostratégiai szempontból a bázisok jelentősége abban rejlik, hogy lehetővé teszik az állam számára a befolyás gyakorlását a határain túl is, biztosítva a diplomáciai, katonai és információs jelenlétet az adott térségben.

A modern hadviselésben a légibázisok szerepe túlmutat a pusztán logisztikán: ezek hatékony erőkitérítési platformok, amelyek a légierő (és ezen keresztül az állam) erőttöbbszöröző eszközeiként funkcionálnak. Különösen a tengerentúli vagy országhatáron túli bázisoknak van jelentősége, mivel ezek hídfőállásként szolgálnak a távoli konfliktusok kezeléséhez, és elhelyezkedésükből adódóan képesek csökkenteni a reakcióidőt és növelni a műveleti hatótávolságot.

2.2. A légibázisok feladatrendszere

A légibázisok feladatrendszere rendkívül szerteágazó, és az alábbi főbb funkcionális csoportokba sorolható.

Harci és erőkitérítési funkció: a repülőgép-anyahajókon kívül egy repülőbázis a kiindulópontja minden légi műveletnek. Lehetővé teszi a támadó és védelmi légi tevékenységet, a légi fölény kivívását és megtartását. A bázis pozíciója közvetlenül meghatározza, hogy a légierő milyen gyorsan és milyen mértékben képes beavatkozni egy konfliktusba.

Logisztikai és támogató funkció: a bázisok „logisztikai csomópontként” is működnek, biztosítva a csapatok és felszerelések továbbítását, az üzemanyag-utántöltést és a készletek tárolását légi úton. A repülőter forgalomátértesztő képessége³ kritikus tényező az expedíciós műveletek során.

Információszerzés és felderítés: a modern bázisok a hírszerzés, megfigyelés és felderítés (ISR⁴) központjai. Nemcsak a pilótavezette gépek, hanem a pilóta nélküli repülő rendszerek

³ Az angolszász *Maximum-on-Ground* (MOG) kifejezésből.

⁴ *Intelligence, Surveillance, Reconnaissance*.

(UAV/UAS⁵) kiszolgálását is biztosítják, amelyek alapvető információkat szolgáltatnak a hadműveleti helyzetkép kialakításához.

Diplomáciai és politikai szerep: egy szuverén állam területén létesített külföldi bázis a két ország közötti szövetségi elköteleződés és együttműködés legerősebb jelképe.

Elrettentés: a bázisokon állomásozó technikai fölény és az erők jelenléte már önmagában is képes elrettenteni a potenciális agresszort a térségben.

2.3. Az országhatáron túli bázisok típusai és jellemzői

Csengeri János értekezése és kutatásai rávilágítanak, hogy a légibázis olyan stratégiai csomópont, amely integrálja a harci, a harctámogató és a harcokszolgáló elemeket. Kenneth Boulding „távolságból származó erő kifejtés-csökkenés”⁶ elmélete alapján a katonai erő hatékonysága a távolsággal arányosan gyengül; ezt a fizikai korlátot hivatottak áthidalni az országhatáron túl telepített bázisok.

Az értekezés részletesen tárgyalja az Amerikai Egyesült Államok gyakorlata alapján elterjedt bázistípusokat, amelyek a nemzetközi terminológiában standarddá váltak:

*Fő műveleti bázis:*⁷ folyamatosan működő, stratégiai jelentőségű központok, jelentős infrastruktúrával és állandó telepítésű erővel. Gyakran kisvárosi méretűek, ahol a katonák családtagjai is élhetnek. Példaként említhető a németországi Ramstein vagy az olaszországi Aviano.

*Előretolt műveleti körlet:*⁸ minimális állandó jelenléttel bíró, de gyorsan aktiválható helyszínek, amelyek váltásban lévő csapatokat vagy gyakorlatokat támogatnak. Ilyen például a törökországi Incirlik.

*Biztonsági együttműködési helyszín:*⁹ állandó katonai személyzet nélküli, szerződéses partnerek vagy a befogadó nemzet által fenntartott bázisok, amelyeket krízishelyzetben vesznek igénybe.

Előkészített helyszínek és útvonalakon elhelyezett bázisok: ezek a pontok készletek tárolására és a csapatok átcsoportosításának megkönnyítésére szolgálnak a nagy távolságok áthidalása során.

2.4. Hatékonyságot befolyásoló tényezők

A légibázisok értékét nemcsak a rajtuk lévő repülőeszközök száma, hanem egyéb támogató tényezők is meghatározzák:

- *elérhetőség:* a bázis közúti, vasúti és vízi megközelíthetősége alapvető a logisztikai utánpótláshoz;
- *kapacitás:* a futópályák teherbírása és hossza, valamint a tárolókapacitások (fegyverzet, üzemanyag) korlátozhatják a bevethető erők méretét;

⁵ Unmanned Aerial Vehicle/Unmanned Aircraft System.

⁶ Eredeti szövegezésben: Distance of Decay.

⁷ Az angolszász Main Operating Base (MOB) kifejezésből.

⁸ Az angolszász Forward Operating Site (FOS) kifejezésből.

⁹ Az angolszász Cooperative Security Location (CSL) kifejezésből.

- *távolság*: a bázis és a műveleti terület távolsága befolyásolja a reakcióidőt és a légi utántöltés szükségességét.

A 20. és 21. század légi hadjáratai – az öbölháborútól a líbiai beavatkozásig – bizonyították, hogy a siker záloga a bázisok hálózatos együttműködése. A bázis tehát olyan dinamikus platform, amely a politikai akaratot fizikai kényszerítőerővé konvertálja. Bár a technológiai fejlődés növeli a repülőeszközök hatótávolságát, a jól kiépített és védett földi infrastruktúra marad a légi hadviselés megkerülhetetlen fundamentuma, amely nélkül az erőketítés fenn tarthatatlan és sebezhető maradna.

Grzegorz Kołata „Airbase as Defended Asset for Air Defense” című tanulmányában [3] rámutat, hogy a katonai légibázisok a légierő műveleteinek Achilles-sarkai. A szerző kiemeli, hogy a repülőterek hatalmas, statikus, ismert koordinátájú objektumok, amelyeket lehetetlen elrejtetni vagy áthelyezni. Ebből fakadóan az ellenség számára könnyű és elsődleges célt jelentenek. A modern hadviselésben a legnagyobb veszélyt a nagy hatótávolságú precíziós fegyverek (ballisztikus rakéták és robotrepülőgépek), valamint az egyre fejlődő drónok jelentik számukra. Ezek a fegyverek képesek a futópályák, lőszer- és üzemanyagraktárak, irányítóközpontok, illetve a földön védtelenül tárolt gépek megsemmisítésére. Hiába rendelkezik egy ország a legkorszerűbb harci repülőgépekkel, ha a kifutók sérültek, vagy a földi logisztika megbénul, a gépek nem képesek felszállni. A légibázis megsemmisítése, vagy akár már célzott pontokon történő megsértése tehát a légi fölény és az erőketítő képesség azonnali elvesztését eredményezi.

Alan J. Vick, a RAND Corporation kutatójának „Winning the Battle of the Airfields” című tanulmánya [4] történelmi perspektívából, hét évtized elemzéseit szintetizálva vizsgálja a repülőterek védelmének és támadásának dinamikáját. A szerző alaptézise szerint a fegyveres konfliktusok során a légibázisok természetes gravitációs pontokká válnak, mivel az ellenséges légierő megsemmisítése a földön nagyságrendekkel egyszerűbb és költséghatékonyabb feladat, mint a légtérben. Bár a technológiai környezet és a fenyegetések spektruma jelentősen átalakult az évtizedek során, a bázisok infrastrukturális sebezhetősége állandó maradt. Napjainkban a hagyományos területi (vagy szőnyeg-) bombázást felváltották a sebészi pontosságú csapásmérő eszközök, különösen a manőverező robotrepülőgépek és a taktikai ballisztikus rakéták, amelyek képesek megbénítani a felszállópályákat és a logisztikai ellátási láncokat. A védekezés tudományos imperatívuszát az adja, hogy a légierő műveleti ritmusának¹⁰ fenntartása kizárólag a földi létesítmények sértetlensége esetén garantálható. Ennek hiányában a technológiai és létszámbeli fölény percek alatt semmivé foszlik a koncentrált precíziós támadások súlya alatt.

Ivan Boban „Requirements of Modern Air Defence” című elemzésében [5] a legújabb – kifejezetten az ukrainai és a közel-keleti fegyveres konfliktusokból származó – empirikus tapasztalatokra támaszkodva értékeli újra a légibázisok oltalmazásának követelményrendszerét. Kutatásában a szerző éles megvilágításba helyezi azt a paradigmaváltást, amelyet a hiperszonikus fegyverrendszerek, az alacsony észlelhetőségű eszközök, valamint az autonóm drónrajok tömeges alkalmazása idézett elő a hadszíntéren. Ezek az aszimmetrikus

¹⁰ Az angolszász *Sortie Generation* kifejezésből.

és csúcstechnológiás fenyegetések olyan komplex támadási vektorokat hoznak létre, amelyek a hagyományos, egyrétegű légvédelmi ernyőket könnyedén áttörik. A repülőterek mint a hadműveleti logisztika és a légtérellelőrzés kritikus csomópontjai az új generációs fegyverek kiemelt célkeresztjébe kerültek.

Adam Rurak és Krzysztof Goniewicz, lengyel szerzőpáros az „Enhancing Security Measures for Military Air Bases” című közös publikációja [6] a katonai repülőterek biztonsági protokolljait a fizikai oltalmazás és a fejlett technológiai megoldások integrációjának metszetében elemzi. Érvelésük magpontja az, hogy a légibázisok kiemelkedő geostratégiai jelentőségükből fakadóan ellenállhatatlanul vonzó célokat¹¹ jelentenek minden potenciális opponens számára. Hangsúlyozzák továbbá, hogy a fenyegetettség napjainkban már korántsem korlátozódik kizárólag a konvencionális, állami szereplők által végrehajtott kinetikus csapásokra. Írásukban kiemelt figyelmet szentelnek a hibrid hadviselés eszköztárának, felvázolva a szabotázsakciók, a kiber-fizikai behatolások és a kereskedelmi drónokkal elkövetett terrorcselekmények veszélyeit.

Összegezve a vizsgált szakirodalmakat – bár némileg eltérő fókusszal és időbeli perspektívával közelítik meg a témát –, egyértelmű és egybehangzó konszenzusra jutnak a katonai légibázisok stratégiai sebezhetőségével kapcsolatban. Mind a négy publikáció megkérdőjelezhetetlen alapvetésként fogadja el, hogy a légi fölény kivívásának legbiztosabb és leghatékonyabb módja az ellenség földi infrastruktúrájának megsemmisítése. A kutatók egybehangzóan rögzítik, hogy a repülőterek hatalmas kiterjedésük és statikus, áthelyezhetetlen jellegük miatt strukturálisan kiszolgáltatottak a modern precíziós fegyverrendszerekkel (ballisztikus rakéták, hiperszonikus eszközök, drónrajok) szemben.

Közös tudományos eredményként fogalmazódik meg továbbá, hogy a modern légierők erőikvetítő képessége teljes mértékben aszimmetrikus függőségi viszonyban áll a bázisok fizikai és kiber-fizikai sértetlenségével. Ebből kifolyólag a szerzők egyöntetűen arra a következtetésre jutnak, hogy a légibázisokat nem tekinthetjük pusztán logisztikai vagy támogató hátországnak. Épp ellenkezőleg: ezek a komplexumok a legmagasabb prioritású védendő stratégiai entitások. A cikkek szerint a túlélésüket és a folyamatos harcképességüket kizárólag a többrétegű, proaktív lég- és rakétavédelmi rendszerek, valamint a robusztus földi biztonsági protokollok integrált, egyidejű alkalmazása garantálhatja.

3. A közúti leszállóhelyek jelentősége

Az előző fejezet végén lévő összefoglalóban is látható, hogy még tudományos szinten is a repülőgépek ismételt feladatra történő előkészítésének biztosítása érdekében arra fektetik a hangsúlyt, hogy a meglévő repülőtereket, azok fajtájára és méretére való tekintet nélkül meg kell védeni a támadások ellen. Azt viszont a gyakorlat is alátámasztja, hogy a repülőbázisok védelme nem minden esetben valósítható meg teljeskörűen, vagy ahogy az egyik fentebb idézett tanulmány rá is világított, a drónokkal végzett támadás esetén nagyon bonyolult, szinte lehetetlen feladat.

¹¹ Eredeti szövegezésben: *Lucrative Targets*.

3.1. A horizontális széttelépítés lehetőségei

A kihívásokra adott egyik válasz a haditechnikai eszközök olyan irányú fejlesztése, hogy azok alkalmasak legyenek rövid nekifutással történő, vagy akár függőleges fel- és leszállásra. Ezen kihívás adott még nagyobb létjogosultságot a repülőgép-anyahajók fejlesztésének, amelyhez társult az azon alkalmazható repülőeszközök fejlesztése is.

A támadás okozta károk enyhítése, vagy akár azok feleslegessé tétele érdekében alkalmazzák a légierőben a horizontális széttelépítést, amely az egyik leghatékonyabb passzív védelmi stratégia a modern légierők eszköztárában.

A horizontális széttelépítés azt a gyakorlatot jelenti, amikor a légierő a repülőgépeit, a kiszolgáló személyzetet, az üzemanyagot és a löszert nem egyetlen nagy, jól ismert és jól célozható központi bázison vonja össze, hanem egy kiterjedt földrajzi területen, számos kisebb helyszínen osztja el.

A széttelépítés fizikai megvalósítása több formában is történhet:

- *A korábban említett előretolt és tartalék bázisok (FOS/CSL):* kisebb, alacsonyabb felszereltségű katonai repülőterek használata az ország különböző pontjain.
- *Polgári infrastruktúra bevonása:* regionális vagy nemzetközi polgári repülőterek ideiglenes katonai használatba vétele a krízis idején.

Az első két esetben továbbra is jól látható és az idézett elemzések szavával élve „vonzó cél” alternatívákká váltak, azaz hosszú távon nem jelentenek valós megoldást a problémára.

[gy a véleményem és korábbi kutatások eredményei [7] szerint is a valódi védelmet biztosító stratégia a közúti leszállóhelyek: gyorsforgalmi utak egyenes, megerősített szakaszainak átalakítása ideiglenes felszállópályává. Ennek mesterei a finn és a svéd (Bas 90 rendszer¹²) légierők, amelyek pilótáit kifejezetten arra képezik ki, hogy erdei utakon szálljanak le, ahol mobil egységek tankolják és fegyverzik fel őket percekben belül.

Napjainkban az amerikai légierő (USAF) ezt a koncepciót emelte doktrinális szintre az ACE¹³ keretében. Felismerték, hogy egy Kínával vagy Oroszországgal vívott potenciális konfliktusban a hagyományos, óriási bázisaik (mint a japán Kadena vagy a németországi Ramstein) túlságosan sebezhetők a rakétacsapásokkal szemben, ezért a túlélés egyetlen útja a gyors, folyamatos, horizontális mozgás és szétszóródás.

A Jay F. Pearson és társai által készített, „Cost Analysis of Optimized Islanded Energy Systems in a Dispersed Air Base Conflict” című tanulmány [8] kiindulópontja pontosan az, hogy a légierő a modern, technológiailag közel egyenrangú ellenfelekkel szembeni konfliktusokban a tömeges rakétacsapások elkerülése végett kénytelen a nagy, központi bázisok helyett a széttelépített légibázis stratégiát alkalmazni.

¹² A svéd terminológiában *Flygbassystem 90*, azaz Repülőbázisrendszer 90.

¹³ *Agile Combat Employment* – agilis harci alkalmazás.

3.2. Nemzetközi kitekintés

A hidegháború időszaka során Európán belül Kelet- és Nyugat-Németország, Svájc, Ausztria, Csehszlovákia, Finnország, Lengyelország, valamint Svédország épített és használt ilyen útszakaszokat [7].

A svéd és finn légierő közötti leszállóhelyeinek rendszere a horizontális széttelepítés abszolút mesterfoka. A fentebb hivatkozott tanulmányok és doktrinális elvek szerint jelenleg az egész NATO – különösen az amerikai légierő (USAF) és a skandináv országok – ezt a modellt tanulmányozza a legintenzívebben, hogy felkészüljön egy modern, intenzív konfliktusra.

A felsorolásban szereplő mindkét északi NATO-tagország doktrínája egyetlen történelmi realitáson alapul: a Szovjetunió (majd Oroszország) közelségén és masszív rakétatüzérségi/légi közlekedési fölényén. Tudták, hogy háború esetén a nagy, hagyományos légibázisaikat (MOB) az első órákban lebombáznák. A túlélés egyetlen esélye, ha a légierő „kiköltözik az erdőbe”.

Ezek az autópálya-szakaszok (Svédországban a történelmi Bas 90 rendszer részei, Finnországban a Baana¹⁴ hadgyakorlatok [9] helyszínei) már békeidőben is repülőtérenk épülnek, csak éppen civil forgalom zajlik rajtuk. Kialakításuk úgy történik, hogy kijelölnek 2-2,5 km hosszú, teljesen egyenes útszakaszokat. Az aszfaltot és az útalapot extra vastagra és teherbírásiúra tervezik, hogy kibírja a 15–20 t-s vadászgépek okozta dinamikus terhelést leszálláskor. Fontos az akadálymentesítés megoldása is. Ennek érdekében a középű elválasztó korlátok, a jelzőtáblák és a lámpaoszlopok percek alatt, modulárisan lebonthatók és eltávolíthatók. Maga a leszállópálya csak a jéghegy csúcsa. Az út mentén, a sűrű fenyvesekben rejtett, aszfaltozott bekötőutak (repülőgépek számára gurulóutak) találhatók, amelyek álcázott parkoló- és karbantartó „betonnyelvekhez” vezetnek. A fák lombkoronája tökéletes védelmet nyújt a műholdas és drónos felderítés ellen.

A svéd Saab JAS 39 Gripen [10] (amelyet a Magyar Honvédség is használ) és a finn F/A-18 Hornet vadászgépeket kifejezetten ilyen spártai környezetre tervezték.

Amikor egy harcászati repülőgép leszáll az autópályán, és begurul az erdei rejtett zsebbe, a művelet sokkal inkább hasonlít a Forma-1-es kerékcserére, mint a hagyományos katonai procedúrára. A repülőeszközt nem egy komplett bázisnyi személyzet várja, hanem egy teherautókból álló kis, mobil konvoj. A repülőgépek alkalmasak úgynevezett *hot refuelling* végrehajtására, amikor a pilóta le sem állítja a hajtóművet, így történik az üzemanyag-feltöltés.

Mi ebben a stratégiában a verhetetlen? Ahogy a korábbi tudományos cikkek is rámutattak: az ellenség rakétáinak száma véges. Ha a finn és svéd légierő háború esetén széttelepül több tucatnyi ilyen autópálya-szakaszra, folyamatosan változtatva a helyüket (mint az „itt a piros, hol a piros?” játékban), az ellenség képtelen lesz valós idejű céladatokkal lekövetni és megsemmisíteni őket. A légierő harcképessége megmarad, a statikus repülőterek sebezhetősége pedig megszűnik.

4. A hazai alkalmazás lehetőségei

Az a gyakorlat, hogy egy fő repülőtérenk van nem kiépített, füves „kiterő repülőtere”, nem új találmány. Már a MiG-21 repülőgépek időszakában volt mindhárom ezen típust üzemeltető

¹⁴ A gyakorlat NATO-megnevezése: *Imminent Field*.

magyar katonai repülőtérnek füves „alternatívája”, ahova időnként ki is települtek: Pápanak Kenyeri, Kecskemétnek Orosháza, Taszárnak Balatonkiliti.

Meg kell még említeni a közös felhasználású repülőterek adta lehetőséget is, de jelenleg ennek még nincsenek meg a fizikai feltételei teljes mértékben [11].

A légi közlekedésről szóló jogszabály lehetőséget nyújt arra, hogy katonai (állami) légi jármű ne csak repülőtéren vagy leszállóhelyen hajtson végre fel- és leszállást. Azonban a cikk írásának időpontjában nem létezik olyan nem repülőtérnek vagy leszállóhelynek minősített, előzetesen kijelölt terület, amely kialakítását tekintve alkalmas arra, hogy ott az MH üzemeltetésében álló merev szárnyú repülőgép fel- és leszállást hajthatna végre.

Alapul véve az utóbbi évek kiemelt, a közigazgatási rendszerrel közösen végrehajtott gyakorlatok tapasztalatait, kimondható, hogy nincs akadálya annak, hogy az MH megfelelő szándéka esetén a jelenlegi gyorsforgalmi úthálózat egyes szakaszainak módosításával, vagy a közeljövőben épülő szakaszok megfelelő kialakításával létesíthetők legyenek olyan közúti leszállóhelyek, amelyek gyakorlások, gyakorlatok során, vagy netán minősített időszakban is alkalmasak merev szárnyú – akár teherszállító – katonai repülőgépek fel- és leszállásának biztosítására. Jelen cikkben nem kívánom ezen lehetőséget jobban elemezni, eddig csupán ezek jelentőségét kívántam bemutatni. Ezt követően az a célom, hogy egy példát mutassak arra, hogy ilyen területen milyen módon valósítható meg a JAS 39 repülőgépek (harc)feladatra történő felkészítésének logisztikai támogatása, hiszen az adott repülőeszközt – mind sárkányszerkezete, mind földi kiszolgáló rendszere tekintetében – ezen elv alapján tervezték [12].

4.1. A közúti leszállás alapvető feltételei

Jelen publikációban kizárólag a repülőműszaki kiszolgálás lehetőségét vizsgálom, és nem térek ki a fizikai feltételekre. Azt viszont tudni kell, hogy egy ilyen feladatnak alapvető feltétele a megfelelő fizikai paraméterekkel rendelkező közúti útszakasz megléte: a tájegységen uralkodó szél irányába tájolt, megfelelő hosszúságú és szélességű, valamint dinamikus teherbírású (LCN¹⁵ értékű) beton (nem aszfalt¹⁶) útszakasz. Minimális feltétel még, hogy legyen ezen a szakaszon belül egy olyan rész, ahol a repülőgépek ismételt feladatra történő előkészítése megtörténhet: ez vagy egy különálló, alaprendeltetésében gépjármű-pihenőhely, vagy csak az útszakasz kiszélesített része. Tekintettel arra, hogy itt éles fegyverzeti kiszolgálás is történhet, a helyszínt úgy kell kiválasztani és utána fenntartani (!), hogy a legközelebbi lakó- és ember által használt épületekhez a megfelelő védőtávolság meglegyen. Ezenkívül biztosítani kell, hogy ezen útszakasz egyéb úton is megközelíthető legyen, tehát a közelben kell fel- és lehajtó részt kialakítani. Azt feltételezem, hogy az útszakasz alkalmas akár egy KC-390/C-130 repülőgép leszállására és ezenfelül egy géppár kötelék (4 db JAS 39) mint alap harcászati egység kiszolgálására (parkolására). Jelen publikációban a fenti követelményeket nem részletezem, mert ezeket az MH nem nyilvános hadműveleti követelményként fogalmazhatja meg. Úgy tekintem, hogy ezen feltételek adottak, és ehhez mérten ismertetem a repülőműszaki kiszolgálás lehetőségét.

¹⁵ Load Classification Number – terhelési osztály.

¹⁶ Az aszfalt nem alkalmas az utánégető hőterhelésnek minőségvesztés nélküli túréására.

4.2. Ismételt feladatra történő előkészítés követelményei és lehetősége

A repülőműszaki kiszolgálás alapszintű feladatai a repülés előtti, az ismételt feladatra történő és a repülés utáni előkészítés. Feltételezve a fő bázis meglétét, közúti leszállóhelyen most az ismételt harcfeladatra történő előkészítés követelményeit és lehetőségét mutatom be részletesen. A személyi és technikai állomány összeállításánál elsődleges szempont a minimális lábnyom és láthatóság biztosítása a maximális rugalmasság és minél szélesebb támogatás mellett. Habár vannak tanulmányok, amelyek a környezetvédelmi és energiahatékonysági módszereket hangsúlyozzák ki [8], ezek mind a rugalmasság vesztesét és a logisztikai lábnyom növelését eredményezik.

4.2.1. Személyi állomány

Négy repülőgéphez alapfeltételként szükséges nyolc fő mechanikus. Közülük gépenként legalább egy fő A+ szintű, úgynevezett *line maintenance* technikusnak kell lennie, aki jogosult az előkészítési munkák önálló végzésére, utántöltésekre, kerékcserére és a fegyverzeti munkáknál segíteni, és aláírási jogosultsággal elengedhet repülési feladatra repülőgépet. Helyettük lehet B szintű szakállomány is, aki már javítási munkát is végezhet. Melléjük a másik négy fő (gépenként egy) pedig A szintű segédszerelő mechanikus, aki a technikus munkáját segíti, egyes munkákat önállóan végez, de aláírási jogosultsága nincs.

Szükséges még egy fő MGSS¹⁷-szakember is. A repülőgép körülbelül 4000 különböző paramétert felügyel és rögzít. Ezeket a paramétereket a repülést követően egy adatátviteli egységen keresztül az MGSS-rendszerbe továbbítják. Az MGSS szolgáltatja az adatokat a rögzített események, sikeres műveletek és hibák részletes elemzéséhez. Emellett nyomon követi az üzemeltetési információkat is, mint például a repült órákat, a magasság- és sebességadatokat, valamint a nyomás- és hőmérsékletértékeket, biztosítva a lehető leghatékonyabb karbantartási rendszert. Így az MGSS-szakember a repülés utáni objektív értékelési feladatokat végez.

Alapvető még egy fő FENIX-üzemeltető is. A FENIX egy feladattervező és dokumentáló rendszer, amely a repülőgép berendezései és alkatrészei életciklusának és meghibásodásainak követésére, repülőműszaki feladatok tervezésére, nyomon követésére és dokumentálására alkalmas. Ilyen, tábori körülmények között ezen munkálatokat papíron dokumentálják, és ezek felügyeletéért, gyűjtéséért és utólagos számítógépes feldolgozásáért felelős ez a dokumentációs szakember.

A hajózó személyzet speciális magassági felszerelésének ellenőrzéséhez nem szükséges FSE¹⁸-szakember, mert azt a fő bázison elvégzik, és az ellenőrzés 24 óráig hiteles. A szakember akkor sem szükséges, ha a hajózó állomány az előkészítés idejére kiszáll a repülőgépből. A ruházat sérülése esetén pedig úgyis javítás szükséges, amely már komolyabb felszerelésigénnyel jár.

A helyszínre szállított, függesztendő bomba- vagy rakétafegyverzet szállítás utáni ellenőrzését háromfős fegyverzeti előkészítő csoport végzi.

A fegyverzeti anyagok előkészítését követően, egyes feladatoknál azzal párhuzamosan, végzi munkáját a négyfős fegyverzeti függesztő csoport, akik a függesztőpontokra a rakéták

¹⁷ Maintenance Ground Support System – repülőműszaki karbantartó támogató rendszer.

¹⁸ Flight Safety Equipment – speciális hajózó magassági felszerelés.

vagy bombák függesztését, az infra- és dipól töltetek utánpótlását, valamint a gépágyúlőszerkezet betöltését végzik.

A fenti repülőműszaki állományon felül, a helyszíni munkákhoz szükséges még egy fő üzemanyagtöltő szakember és egy fő targoncakezelő, akik a szakszükségek kezelését végzik.

A teljes fentebb felsorolt szakállomány helyi tevékenységét pedig egy C szintű képzettséggel rendelkező repülőműszaki mérnök irányítja. Ő felel a feladatok koordinálásáért, irányításáért, a klasszikus zónaparancsnoki feladatok elvégzéséért, valamint képes technikai kérdések kiértékelésére, magasabb szintű repülőműszaki döntések meghozatalára.

Amennyiben javítási munkára van szükség, az otthoni bázisról földi vagy légi úton a helyszínre szállítható a szükséges javító állomány, az alkatrészek és a felszerelés. Feltételezve, hogy az útszakasz alkalmas KC-390 repülőgép fogadására, célszerű az állományt és felszerelésüket ilyen módon, vagy akár helikopterrel a helyszínre szállítani.

Összefoglalva, az 1. táblázat tartalmazza a szükséges, repülőműszaki feladatokhoz köthető, helyszínen tartózkodó személyi állományt.

1. táblázat
Feladat-végrehajtáshoz szükséges személyi állomány [a szerző]

Szakterület	Létszám (fő)
Vezető mérnök	1
Technikus/mechanikus	8
Fegyverzeti előkészítő	3
Fegyverzeti függesztő	4
MGSS szakember	1
FENIX üzemeltető	1
Repülőműszaki összesen:	18
Üzemanyagtöltő	1
Targoncakezelő	1
Személy- és teherszállítók	3
Mindösszesen:	23

A fenti, szorosan logisztikai állományon felül, a feladat végrehajtásához és biztosításához szükséges lehet még az alábbi személyi állomány bevonása:

- leszállási irányító (ATC¹⁹/JFAC²⁰) személy;
- közeli biztosító (FP²¹) és forgalomszabályzó állomány;
- leszállási terület-vizsgáló állomány;
- műveletet irányító parancsnok által kijelölt egyéb állomány.

4.2.2. Technikai eszközök és felszerelések

A repülőműszaki állomány munkájához, tekintettel arra, hogy javítási feladatokra alapesetben nem készülnek, csak az alapszerelések szükségesek. Ezek az alábbiak:

¹⁹ Air Traffic Controller légiforgalmi irányító.

²⁰ Joint Forward Air Controller – előretolt légi harcirányító.

²¹ Force Protection – erők védelme (főként őrség).

- személyi szerszámkészletek, létrák, féktuskók, vontatóvilla;
- kézi tűzoltó készülékek olaj-, levegő- és oxigéntöltő berendezések;
- fegyverzeti függesztő emelők (*Hoisting Gear*), függesztő adapterek, szerszámok.

Ezen eszközök tárolására és szállítására egy 20' konténer alkalmas. A fenti alapfelszereléseken felül az alábbi technikai eszközök is szükségesek:

- egy busz személyi állomány szállítására;
- egy konténerszállító tehergépjármű;
- egy fegyverzetszállító tehergépjármű;
- vontató gépjármű;
- minimum 18 m³-es üzemanyagtöltő gépjármű;²²
- földi áramforrás (115 V 400 Hz AC és 28 V DC biztosítására);
- fegyverszállító kocsik.

A repülőgépek által használt fedélzeti pusztítóeszközök pontos típusát és darabszámát a légi harcparancs határozza meg, logisztikai, és ezen belül repülőműszaki szempontból ez a kijelölendő szállítóeszközök típusában és darabszámában jelenthet változást.

Kiemelendő, hogy amennyiben a közúti leszállóhely alkalmas közepes szállítórepülőgép fogadására, akkor a fegyverzeti anyagokat is célszerű légi úton a helyszínre szállítani – 463L légiszállító raklapra rögzített szállítókoszin málházva –, a többi szakanyaggal együtt.

4.3. A szélesebb spektrumú logisztikai támogatás lehetősége

A repülőműszaki (a Gazdálkodási utasításban²³ szereplő megnevezés szerint: repülőtechnikai) szakterületen kívül még van 22 olyan logisztikai szakterület, amely szinte mindegyike érintett egy ilyen szintű feladat-végrehajtásban.

Ezek közül vannak olyanok, amelyek közvetlenül érintettek a helyszíni végrehajtásban, és ezeket említettük is, de szorosan kapcsolódnak a repülőműszaki kiszolgálási feladatokhoz: hagyományos fegyverzet és rakétatechnika, üzemanyag, közlekedés.

A többiek esetében, habár támogatási feladataikkal hozzájárulnak a feladat végrehajtásához, szakterület-felelősi vagy végrehajtói szinten nem szükséges a jelenlétük ezen feladatonál, így ezek feladattervezési és végrehajtási háttérmunkáját, valamint humán és technikai eszköz erőforrásigényeit nem jelentetem meg, de a teljes logisztikai támogatás tervezésekor figyelembe kell venni őket.

4.4. Kritikus megfontolások

Mint ahogyan azt a korábbi fejezetben kiemeltem, a kialakítandó helyszín megfelelőségét és az alapvető feltételek meglétét alapul vettem, ezek részletes követelményeit nem részleteztem. Azonban van pár olyan tényező, amely nem hadműveleti kérdés, hanem logisztikai

²² Például ÜTG-18 MAN HX-32.440, amely alkalmas a póttartályos 4 db JAS 39 egyszeri teljes utántöltésére.

²³ A honvédelmi szervezetek költségvetési gazdálkodásának rendjéről szóló 20/2021. (V. 19.) HM utasítás.

szakmai, és az akadálytalan, gyors és rugalmas, ugyanakkor szabályos feladat-végrehajtáshoz hozzájárul.

Az első ilyen követelmény a fedélzeti fegyverzeti anyagok mennyisége miatti védőtávolságok megléte. Mind a kiszolgálási feladatok során a repülőgépek között, mind pedig a kijelölt kiszolgálási terület és a legközelebbi, ember által használt épület között megfelelő védőtávolság megléte szükséges. Habár békétől eltérő időszakban nem minden békeidős követelményt kell teljesíteni, a gyakorlások során már erre számítani kell, így nagyon fontos a szakma véleményének figyelembevétele is már a helyszínen kiválasztásakor, kialakításakor.

Fontos kérdés még a fegyverzeti anyagok közúti szállítása. Eddig a használatra előkészített fedélzeti pusztító eszközöket légi úton szállítottuk. Jelenlegi eszközökkel a közúton beládázva, szállító konténerekben történik a szállítás, azonban az így, a szállítás után jelentősen megnövelt fegyverzeti előkészítő állományra és eszközre van szükség a fegyverzeti anyagok előkészítésére, ellenőrzésére. Így amennyiben a helyszínen nem légi úton (KC-390) történik a szállítás, szükséges olyan közúti szállító eszközök megléte, amelyek alkalmasak repülésre előkészített, nem konténerezett – és akár a jövőben beszerzésre kerülő [13], [14], [15] – fegyverzeti eszközök közúti szállítására (rázkódástól való védelmére).

A bevezetésben említett reklámfilmek arra engednek következtetni, hogy a gyártó célja és érdeke olyan repülőgép, amely alkalmas járó hajtómű mellett egyidejű üzemanyagfeltöltésre és fegyverzeti anyag függesztésre. Még a Gripenek hazai hadrendbe állítása előtt jelent meg olyan hazai írás [16], amely kijelentette, hogy „a Gripen úgy tervezték, hogy tábori körülmények között a repülőgép ismételt harcfeladatra történő előkészítését egy hatfős személyzetből álló kiszolgáló csoport tíz percen belül elvégezhesse”. Annak érdekében, hogy ezt a képességet és időtartamot egyáltalán csak nagyságrendileg meg tudjuk közelíteni, szükséges az MH-ban is olyan technikai utasítások²⁴ átvétele és alkalmazásának begyakorlása, amely engedi a – bevezetőben is említett reklámfilmeken látható – járó hajtóművű repülőgépen történő fegyverzetfüggesztési feladatokat. Ennek megléte nagyban csökkenti a földön töltött időt, és növeli a rugalmasságot.

5. Összefoglalás

A tanulmány elemzése rávilágított arra, hogy a Magyar Honvédség JAS 39 Gripen repülőgépeinek üzemeltetése és logisztikai kiszolgálása közúti leszállóhelyeken nem csupán elméleti katonai fikció, hanem a modern hadviselés támasztotta realitások fényében elengedhetetlen stratégiai szükséglet. A szakirodalmi áttekintés és a nemzetközi – különösen a svéd és finn – példák egyértelműen bizonyítják, hogy a hagyományos, hatalmas kiterjedésű katonai repülőterek strukturális sebezhetősége szinte kizárólag a horizontális széttelepítés proaktív alkalmazásával ellensúlyozható, amely folyamatos helyváltoztatással képes ellehetetleníteni az ellenség valós idejű cél kiválasztását. A cikk bemutatta a közúti bázisokon végrehajtandó ismételt feladatra történő repülőműszaki előkészítés humán és technikai erőforrásigényét. Az elemzés igazolta, hogy a feladat egy optimalizált, minimális logisztikai lábnyommal rendelkező, kis létszámú, de magasan képzett repülőműszaki és támogató állománnyal végrehajtható. Ehhez, javítási feladatok igénye nélkül alapvetően elegendő egy jól strukturált, mobil földi kiszolgáló eszközpark.

²⁴ AMP LMI: *Aircraft Maintenance Publications Line Maintenance Instructions*.

Az eredmények ugyanakkor markánsan rámutatnak a hazai implementáció kritikus feltételeire és jelenlegi korlátaira is. Bár a légi közlekedési jogszabályi háttér alapot nyújt az állami légi járművek repülőtéren kívüli leszállására, a megfelelő fizikai infrastruktúra – azaz a megfelelő dinamikus teherbírású (LCN-értékű), geometriájú és tájolású útszakaszok – tudatos kijelölése és akadálymentesíthető adaptálása a közigazgatási szervekkel történő szoros integrációt igényel. Összességében megállapítható, hogy a JAS 39 repülőgépek kiszolgálásának képessége közúti leszállóhelyeken alapvető nemzetbiztonsági érdek. A tanulmányban felvázolt logisztikai keretrendszer tudományos alapot tud biztosítani egyes képességfejlesztési irányok kijelöléséhez, garantálva a nemzeti légierő túlélőképességét és légi logisztikai képességfejlesztését egy technológiailag fejlett fenyegetésekkel terhelt konfliktus során.

Felhasznált irodalom

- [1] Saab, Gripen – Always Combat Ready. *YouTube*, 2019. március 14. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=QyD0liioY8E>
- [2] J. Csengeri, *A légi bázis mint műveleti képesség komplex vizsgálata, szerepe a légi műveletekben*. PhD-disszertáció, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2019. Online: <https://doi.org/10.17625/NKE.2019.019>
- [3] G. Kotata, „Airbase as Defended Asset for Air Defense”, *Safety and Defense*, 5. évf. 1. sz. pp. 37–45. 2019. Online: <https://doi.org/10.37105/sd.41>
- [4] A. J. Vick, M. Ashby, *Winning the Battle of the Airfields: Seventy Years of RAND Analysis on Air Base Defense and Attack*. RAND Corporation, 2021. <https://doi.org/10.7249/RR4793-1>
- [5] I. Boban, „Requirements of Modern Air Defence”, *Strategos*, 9. évf. 2. sz. pp. 11–36. 2025. <https://doi.org/10.65243/s.9.2.1>
- [6] A. Rurak, K. Goniewicz, „Enhancing Security Measures for Military Air Bases – Integrating Advanced Technologies and Operational Strategies”, *National Security Studies*, 34. évf. 4. sz. pp. 57–75. 2024. <https://doi.org/10.37055/sbn/191446>
- [7] S. Hennel, „Légi járművek repülőtéren kívüli szükségleszállóhelyeinek harcászati korlátai, alkalmazhatósága, kialakulásának körülményei”, *Repüléstudományi Közlemények*, Különszám, 2010.
- [8] J. Pearson et al., „Cost Analysis of Optimized Islanded Energy Systems in a Dispersed Air Base Conflict”, *Energies*, 13. évf. 18. sz. 2020. <https://doi.org/10.3390/en13184677>
- [9] Air Force, „Baana 24 Road Base Exercise in Rovaniemi and Ranua”, *Ilmavoimat*, 2024. augusztus 22. Online: <https://ilmavoimat.fi/en/-/baana-24-road-base-exercise-in-rovaniemi-and-ranua>
- [10] E. Hegedűs, „A JAS 39 Gripen többfeladatú harci repülőgép: Fejlesztés a kezdetektől napjainkig I–II. rész”, *Haditechnika*, 47. évf. sz. pp. 4–5. 2013. Online: http://real-j.mtak.hu/11406/5/HT_2013-5_teljes_red.pdf
- [11] J. Csengeri, „Katonai repülőterek polgári – katonai felhasználás (üzemeltetés) hazai jogszabályi hátterének bemutatása”, *Repüléstudományi Közlemények*, 26. évf. 2. sz. pp. 161–170. 2014. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4608/3764>

- [12] L. Kavas, Gy. Óvári, „A katonai repülőgépek korszerű üzemeltetési eljárásainak elvi alapjai és gyakorlati hozadéka”, *Repüléstudományi Közlemények*, 25. évf. 1. sz. pp. 198–209. 2013. Online: https://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013_1/2013-1-17-Kavas_L-Ovari_Gy.pdf
- [13] I. Kelecsényi, „A JAS-39C/D Gripen repülőgépek fegyverzete és modernizációs lehetőségei I. rész”, *Haditechnika*, 54. évf. 4. sz. pp. 36–40. 2020. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.54.4.08>
- [14] I. Kelecsényi, „A JAS-39C/D Gripen repülőgépek fegyverzete és modernizációs lehetőségei II. rész”, *Haditechnika*, 54. évf. 5. sz. pp. 32–37. 2020. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.54.5.06>
- [15] I. Kelecsényi, „A JAS-39C/D Gripen repülőgépek fegyverzete és modernizációs lehetőségei III. rész”, *Haditechnika*, 55. évf. 1. sz. pp. 35–38. 2021. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.55.1.07>
- [16] A. Tóth, „JAS 39 EBS HU többfeladatú vadászipülőgép”, *Repüléstudományi Közlemények*, 2004. Online: https://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/toth_andras.pdf

Combat Turnaround of the JAS 39 Aircraft of the Hungarian Defence Forces on a Highway Airstrip

The purpose of this publication is to present the logistical support possibilities for the combat turnaround of the JAS 39 Gripen aircraft of the Hungarian Defence Forces on highway airstrips. The study highlights that due to the increasing vulnerability of static airbases, horizontal dispersion has become inevitable, specifically the temporary use of specially designed highway networks for aviation purposes. The research analyses in detail the aircraft maintenance requirements for the ground servicing of a four-ship flight, focusing on a minimal logistical footprint. Furthermore, a primary objective of the article is to emphasise that the development of this strategic capability is not merely an operational issue. For successful and compliant application, it is essential that not only the operations personnel but also the aircraft maintenance and other logistical specialist personnel are involved as early as the site selection and requirements formulation phases.

Keywords: *highway airstrip, horizontal dispersion, aircraft maintenance operations, logistic support, JAS 39*

Juhász Oszvald Viktor, MSc
logisztikai főnök
MH Egészségügyi Központ
juhasz.oszvald@hotmail.com
orcid.org/0009-0001-5595-1925

Oszvald Viktor Juhász, MSc
Chief of Logistics
HDF Medical Center
juhasz.oszvald@hotmail.com
orcid.org/0009-0001-5595-1925

István Papp, László Szilvássy

PL-15(E) Air-to-Air Missile

Between 7 and 10 May 2025, an armed conflict ensued between Pakistan and India, with both parties engaging in substantial aerial bombardment of each other's military infrastructure. It was during this conflict that the Chinese-made PL-15(E) air-to-air missile was reportedly used for the first time in combat. In this article, the authors provide a comprehensive account of the Chinese missile, accompanied by a comparative analysis with other missiles.

Keywords: PL-15(E), air-to-air missile

1. Introduction

Jammu and Kashmir have been a site of ongoing conflict between India and Pakistan since the independence of both countries in 1947. The status of the region was the catalyst for the first Indo-Pakistani War in 1947, which culminated in a ceasefire brokered by the United Nations. Consequently, the region was divided into areas under the control of India and Pakistan. However, both parties consider this arrangement to be provisional. The status of Kashmir was a major contributing factor to the war that broke out between the two sides in 1965 and 1971. However, these wars came to an end with the restoration of the status quo.

The Kargil War, which took place from May to July 1999 in the Kargil district of the disputed Kashmir region along the Line of Control separating the Pakistani and Indian-administered parts of Kashmir, is a significant example of this dynamic. The region of Kargil is now incorporated into the Ladakh Union Territory. The war was fought at high altitude, at approximately 5,000 metres, under extreme conditions. The conflict in question involved two nuclear-military powers engaged in a conventional war against each other. Kargil has frequently been the site of border clashes between the two countries, and the Kargil War was the largest and deadliest such clash. The immediate cause of the conflict was a border incident in which Pakistani soldiers, disguised as Kashmiri rebels, infiltrated Indian territory and attacked military targets. In the early stages of the conflict, the Pakistani government attributed responsibility for the clashes exclusively to local rebels. However, it subsequently acknowledged the involvement of Pakistani soldiers. The Indian armed forces, specifically the army and air force, have demonstrated their capacity to thwart external aggression. In this instance, they have successfully neutralised the threat posed by Pakistani forces, thereby securing the area. Subsequent to mounting pressure from the international community, Pakistan withdrew its remaining troops from Indian territory in July 1999, thereby restoring the status quo ante bellum [1], [2].

2. Four-day conflict in May 2025

Between 7 and 10 May 2025, an armed conflict ensued between Pakistan and India. In this conflict both parties inflicted significant damage on each other's military installations. However, India's military intervention primarily targeted terrorist infrastructure, as indicated by public communications. Following the facilitation of dialogue between the two nuclear-armed states by the United States, both countries realised that continuing their hostility would have consequences – both for themselves and for the region – that would be difficult to predict. Consequently, on 10 May, the armed conflict was brought to a halt in its entirety.

On 22 April 2025, armed individuals discharged firearms at civilians in the contested region of Kashmir, which is under Indian administration. According to the latest police reports, at least 20 people lost their lives in the attack [3]. This event marked the genesis of the four-day conflict, a situation that had been preceded by decades of problems and disputes. The Indian government's reprisal measures were initiated on the night of 7 May.

In a move that was both swift and unexpected, India instigated a robust military offensive against Pakistan in the early hours of Wednesday morning. This response was a direct act of retaliation for the attack that had occurred in Kashmir a fortnight prior. Concerns have been raised that the recent armed conflict between the two nuclear-armed adversaries, which has not been witnessed for over two decades, may potentially result in an escalation into a more extensive war. There is limited open-source confirmation that both parties are resolute in their commitment to pursue novel military acquisitions, whilst concomitantly severing their economic and trade ties to a considerable extent. This text was composed by HVG360 on 7 May 2025 [4].

The Indian retaliatory strikes, designated “Operation Sindoor” were executed on the night of 7 May. The operation targeted nine alleged terrorist strongholds, which were struck by Air Force aircraft. The operation was conducted by units stationed at three air bases. This preliminary categorisation encompassed three distinct types of aircraft; however, subsequent analysis revealed the presence of a fourth category. The launch of the Scalp EG¹ cruise missile against targets in northern Pakistan was conducted from a single air base by Rafale EH aircraft. The cruise missiles were launched from their own designated airspace, situated approximately 100–120 km from the Pakistani border. The Russian-manufactured Su-30MKI fighter jets were observed taking off in formation from the other air base. Furthermore, these aircraft were also observed launching BrahMos-A missiles from a considerable distance, targeting locations in central and southern Pakistan. The third group departed from an air base and conducted its mission in Kashmir itself. The group's composition also included Rafale EH fighter jets, which were equipped with AASM Hammer guided glide bombs. These bombs can be deployed from a distance of 50–70 km from the target. Subsequent revelations indicated that this formation comprised MiG-29 aircraft as well. In addition to these strike formations, Pakistan was also subjected to kamikaze drone attacks; however, these will not be discussed in this paper.

In response to the detected strike formations, the Pakistani Air Force also initiated the deployment of its fighter jets, specifically the Chinese-manufactured JF-17A Block 3 fighter aircraft (Figure 1), which are equipped with Chinese-produced PL-15 radar-guided missiles. The Chinese-manufactured J-10C fighter jets also participated in the operation, which constituted

¹ This weapon is analogous to the Storm Shadow missile in the French military arsenal.

the primary focus of the news reports. Evidence of the use of the PL-15 missile was found in the form of missile debris discovered in Punjab [7], [8]. Further circumstantial evidence for the deployment of the PL-15 missile is provided by the discovery of an intact PL-15E missile in the Hoshiarpur area that failed to detonate by the Indian army. This event presented Indian experts with the opportunity to study the technology of the missile.

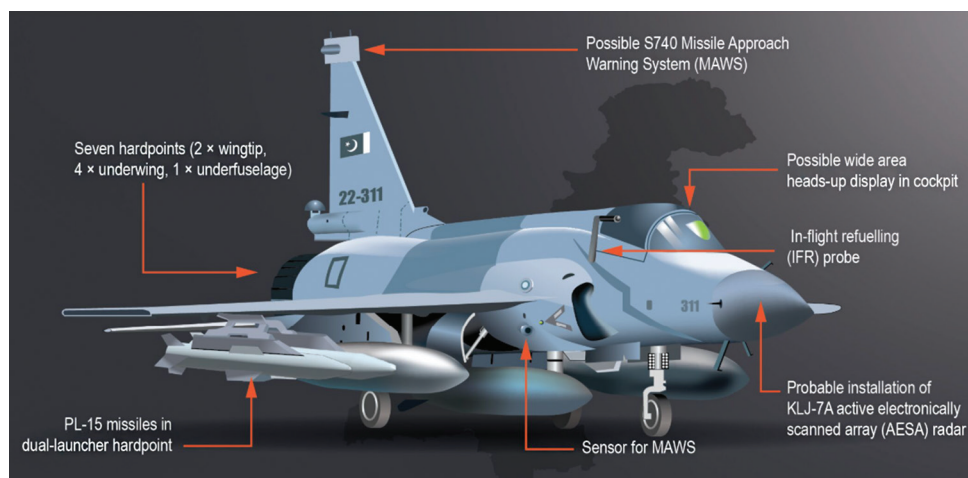


Figure 1.
JF-17 Block III [36]

According to Pakistani claims, five aircraft were destroyed, including three Rafales, one Su-30, and one MiG-29. It appears that India has not formally recognised these losses. On 9 May, an Indian Kashmiri government official acknowledged the loss of at least three aircraft and the hospitalisation of three pilots. The available reports indicate that at least one Rafale aircraft was destroyed, with a high probability of additional aircraft being destroyed as well, including one MiG-29 and one Su-30. The wreckage of these aircraft could be identified.

As reported in the news, it appears that the third strike formation suffered these losses. The probable rationale for this occurrence can be attributed to the necessity for the formation to approach the targets in closer proximity, a consequence of the drop/launch distance of the glide bombs. This strategic manoeuvre enabled the Pakistani aircraft to successfully intercept the Indian aircraft [5], [6]. The hostilities continued for several days. However, the present article will not delve into the intricacies of the conflict, as this would not contribute to a comprehensive understanding of the focal point of the PL-15(E) missile.

In the days following the air battle on 7 May, several claims pertaining to Pakistani losses were published in the Indian media. It was reported that the Pakistani Air Force suffered the loss of one F-16, two JF-17A fighter jets, and one ZDK-03 Karakoram Eagle air surveillance and control aircraft. It appears that neither country has officially corroborated these claims. This is a customary component of information warfare, intended to compensate for losses suffered and to influence public opinion in their respective countries.

It is the considered opinion of the Pakistani Air Force that the J-10C aircraft launched the PL-15(E) missile from 200 km. This would also imply that the Indian Air Force (IAF) miscalculated

the missile's maximum launch range, which was set at 150 kilometres. Consequently, IAF pilots undertook their missions with a false sense of security, as they had been operating under the assumption of this maximum range. The 200 km launch distance would be the second-longest recorded, surpassed in length only by the Su-57 fighter jet of the Russian Air Force, which achieved a launch distance of 217 km when firing an R-37M missile at a Ukrainian Su-27 aircraft [32], [33], [34], [35].

2.1. *The fundamental question*

Prior to the presentation of the PL-15 missile, it is imperative to pose a rather complex question. While we are unable to provide a definitive response, the question may offer some insight into the subject of air combat.

There are several versions of the Rafale combat aircraft:

- Rafale A is a technology demonstration aircraft that first flew in 1986;
- Rafale B is a two-seat version that was constructed for the French Air and Space Force. The production of the vehicle totalled 157 units;
- Rafale C is a single-seat version of the Rafale B, with a production run of 302 units;
- Rafale M is analogous to the Rafale C version, except for the reinforcement of the wing structure and the incorporation of an arresting hook for carrier landings. The total number of units manufactured was 48;
- Rafale N aka Rafale BM is a two-seater version that was designed for the navy. The project did not proceed to series production;
- Rafale R is a variant of the Rafale aircraft that has been specifically adapted for reconnaissance missions. The project did not proceed to series production;
- Rafale DM is a two-seater version that was manufactured for the Egyptian Air Force;
- Rafale EM is a single-seater version that was manufactured for the Egyptian Air Force;
- Rafale DH is a two-seater version that has been manufactured for the Indian Air Force;
- Rafale EH is a single-seater version that has been manufactured for the Indian Air Force;
- Rafale DQ is a two-seater version that was manufactured for the Qatari Air Force;
- Rafale EQ is a single-seater version that was manufactured for the Qatari Air Force;
- Rafale DG is a two-seater version that was manufactured for the Hellenic Air Force;
- Rafale EG is a single-seater version that was manufactured for the Hellenic Air Force;
- and the following early versions: F1 Standard, F2 Standard, F3 Standard, F3-R Standard, F4 Standard, F4.1 Standard, F4.2 Standard and F5 Standard. We will not elaborate further on these [9].

As is evident from the above list, the object was produced in several variants. The primary inquiry concerns to the identification of the equipment installed in the Indian Rafale EH variant. This is of particular significance, as the aircraft may have been equipped with an older radar system, which possesses a detection range that is less extensive than that of a more contemporary system. It appears that the latter option is considerably more expensive. It is imperative to ascertain which air-to-air missile (AAM) integration the Indian customer

requested. For instance, regardless of the sophistication of the aircraft, the employment of an AIM-9L-I1 air-to-air missile on board a modern aircraft does not guarantee a favourable outcome in the event of engagement with an aircraft equipped with an IRIS-T missile. The missile in question belongs to a different generation, with a completely different launch range and targeting capability. The central question pertains to the armament of the aircraft during the mission. Specifically, it is necessary to ascertain whether air-to-air missiles were mounted on the aircraft, or whether it was only equipped with glide bombs. The aforementioned news [9] reports did not address these questions, and it is likely that they did not possess any information regarding the matter [9].

In the absence of this information, it is not possible to state with any degree of certainty that the Rafale, widely regarded as the world's most advanced fighter jet, exhibited substandard performance. In such cases, it is imperative to also examine the level of training of the pilots. A plethora of unanswered questions have emerged in the aftermath of the mid-air collision.

3. PL-15 air-to-air missile

Since the 2000s, China has made significant progress in the field of medium- and long-range air-to-air missiles. In the wake of earlier copies/licenses of the Russian R-27 and R-77, for example, the PL-11 and PL-12, the latest 5th generation, domestically developed PL-15 and PL-12 missiles now feature active radar homing and an operational range of 70–100 km. The integration of these components into the J-10A/B, J-11B, and JF-17 aircraft variants is indicative of their technological sophistication and functional versatility.

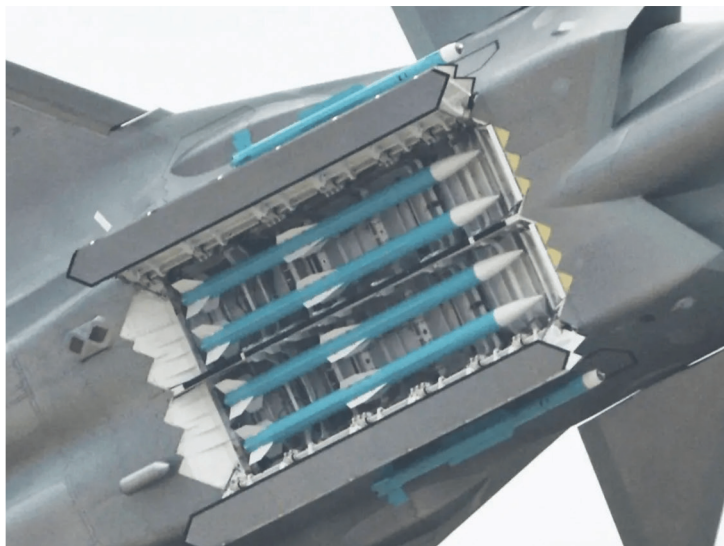


Figure 2.

PL-15 missiles in the internal weapon bay of aircraft J-20 [11]

The PL-15 missile is China's most advanced long-range missile, with integration into the J-11B aircraft commencing after 2015. In 2017, it was integrated into the J-10C and J-16 aircraft and subsequently became the basic air-to-air missile of the J-20. The PL-15 represents a substantial enhancement over its predecessors. Its dimensions are 4.0 m in length, 203 mm in diameter, and its mass is 210 kg. Its range is estimated to be approximately 200 kilometres. The export version, designated PL-15E, has a range that is limited to 145 km. The aircraft employs a dual-pulse solid rocket motor, a design that ensures both high terminal velocity and range. The seeker is an AESA radar. Consequently, the PL-15 offers robust jamming protection and enhanced target acquisition sensitivity. According to Western sources, the PL-15 has a range of more than 200 km, which exceeds that of the AIM-120D, thus prompting the U.S. to commit to developing the AIM-260. It is estimated by Janes that the range of the missile is 300 km. However, this estimate may be slightly higher than the actual range of the missile [13]. It is also possible to integrate the PL-15 into the internal weapon bays of the J-20 aircraft, with a capacity of four. The launch aircraft can be the Chengdu J-20 (which has an internal weapons bay), J-10C, J-16, J-11B/D fighters, and those offered for export, e.g. Pakistan's J-10CE aircraft have also received PL-15E missiles. The upgraded version (possibly PL-15A) may further increase the „No-Escape Zone" through optimisation of the engine and software [10], [11], [37].

3.1. Technical data on the PL-15 air-to-air missile

The subsequent section will present the primary technical characteristics and structural parameters of the PL-15 air-to-air missile:

- Type: BVRAAM – Beyond Visual Range Air-to-Air Missile
- Engine: two-stage solid-fuel rocket engine capable of reaching five times the speed of sound (For more information on rocket engines, see publications [17], [18], [19], [20], [21], [22].)
- Length: 3996 mm
- Diameter: 203 mm
- Mass: ≤ 210 kg
- Operational range:
 - Export version (PL-15E): officially 145 km, but according to some sources it can reach up to 170–180 km;
 - PL-15: over 200 km.
- Guidance system: AESA – Active Electronically Scanned Array, two-way data link during the mid-flight phase and active radar homing during the final phase.
- Warhead: Highly effective, fragmentation warhead. Laser and/or active radar proximity fuse, enabling the warhead to be deployed at the optimum location and time to achieve maximum destructive capability. No specific weight data is available for the warhead, but estimates suggest it may weigh approximately 40 kg [14].

3.2. Integration and platforms

The PL-15(E) missile has been integrated into several Chinese and exported fighter aircraft, including:

- Chinese types: J-10C, J-16, J-20, J-35
- Export versions: JF-17 Block III, J-10CE
- The most recent iteration of the missile, debuted at the 2024 Zhuhai Airshow, incorporates retractable rear fins. This configuration enables the J-20 and J-35 stealth fighters to carry a maximum of six PL-15(E) missiles within their internal weapon bays, representing an augmentation from the previous capacity of four missiles.

3.3. Combat application and analysis

The PL-15E missile was first used in combat in May 2025 during air battles between India and Pakistan. It is highly probable that Pakistan's J-10C fighter jets utilised PL-15E missiles in their engagement with Indian Rafale jets. In the aftermath of the confrontation, fragments of PL-15E missiles were discovered on Indian soil, thereby substantiating their deployment [15].

3.4. PL-15 vs. PL-15E hidden differences

Despite the export version (PL-15E) having an officially limited range of approximately 145 km, it is likely that its actual capabilities extend to 170–180 km, while the Chinese PL-15 variant has a launch range of more than 200 km according to most sources. The primary distinction between these two categories is found in the management of the engine and the optimisation of the flight path. It is hypothesised that the PL-15 variant incorporates more sophisticated combat algorithms and electronics, thereby enabling enhanced target approach accuracy and improved targeting, particularly in a BVR (Beyond Visual Range) environment [11], [13].

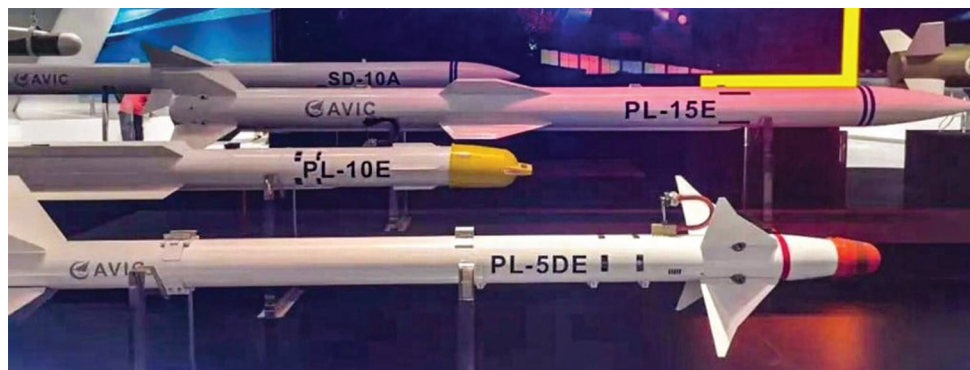


Figure 3.

PL-15E missile (The difference in size between this missile and the PL-5E, which is an AIM-9-sized missile, is clearly visible.) [12], [27]

3.5. Possible further developments

As asserted by the International Institute for Strategic Studies (IISS) [23], the PL-15 missile is undergoing further development. It is acknowledged that the development of a more compact version is underway, with the objective of enhancing its compatibility with aircraft equipped with internal weapon bays. This initiative is being undertaken while maintaining the existing combat and technical specifications.

The article refers to the new missile as the PL-16.

The text also refers to a PL-17 missile, which is reported to have a launch range of 400 kilometres. The article also mentions that this missile may have either active or passive radar. The latter would be a version that can be used against radars, such as the Russian Kh-31 or the U.S.-made AGM-88 HARM (High-speed Anti-Radiation Missile) missile [23].

4. Geopolitical significance

The PL-15E is not merely a technical device; it is also an element of China's geopolitical strategy. By offering modern BVRAAM missiles to countries such as Pakistan, it challenges the dominance of Western arms exports. The PL-15E provides nations without access to Western technology with the opportunity to acquire advanced air superiority capabilities. This is of particular significance in regions where air superiority plays a strategic role, such as the South China Sea, South Asia, and the Middle East.

In the aftermath of the conflict, India declared its intention to procure additional Meteor missiles to augment its existing inventory. Moreover, drawing upon the technological intelligence gleaned from the wreckage of the PL-15E, India has initiated the development of its own Astra Mark 1 missiles. The Astra Mark 2 is projected to have a range of 110 to 160 kilometres [34].

5. Comparisons with similar missiles

In this study, a comparative analysis is conducted on the U.S.-made AIM-120, the Russian R-77 and the European-made Meteor missiles, and the Chinese PL-15(E). The reliability of the comparison is contingent upon the quality of the open-source data.

5.1. AIM-120 AMRAAM (USA)

The development of the AIM-120 (Figure 4) commenced in the 1980s, and the system entered service in 1992 on USAF F-16D fighter aircraft. The product has been produced in numerous variants and continues to be produced to the present day: AIM-120A, -B, -C, -C1–C8, -D, -D1–D3. The A and B variants have now reached the end of their designated life cycle. Despite the absence of precise data, it is evident that the most prevalent variants at present are those

that predate C4. It is important to note that there may be significant differences between the missiles, as the manufacturer is constantly developing them. The range of the AIM-120C series is estimated to be in the range of 100–120 km, while the range of the D version is estimated to be 160–180 km. During the developmental process, the missile underwent a series of modifications, a phenomenon that can be attributed to the significant advancements in electronics, computing technology, and miniaturisation that have occurred since the 1980s. Contemporary iterations of the aircraft are equipped with an AESA seeker and, commencing with the C version, possess a reduced wingspan, thus allowing them to be accommodated within the internal weapon bays of fighter aircraft [24], [25], [26].

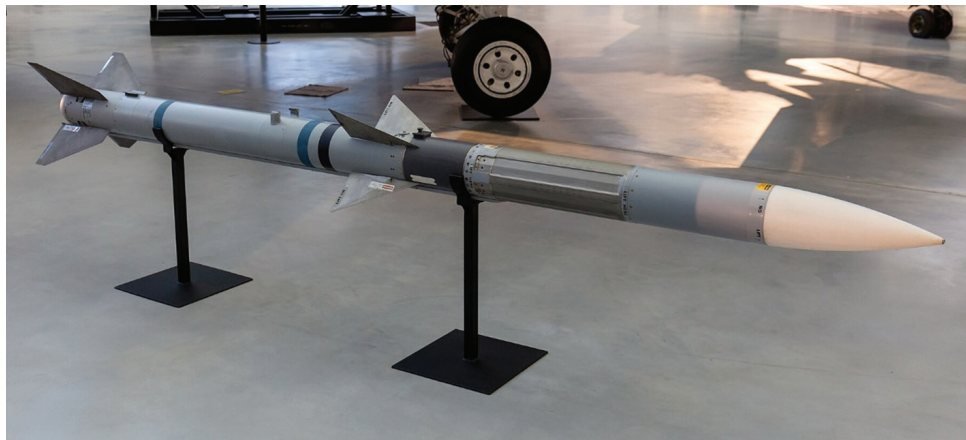


Figure 4.
AIM-120 missile [28]

5.2. Meteor (MBDA METEOR) (Europe)

The initial reports concerning the development of the missile were published in military and aviation periodicals during the early 2000s. The system configuration process was initiated in 2012, and the system has since been implemented in multiple countries. Further information regarding the missile can be found in publication [16].

A distinctive attribute of the missile under consideration is that its second stage of propulsion is constituted by a solid-fuel, controllable ramjet engine, a feature that is discernible from the presence of two air intakes situated in the lower portion of the missile. The principal benefit of this engine is that it preserves the rocket's kinetic energy throughout its flight, thereby resulting in a significantly larger "no escape zone" in comparison to that of analogous rockets. The rocket's seeker is AESA radar (Figure 5) [16].



Figure 5.
Meteor missile [16]

5.3. R-77 (Russia)

The air-to-air missile under discussion was developed by the Russian company Vypel during the 1990s (Figure 6). The aircraft's distinguishing feature is its retractable control surfaces, which draw upon technological advancements in the field of space exploration. The seeker of the rocket is equipped with a AESA radar system.



Figure 6.
R-77 missile [29]

5.4. R-37M (Russia)

The R-37M (Figure 7), developed for aircraft such as the MiG-31BM and Su-35, is currently one of the longest-range operational AAMs. It is estimated that the range of the aircraft is up to 400 kilometres, and its speed is approximately Mach 6. This makes it suitable for intercepting high-value targets, including airborne warning and sniper aircraft. The effectiveness of the system is ensured by its radar seeker and data-link mid-course guidance, which enable it to remain effective despite electronic countermeasures.

Its Russian designation is RVV-BD (Ракета Воздух-Воздух Большой Дальности – Long-Range Air-to-Air Missile). The primary function of the system was to counter aerial refuelling, AWACS, and other types of C4ISTAR (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance) aircraft. The piece was commissioned in 2019. It has been documented that the Su-57 was utilised in the Russo–Ukrainian war, with reports indicating that a Russian Su-57 shot down a Ukrainian Su-27 aircraft from a distance of 217 km [31].



Figure 7.
R-37 (RVV-BD) missile [39]

5.5. AIM-174B Gunslinger (USA)

The AIM-174B (Figure 8) Gunslinger is a very long-range air-to-air missile (AAM) developed by U.S. defence contractor Raytheon and used by the United States Navy (USN) [40].



Figure 8.
F/A-18F with four AIM-174B [40]

5.6. AIM-260 JATM (USA)

The AIM-260 Joint Advanced Tactical Missile is the U.S. response to rapid Asian missile developments. Although details remain classified, its range reportedly surpasses that of the AIM-120D, pushing beyond 200 km. The JATM is designed specifically to counter stealth aircraft and highly manoeuvrable fighters in heavily contested airspace. This is not included in the table because little data is available.

Table 1.
Technical data of missiles [the authors]

Missile type	AIM-120C-5-7	AIM-120D	Meteor	R-77	PL-15E	R-37M	AIM-174B
In service	2003–	2006–	2013–	1994–	2016–	2019–	2021–
Maximum operational range [km]	120	180	200	100	145 200+ (PL-15)	200+	400+
Speed relative to the speed of sound [M]	4	4	4+	4	5+	6	3.5
Length [mm]	3,660	3,660	3,650	3,500	3,996	4,060	4,700
Diameter [mm]	178	178	178	200	203	380	340
Wingspan [mm]	447	447	630	700	–	720	1,570
Mass [kg]	161.5	161.5	185	175	210	510	860
Warhead weight [kg]	20.5	20.5	25	22.5	40	60 ⁵	64
Warhead	HE BF ¹						
Engine	SFR ²		SFR+Ramjet	SFR ²			
Guidance system	INS ³ + update via DataLink + ARH ⁴						INS ³ + ARH ⁴ and SARH ⁶
	¹ HE BF – High explosive blast-fragmentation ² SFR – Solid-Fuel Rocket motor ³ INS – Inertial guidance ⁴ ARH – Active Radar Homing ⁵ conventional or thermonuclear ⁶ SARH – Semi-Active Radar Homing						

References

- [1] Britannica, *Kargil War*. Online: <https://www.britannica.com/event/Kargil-War>
- [2] Wikipedia, *Kargil-háború*. Online: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Kargil-h%C3%A1bor%C3%BA>
- [3] HVG, "Fegyveresek nyitottak tüzet turistákra Kasmírban, több mint húsz halálos áldozat lehet," *HVG*, 22 April 2025. Online: https://hvg.hu/vilag/20250422_Fegyveresek-nyitottak-tuzet-turistakra-Kasmirban-tobb-ember-eletet-vesztette
- [4] HVG360, "Az India és Pakisztán közötti háború egyre közelebbinek tűnik, és mintha mindkét fél, évek óta erre készülne," *HVG*, 7 May 2025. Online: https://hvg.hu/360/20250507_India-Pakisztan-Dzsammu-Kasmir-katonai-konfliktus
- [5] Üveges, H., "Légicsata Kasmír felett | Indiai-pakisztáni konfliktus 2025 1. rész," *YouTube*, 8 May 2025. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=sPRKOaTW63E>
- [6] Üveges, H., "Támadás a pakisztáni repterek ellen | Indiai-pakisztáni konfliktus 2025 2. rész," *YouTube*, 12 May 2025. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=GLYTeMC5nMw>
- [7] H. Davidson, A. Hawkins, "Pakistan's Use of J-10C Jets and Missiles Exposes Potency of Chinese Weaponry," *The Guardian*, 14 May 2025. Online: <https://www.theguardian.com/world/2025/may/14/pakistans-use-of-j-10c-jets-and-missiles-exposes-potency-of-chinese-arms>
- [8] The Times of India, "India-Pak Tension: Fully Intact, Undetonated Chinese PL-15 Missile Found in Punjab's Hoshiarpur," *The Times of India*, 9 May 2025. Online: <https://timesofindia.indiatimes.com/india/fully-intact-undetonated-chinese-pl-15-missile-found-in-punjab-hoshiarpur/articleshow/121021161.cms>
- [9] A. Daolio, "Dassault Rafale," *The Aviationist*, 28 November 2024. Online: <https://theaviationist.com/2024/11/28/dassault-rafale/>
- [10] Wikipedia, *Fázisvezérelt antennarács (ábra)*. Online: https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1zisvez%C3%A9relt_antennar%C3%A1cs
- [11] T. Newdick, "A Guide to China's Increasingly Impressive Air-to-Air Missile Inventory," *The War Zone (TWZ)*, 1 September 2022. Online: <https://www.twz.com/a-guide-to-chinas-increasingly-impressive-air-to-air-missile-inventory>
- [12] Z. Tong, "Indian Jet Shootdown: the All-Robot Legion Behind China's PL-15E Missiles," *South China Morning Post (SCMP)*, 9 May 2025. Online: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3309732/indian-jet-shootdown-all-robot-legion-behind-chinas-pl-15e-missiles>
- [13] A. Kadidal, "Update: Pakistan Shows JF-17 Block III Fitted with PL-15 Missiles for First Time," *JANES*, 5 May 2025. Online: <https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/air/update-pakistan-shows-jf-17-block-iii-fitted-with-pl-15-missiles-for-first-time>
- [14] Army Recognition, "PL-15 Air-to-Air Missile," *Army Recognition*, 15 May 2026. Online: <https://armyrecognition.com/military-products/army/missiles/tactical-missiles/pl-15-air-to-air-missile>
- [15] Ignác, P., "Miért beszél most mindenki a kínaiak hitech vadászrepülőjéről?," *Telex*, 26 May 2025. Online: <https://telex.hu/kulfold/2025/05/26/kina-vadaszgep-j-10c-fegyverexport-pakisztan-india-raketa-legvedelem>
- [16] Szilvássy, L., "Meteor rakéta," in *Repüléstudományi szemelvények*, Szilvássy, L. ed., Szolnok, Nemzeti Közszerkeleti Egyetem Katonai Repülő Intézet, 2018, pp. 119–142. Online: <https://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem-2018.pdf>

- [17] Szilvássy, L., Békési, B., "Repülőfedélzeti rakéták hajtóművei," Bolyai Szemle Fiaatal Tudósok Konferencián elhangzott előadás, Budapest, 2002. Online: <https://drive.google.com/file/d/1kgOJWEiT63S-Kn2DGO6c84SK5mv9zf8/view>
- [18] Szilvássy, L., "A repülőgépfedélzeti rakéták hajtóműveiben alkalmazott hajtóanyagok," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 10, no. 2, pp. 43–50, 1998. Online: https://www.repulestudomany.hu/archiv/RTK_1998_2.pdf
- [19] Szilvássy L., Szabó L., "Rakéták reaktív hajtóművei," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 18, no. 1, pp. 209–216, 2006. Online: https://www.repulestudomany.hu/archiv/RTK_2006_1.pdf
- [20] Szilvássy, L., Békési B., "A katonai repülőgép fedélzeti rakéták hajtóművei," in *The Challenge of Next Millenium on Hungarian Aeronautical Sciences*, J. Rohács et al. eds., 12th Hungarian Days of Aeronautical Sciences Conference, Nyíregyháza, pp. 124–131, Budapest, eR-Group, 1999. Online: https://drive.google.com/file/d/1hz9dFeWQPl8tGGM69_HGpBTP-B0ZsKcV/view
- [21] Szilvássy L., Békési B., "Rakéta hajtóművek," *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 11, no. 1, pp. 263–271, 1999. Online: https://www.repulestudomany.hu/archiv/RTK_1999_1.pdf
- [22] "Rakéta," in *Hadtudományi Lexikon Új kötet*, Krajnc, Z. ed., Budapest, Dialóg Campus, 2019, pp. 911–912. Online: https://nkerepo.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/14688/790_hadtudomanyi_lexikon_2019.pdf;jsessionid=62A70343E09FE53BF05DFC0C3670FAFA?sequence=1
- [23] D. Barrie, "Air-to-Air Missiles Push the Performance, Payload Envelope," International Institute for Strategic Studies (IISS), 29 January 2024. Online: <https://www.iiss.org/online-analysis/military-balance/2024/01/air-to-air-missiles-push-the-performance-payload-envelope/>
- [24] Defence Security Asia, "U.S. to Sell 1,200 AIM-120 (D-3/C-8) AMRAAM Missiles to Japan in \$3.64 Billion Deal," *Defence Security Asia*, 4 January 2025. Online: <https://defencesecurityasia.com/en/u-s-to-sell-1200-aim-120-d-3-c-8-amraam-missiles-to-japan-in-3-64-billion-deal/>
- [25] Wing of Glory, *AIM-120 AMRAAM/AIM-120C-8*. Online: https://wings-of-glory.fandom.com/wiki/AIM-120_AMRAAM/AIM-120C-8
- [26] Wing of Glory, *AIM-120 AMRAAM/AIM-120D*. Online: https://wings-of-glory.fandom.com/wiki/AIM-120_AMRAAM/AIM-120D
- [27] K. Huang, "New Version of China's Most Advanced Air-to-Air Missile the PL-15 is Destined for Export Market," *South China Morning Post (SCMP)*, 30 September 2021. Online: <https://www.scmp.com/news/china/military/article/3150623/new-version-chinas-most-advanced-air-air-missile-pl-15-destined>
- [28] Wikipedia, *AIM-120 AMRAAM*. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/AIM-120_AMRAAM
- [29] Wikipedia, *R-77*. Online: <https://en.wikipedia.org/wiki/R-77>
- [30] Wikipedia, *R-37*. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/R-37_\(missile\)](https://en.wikipedia.org/wiki/R-37_(missile))
- [31] P. Suci, "India Paid the Price for Underestimating China's PL-15 Missiles," *The National Interest*, 6 August 2025. Online: <https://nationalinterest.org/blog/buzz/india-paid-price-underestimating-chinas-pl-15-missiles-ps-080625>
- [32] Team DefenseWatch, "PL-15 Missile's Combat Debut Redefines Air Superiority: Pakistan Deploys China's Long-Range BVRAAM in Live Engagement," *The Defense Watch*, 1 September 2025. Online: <https://thedefensewatch.com/asian-defense-security/pl-15-missiles-combat-debut-redefines-air-superiority/>

- [33] L. Monica, D. Priambodo, "Pakistan-India Conflict Become Testing Ground for China PL-15 Missile," *IDN Financials*, 16 May 2025. Online: <https://www.idnfinancials.com/news/54620/pakistan-india-conflict-become-testing-ground-for-china-pl-15-missile>
- [34] Vladislav V., "Indian Rafale Shot Down by Chinese PL-15 Missile at 200 km Range in May 2025 Battles," *Militarnyi*, 9 January 2026. Online: <https://militarnyi.com/en/news/indian-rafale-shot-down-by-chinese-pl-15-missile-at-200-km-range-in-may-2025-battles/>
- [35] A. Kadidal, "Update: Pakistan Shows JF-17 Block III Fitted with PL-15 Missiles for First Time," *Janes*, 5 May 2025. Online: <https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/air/update-pakistan-shows-jf-17-block-iii-fitted-with-pl-15-missiles-for-first-time>
- [36] Global Security, *PL-15 Air-to-Air Missile*. Online: <https://www.globalsecurity.org/military/world/china/pl-15.htm>
- [37] S. Srivastava, "R-37M to PL-15: Top 7 Air-to-Air Missiles that Can Destroy a Fighter Jet from 300 km Away," *WION*, 24 November 2025. Online: <https://www.wionews.com/photos/r-37m-to-pl-15-top-7-air-to-air-missiles-that-can-destroy-a-fighter-jet-from-300-km-away-1763994767207/1763994767210>
- [38] Rosoboronexport, *RVV-BD*. Online: <https://roe.ru/en/production/aerospace-forces/air-weapons/guided-weapons/air-to-air-guided-missiles/rvv-bd/?theme=theme-lightblue>
- [39] Wikipedia, *R-37 (missile)*. Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/R-37_\(missile\)](https://en.wikipedia.org/wiki/R-37_(missile))

PL-15(E) légiharc-rakéta

2025. május 7. és május 10. között fegyveres konfliktus alakult ki Pakisztán és India között, amelyben mindkét fél komoly csapásokat mért a másik katonai objektumaira. A híradások szerint ebben a konfliktusban alkalmazták először éles bevetésen a kínai gyártású PL-15(E) légiharc-rakétát. A szerzők a cikkben bemutatják a kínai rakétát, és összehasonlítják a hasonló kategóriájú rakétákkal.

Kulcsszavak: PL-15(E), légiharc-rakéta

István Papp Practical Instructor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems papp.istvan@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2929-5864	Papp István gyakorlati oktató Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék papp.istvan@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2929-5864
László Szilvássy, PhD Associate Professor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems szilvassy.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0455-4559	Szilvássy László, PhD egyetemi docens Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék szilvassy.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-0455-4559

Lányi Aladár, Balajti István

Magyar sikerek az űrkutatásban

A Tungsram Hold-radar-mérésektől napjainkig

Minél hatékonyabb részvételünk a világűrrel kapcsolatos gazdasági tevékenységekben a jelen és a közeljövő feladata. A szomszédunkban dúló háború ismét felértékeli a katonai alkalmazásokon alapuló tudományos eredmények hatékony kihasználását. A második világháború alatti magyar rádióelektronika, például rádiócsőgyártás és ezek alkalmazásai, a különböző típusú rádiók, elektromos készülékek és radarok: a SAS, Borbála, Bagoly és Turul kifejlesztése és alkalmazásba vétele a Haditechnikai Intézet (HTI) harcászati-műszaki követelményei alapján készültek. Minden műszaki eredményünk alapja a világszínvonal feletti középiskolai és egyetemi oktatásunk szellemi potenciálja, amelyet az 1920-as években Klebelsberg Kunó alapozott meg. A mérnöki kreativitást, úgy mint 80 évvel ezelőtt, nagymértékben determinálja a magyar nyelvi környezet és a tématerülettel kapcsolatban elért történelmi eredményeink. Ezek értékelésével feltárható és valószínűsíthető elődjeink ipari és műszaki háttere, milyen irányokban voltak eredményesek, és ezt a nemzetközi környezet hogyan fogadta. Mivel a Bay Zoltán vezette Tungsram Hold-radar-mérések mérőföldkövet jelentenek ebben a folyamatban, áttekintjük az akkori és a közelmúlt sikereinek űrkutatással kapcsolatos részeit, kiemelve a napjainknak szóló üzeneteket.

Kulcsszavak: Bay Zoltán, Tungsram, Hold-radar, űrkutatás, műholdak, magyar űrhajósok

1. Bevezetés

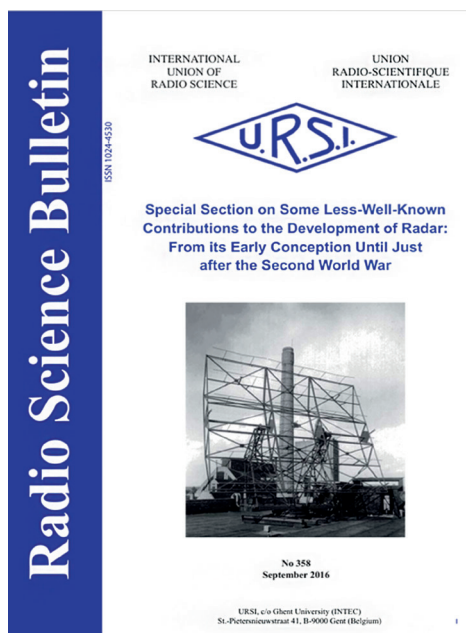
A szerzők több mint 45 éve foglalkoznak a legmodernebb haditechnikai eszközök, K + F + I-feladatok és -projektek kockázatfelmérésével, vezetésével, valamint az elmúlt 20 évben a szenzorok *in situ* performanciavizsgálatainak kidolgozásával és végrehajtásával. Ez a műszaki és tudományos háttér és érdeklődési kör inspirálta a tanulmány kidolgozását. Napjainkban már tény, hogy a Tungsram Hold-radar-méréseknek a magyar műszaki színvonal elismerésén túl komoly társadalomélénkítő jelentősége volt a második világháború utáni időkből.

Napjainkban paradigmaváltás figyelhető meg a műszaki tudományok területén, mivel a környezetünket figyelő, értékelő természetes érzékszerveink lehetőségei a teljes érzékelési spektrumban, beleértve a teljes elektromágneses tartományt, nagyságrendekkel kiteljesedik. A beérkező nagy mennyiségű adathalmazok kiértékelését és a döntéshozatalt mesterséges intelligencia (MI) „gépi tanulás” és „mélytanulás” elven üzemelő algoritmusok segítik. A döntés végrehajtásához szükséges komplex és összehangolt fizikai folyamatok hatékony végrehajtása szintén megoldhatatlan ezek alkalmazása nélkül. A 80 éve végrehajtott mérések jelentősége éppen abban áll, hogy rámutat az időközben bekövetkezett műszaki fejlődés és társadalmi

elvárások közötti összefüggésekre. Tény, hogy az akkori és a mai mérnökök, tudósok szellemi színvonala, kognitív képességei hasonlóak, így csak a társadalmi változásokban és a műszaki technológiák fejlődésében beállt változásokat kell áttekintenünk. A magyar társadalom számára, beleértve az oktatást, ki kell emelnünk a magyar nyelvi környezetnek a mérnöki gondolkodásra gyakorolt hatását, amely eltér minden más európai nyelvtől, ezért, különösen nemzetközi szinten, jelentős „értvényesülést” befolyásoló tényező. Ismert, hogy a magyar nyelvi környezet átfogó jellege, és a „felülről lefelé” építkezési struktúra miatt, ellentétben például az olasz és a francia nyelvvel, amelyek a legkisebb egységből indulnak ki és felfelé bővülnek, olyan tulajdonságokat mutat, amelyek ösztönzik a műszaki gondolkodást. A gondolkozásmódban jelentkező különbségekre mutatnak rá például a *Brainstorming* és a *Configuration Control* mérnöki tevékenységekben jelentkező értelmezési különbségek.

Kleblsberg Kunó (1875–1932) kultuszminiszter alapvető hatással volt a magyarországi mérnöki képzés színvonalára, amikor az 1920-as években rendkívül magas szintű oktatási követelményeket írt elő és hajtattott végre. Víziója túlmutatott az elit képzésén, célja az egész nemzet oktatása és az oktatási rendszer fejlesztése volt. Ebben az időszakban lett alapvető matematikai követelmény a differenciál- és integrálszámítás tanítása a középiskolákban. Az oktatás magas színvonalának is köszönhető, hogy a magyar rádióelektronika, a rádiógyártás a világ élvonalába került [1], [2].

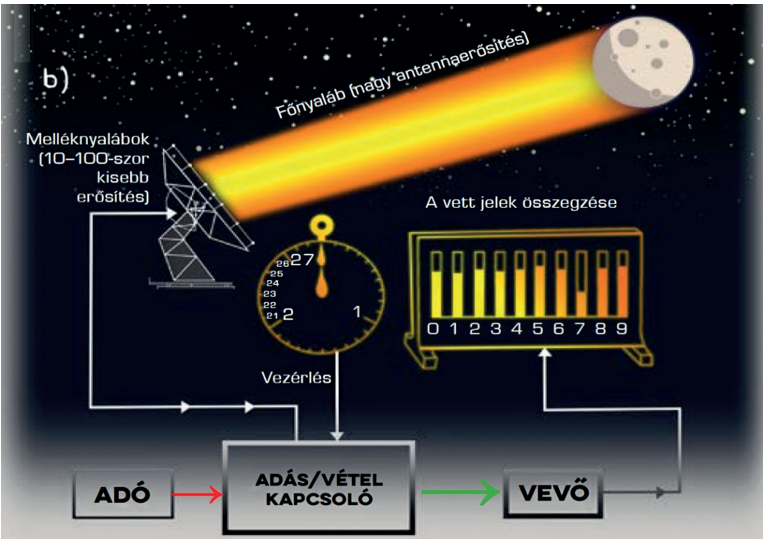
A társadalmi elvárások ismeretében megállapítható, hogy napjainkban is aktuális és nemzetközi szinten erősítésre váró lehetőség, egyben kötelességünk a különböző műszaki szakterületek ápolásában nevet szerzett tudósaink emlékének ápolása. Az első jelentősebb megemlékezés a Bay Zoltán vezette Tunggram Hold-radar-mérésekről a Haditechnikai Intézetben történt 2000-ben. Egy VHF-sávban üzemelő P-18 távolfelderítő radarral megismételték a méréseket [3]. Ezt követte a 70. évforduló alkalmából angol nyelven készített, a műszaki kihívásokat részletesen összefoglaló és értékelő tanulmány, amelyet a [4]-ben hivatkozott szakfolyóiratban publikáltak (1. ábra). Ennek kapcsán kiemelendő, hogy a magyar rádiótechnika sikeres fejlődéséhez jelentős mértékben hozzájárult a Királyi Magyar Haditechnikai Intézet (HTI), amelyet 1920-ban titokban hoztak létre [5], és amelynek létezésére csupán az általa kibocsátott feladatokból lehet következtetni. Az intézetben első lépésként az elektronikai laboratórium kezdte meg tevékenységét: feladatai közé tartozott a csapatok közötti kommunikáció kiépítése, az elméleti problémák és gyakorlati lehetőségek harmonizálása, valamint a vezetékes és vezeték nélküli kommunikációs rendszerek komponenseinek megtervezése és gyártásba állítása. A második világháborús radarok gyártásának előkészítése érdekében Jáky ezredes – aki ekkor még a HTI osztályvezetője, később pedig kormánybiztos volt – három fejlesztői csoportot hozott létre. Dr. Jáky József (1897–1945) vezetésével a HTI kidolgozta a magyar katonai radarok alkalmazási és műszaki követelményeit, amelyek alapján megszületett a Sas nagy hatótávolságú légtérelenőrző és felderítő radar, a Borbála tűzvezető radar, a Bagoly vadászirányító radar, valamint a Turul repülőgép-fedélzeti radar. A fejlesztések tudományos megalapozásáért felelős csoport Dr. Bay Zoltán professzor (1900–1992) vezetésével működött a Tunggram Rt.-nél. Bay Zoltán 1944 márciusában javaslatot tett a Hold-radar-mérések végrehajtására, amelyet Jáky – a radarügyek kormánybiztosaként – támogatott, és amelyet a német megszállás időszakában végre is hajtottak. Istvánffy Edvin Imre (1895–1967) a Standard vállalat főmérnökéként a magyar radargyártás műszaki felelőse lett.



1. ábra

Magyar Tungsram Hold-radar képe a folyóirat címlapján [4]

A háború utáni győztes államok Magyarországon tevékenykedő nemzetközi vizsgálóbizottsága kezdetben nem tartotta hihetőnek, hogy Bay Zoltán negyven mérnök és tudós közreműködésével 1944 nyarán és kora őszén a Pilisben Hold-radar-méréseket folytathatott. Ennek oka az volt, hogy a háború végső szakaszában sehol a világon nem akadt példa hasonló kísérletre, így Magyarország esetében sem tűnt valószínűnek, hogy sürgető katonai fejlesztések helyett ilyen jellegű kutatásokat folytassanak, különösen a szakképzett mérnökök hiányának időszakában. Külön figyelemre méltó, hogy Bay Zoltán csapata ekkor még nem ért el áttörést a Holdról visszaverődő jelek „visszhangok” detektálásában. Ugyanakkor a későbbi mérések szempontjából olyan meghatározó jelentőségű elméleti és gyakorlati megállapításokat dolgoztak ki, amelyek jelentősen lerövidítették a későbbi megvalósítás időigényét. Komoly műszaki kihívást jelentett a Hold közel 400 000 km-es távolsága, mivel a kisugárzott mikrohullámú jelek teljesítménye – a radaregyenlet már akkor is ismert törvényszerűségei szerint – a távolság negyedik hatványával arányosan csökken [6]. Ezt a távolságot az elektromágneses hullámok (EMH) megközelítőleg 2,5 s alatt teszik meg oda- és visszaút során. Mintegy 80 évvel ezelőtt még csupán feltételezés volt, hogy a Földről kisugárzott mikrohullámú jelek kijutnak a világűrbe, majd a radarimpulzusok visszaverődnek a Hold felszínéről, és a rendkívül legyengült visszhangjelek ismét eléri a földi vevőantennát. A 2. ábra a Tungsram Hold-radar működési elvét szemlélteti. A radartechnológiában jól ismert alrendszerek mellett kiemelkedő a hidrogén-kulométer, amely a világ első radarjelösszegző (kumuláló) berendezése volt, és amelyet a Hold távolságának kimutatására alkalmaztak.



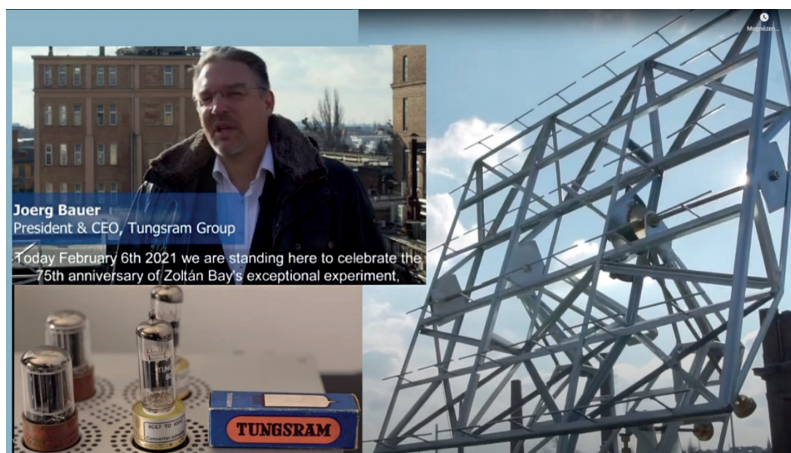
2. ábra
A Bay-Tungstam Hold-radar működési elve [6]

A történelmi hűség megköveteli annak megemlítését, hogy a második világháborúból győztesként kikerült Egyesült Államok radarmérnökei hasonló munkahipotézis alapján kezdték meg kutatásaikat, és a Diana-projekt keretében 1946. január 10-én radarjel-visszaverődéseket detektáltak a Hold felszínéről [7]. Szintén figyelemre méltó, a Hold-radar-visszhang detektálásához kapcsolódó esemény, hogy az első Föld-Hold-Föld (EME) visszaverődéseket valószínűleg a német, igen nagy hatótávolságú Würzmann radar észlelte 564 MHz-es frekvencián 1944 őszén. Számukra ez feltehetően csupán ritkán jelentkező, a céltárgyak detektálását zavaró interferenciajelenséggként mutatkozott meg [8]. Az 1. táblázat összefoglalja azon radarberendezések főbb jellemzőit, amelyek a Hold felszínéről visszaverődött elektromágneses hullámok detektálásával megalapozták a radarcillagászat kialakulását.

1. táblázat
Az első, a Hold felszínéről visszaverődést detektáló radarok főbb paraméterei [a szerzők]

	Hold-radar USA	Hold-radar Magyar	Hold-radar HTI/2000	Würzmann Németország	Megjegyzés
Üzemi frekvencia	111 MHz	121 MHz	155 MHz	564 MHz	A HTI megemlékező mérések
Antennatípus	8 × 8 dipól	6 × 6 dipól	2 × 8 dipól Yagi antenna	8 × 10 dipól fázis antenna	Félhullámú szim- metrikus táplálás
Adóteljesít- mény	50 kW/250 μs	10 kW/60 μs	200 kW/6 μs	120 kW/1,5 μs	Impulzus
Eredmény- indikáció	Távolságmérés A-csővön-hang- jelzés	Kémiai kijelzés- kulométer	Digitális kijelző	A-szkóp kijelzés	Hold-távolság
„Alap” radar	SCR-271	SAS	P-18 M	DMG4k „Michael”	Légtérelenőrző

Az 1946. február 6-i események 75. évfordulójáról a Tungsram elnöke és vezérigazgatója, Joerg Bauer is megemlékezett [9]. A 3. ábrán látható montázs ezt az eseményt örökíti meg, bemutatva az eredeti radarantenna Tungsram által készített replikáját. Ebből az alkalomból készült el az a tanulmány is, amely áttekinti a Tungsram Hold-radar-méréseit, valamint a magyar űrtevékenység főbb szereplőit, projektjeit, sikereit és eredményeit a kezdetektől napjainkig [10].



3. ábra

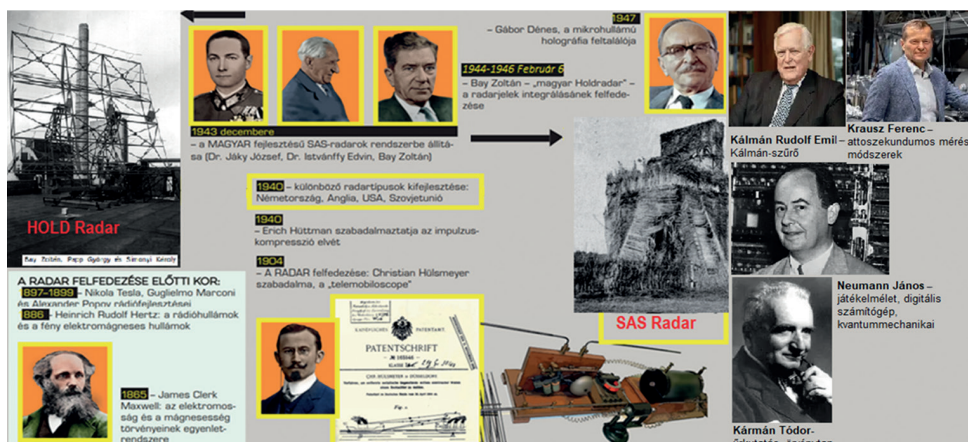
Tungsram rádiócsövek és a rekonstruált Hold-radar-antenna (a szerzők [10] felhasználásával)

A 4. ábra a radartechnológia fejlődéséhez jelentősen hozzájáruló magyar mérnökök és tudósok legismertebbjére emlékezik. Számunkra ez fontos, mivel napjainkban az ötven év alatti tudósok bár használják eredményeiket, nem ismerik azok eredetét. Az említetteken kívül ki kell emelni az alábbi magyar tudósokat is.

Gábor Dénes (1900–1971): *mikrohullámú holográfia*, amely a német egyetemeken szerzett vákuumtechnikai és elektronoptikai ismeretein alapult, és a British Thomson-Houston (BTH) vállalat kutatólaboratóriumában az elektronmikroszkópok fejlesztése során teljessé vált ki. 1947-ben támadt az az úttörő ötlete, hogy egy koherens háttérhullámot (referenciahullámot) használjon az objektumról érkező fénycsugarak térhatású, 3D-értékelésére [11].

Kármán Tódor (1881–1963): *örvénytan, aerodinamika*, az USA első szuperszonikus szélcsatornájának létrehozója. Áramlástechnikai kutatásának eredményei alapozták meg a nagy sebességű szuperszonikus repülőgépek és a jobb hatásfokkal működő rakétahajtóművek megépítését. Róla nevezték el az űr és a légkör határát jelentő elméleti magasság vonalát Kármán-vonalnak (földfelszín feletti 60 mérföld, körülbelül 100 km magasság). Kármán azért választotta ezt a határvonalat, mert ebben a magasságban az elméleti aerodinamikai felhajtóerő létrejöttéhez szükséges sebesség megegyezik a keringési sebességgel [12].

Kálmán Rudolf Emil (1930–2016): *Kálmán-szűrő*. Fő kutatási területe a folyamatirányítás- és szabályozáselmélet, az operációkutatás, azaz a műszaki műveletek vezérléséért, ellenőrzéséért és szabályozásáért felelős irányítórendszerek matematikai szempontú algoritmizálása, matematikai módszerek alkalmazása a sztochasztikus rendszerek elemzésében és fejlesztésében [13].



4. ábra

A radar technológia fejlesztésében részt vevő magyar tudósok [a szerzők]

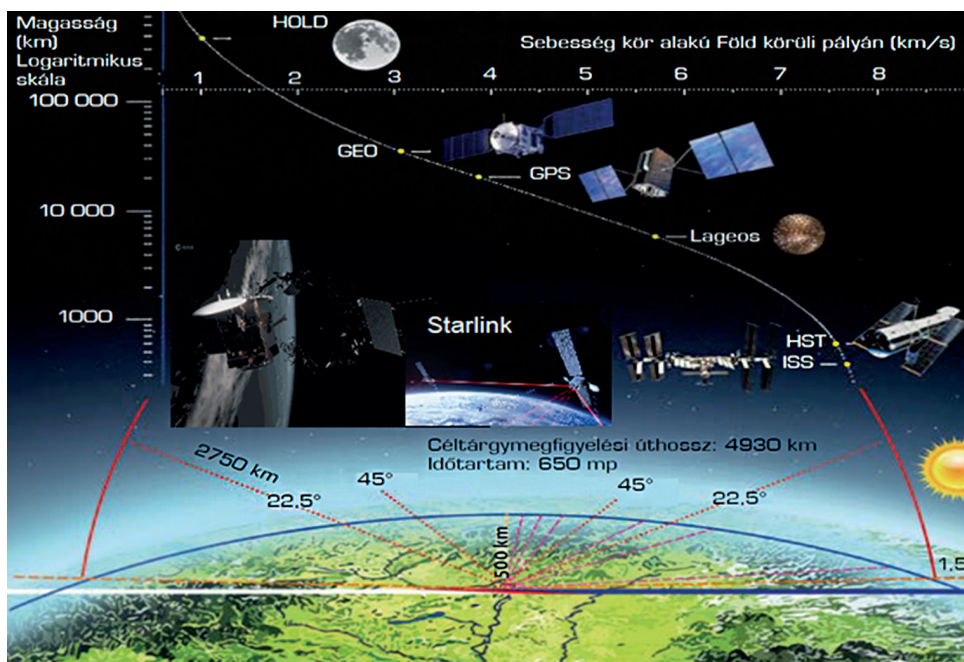
Neumann János (1903–1957) matematikus, fizikus, a digitális számítógép-architektúra megalkotója. Kidolgozta a számítógépek működésének alapjául szolgáló programozási és szervezési elveket, valamint megalkotta a gépi kódú utasításrendszer koncepcióját. Nevéhez fűződik a tárolt program elvén működő számítógép-architektúra kialakítása, amely ma is a számítógépek működésének alapját képezi [14].

Munkássága a játékelmélet megalapozására is kiterjedt, amely a gazdaságtudományban és a haditechnikai döntéshozatalban egyaránt meghatározó jelentőségű. Az első elektronikus számítógépeket többek között a ballisztikus lövedékek röppályájának számítására alkalmazták, ami közvetlen kapcsolatot teremtett a haditechnikai fejlesztésekkel.

A mai számítógépek működési elvei alapvetően a Neumann János által lefektetett architektúrális és programozási koncepciókon nyugszanak.

Krausz Ferenc (1962–): *attoszekundumos mérési módszerek*. A csapata által bemutatott femtoszekundumos impulzusok hullámformájának szabályozása és az így kapott reprodukálható attoszekundumos impulzusok lehetővé teszik az attoszekundumos mérés technika megalapozását, amely ma a kísérleti attoszekundumos fizika technológiai alapjául szolgál. A mérnöki tudományok területén legalább két nagyságrenddel tovább növeli a koherens jelfeldolgozás, az interferometria, a mikrohullámú holográfia és polarimetria elvén megvalósítható mérések pontosságát [15].

Az 5. ábra a Kárpát-medence feletti világűrben található eszközöket, berendezéseket helyzetét mutatja egészen a Holdig. Szemlélteti a Budapest központból megfigyelhető fontosabb űreszközök áthaladási szögeit, idejét, az alacsony műholdpályák néhány jellemzőjét. Érdekes megfigyelni az alacsony műholdpályán egyre növekvő űrszemét mennyiségét, mivel napjainkban már több mint 40 000, 10 cm-nél nagyobb darab veszélyezteti az emberiség gazdasági és tudományos tevékenységeit, például a napjainkban gyorsan kiépülő műholdas Starlink-rendszert. Tény, hogy jelenleg a világűr gazdasági jelentősége gyorsan nő, és elérte, vagy néhány éven belül eléri, a Hold felszínén található tudományos és ipari méretű bányászati lehetőségek gazdaságos kiaknázási szintjét. Ezek tudományos, ipari és katonai jelentősége a magyar szellemi kapacitások kihasználhatósága szempontjából jelentős értéket képvisel.



5. ábra

Rádiótechnológiai eszközök, radarok a Kárpát-medence feletti világűrben [a szerzők]

2. Részvételünk a német rakétakutatásban

A magyar tudósok részvétele az űrkutatásban már a Szputnyikok 1957-es fellövése előtt megkezdődött. Fontosnak tartjuk felhívni a figyelmet egy kevésbé ismert tényre: a német rakétakutatás – amely a háborús felkészülés során rakétafegyver-kísérletek formájában bontakozott ki – eredményeként az első, ember alkotta eszköz (rakétarendszer), amely elérte a világűr határát, a Wernher von Braun (1912–1977) által fejlesztett V-2 harci rakéta volt. A német tüzérség által 1944–45-ben bevetett több mint 3000 db V-2 rakéta jellemzően ballisztikus pályán repült, és röppályája során rendszerint 80–88 km közötti csúcsmagasságot ért el. A V-2 rakéta tervezése során felhasználták Borbély Samu magyar mérnök-matematikusi tudományos munkáinak eredményeit [16].

2.1. Borbély Samu munkássága

Borbély Samu (1907–1984) a Berlin-Charlottenburgi Műszaki Egyetem Általános Tudományok Karán 1933-ban szerzett mérnök-matematikusi oklevelet, majd 1938-ban ugyanott, Rothe professzor irányításával, mérnök-doktori (Dr.-Ing.) tudományos címet. 1933 és 1941 között a berlini Repüléselméleti Intézet tudományos munkatársaként tevékenykedett. Itt végzett kutatásai eredményeként jelent meg „Bombapályák pontballisztikai közelítő meghatározása”

című tanulmánya. Szintén ebben az időben végzett aerodinamikai kutatásai alapján a turbina- és szivattyúlapátok lapátprofiljait komplexfüggvénytani transzformációs modellezéssel tervezte és méretezte. Az előbb említett ballisztikai tanulmány eredményeit felhasználva végezték a német mérnökök a V-2 rakéta testének olyan geometriai kialakítását, amely szuperszonikus sebességtartományban is stabil repülést tett lehetővé. 1941-ben Borbély Samu személyesen tervezte meg a V-2 rakétában alkalmazott gőzturbinát és az általa hajtott üzemanyag- és folyékonyoxigén-szivattyút, beleértve azok lapátprofiljainak kialakítását [16].



6. ábra
Dr. Borbély Samu a munkaasztalánál [17]

2.2. Űrkutatás Rákosligeten

Kevesen gondolnák, hogy Rákosliget a világűr kutatásának kezdeti időszakában meghatározó szerepet játszott Horváth Tibor tevékenysége révén, aki Bay Zoltán munkatársaként részt vett a Hold-radar-kísérletben. Horváth Tibort a Bay Zoltán vezette sikeres Hold-radar-kísérlet ösztönözte arra, hogy a jelentős technikai és anyagi nehézségek ellenére saját kertjében építse meg Magyarország „első műhold- és űrrakéta-követő állomását”. Az állomás a TIT Asztronautikai Bizottság (AB) keretében működött, amelynek Horváth Tibor alapító tagja volt. 1956-ban megindult az űrhajózási ismeretterjesztés, és Rákosligeten létrejött az első magyar műhold- és űrrakéta-követő állomás [17].

A Szputnyik-1 fellövése után Horváth Tibor és amatőr rádiós csapata észlelni tudta a műhold jellegzetes *bip-bip* rádiójeleit. A vett rádiójeleket Horvai Ferenc mérnök által az NSZK-ból hazahozott magnetofonnal rögzítették. A rákosligeti felvételt a Magyar Rádió több alkalommal is sugározta. A rákosligeti műholdkövető rádióállomás antennáját Lányi Aladár, e cikk társszerzője, személyesen is látta rákosligeti sétái során. Többször megfigyelték a Horváth Tibor kertjében felállított, 18 m magas, forgatható és irányítható antennát. A rádióállomás nemcsak a Szputnyik-1, -2 és -3 egyszerű jeleit vette, hanem a Luna holdszondasorozat és az összes ezt követő szovjet műholdak telemetriai és kommunikációs adatait is. A rögzített adatokat és felvételeket további feldolgozás céljából továbbították az illetékes szakemberek részére [17].



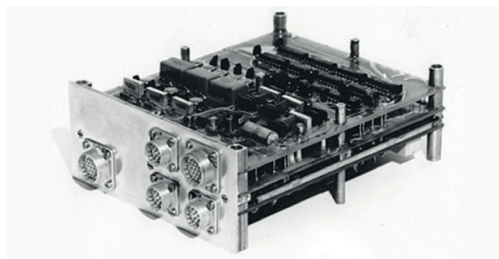
7. ábra

Szputnyik-figyelő antenna felállítása Rákosligeten Horváth Tibor kertjében [17]

3. Az Interkozmosz magyar eredményei

3.1. Magyar fejlesztésű és gyártású eszközök

1967-ben jött létre a szocialista országok űrtevékenységét összehangoló Interkozmosz szervezet. Magyarország alapító tagként vett részt, hazánkat Kónya Albert (1917–1988), a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) fizikaprofesszora képviselte. Az első egyeztetések során Magyarország vállalta, hogy az Interkozmosz program keretében indított kutatórakéták fedélzeti rendszereihez saját fejlesztésű eszközöket készít. A kezdeti fejlesztések a rakéták műszerrendszereinek tápegységeire, valamint egyes fedélzeti megfigyelőrendszerek érzékelőire irányultak. A szükséges szakmai és kutatói háttérrel a Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) kutatóintézeteti biztosították. A KFKI Reaktor főosztály Mérésautomatizálási osztályán belül létrehozták az Űrelektronikai csoportot, amely a fejlesztési feladatok koordinálását és végrehajtását végezte. Beszerezték az űreszközök, műszerek bevizsgálására alkalmas klímakamrát és rázópadot is. A kozmikus eszközök vizsgálati követelményeit a szovjet fél biztosította az általuk alkalmazott szabványok – például a Moroz előírási rendszer – átadásával. Az első magyar fejlesztésű berendezések a Vertikál nevű kutatórakéták fedélzetén jelentek meg. Ezek a rakéták nem álltak Föld körüli keringési pályára, hanem ballisztikus röppályán érték el a kozmikus magasságot, majd külön fékezőrendszer alkalmazása nélkül visszatértek a légkörbe, illetve a Föld felszínére. A későbbiekben az Interkozmosz program keretében indított kutatóeszközök esetében a magyar fejlesztésű és gyártású berendezéseket már orbitális pályán keringő műholdakra építették. Első alkalommal az 1972. április 4-én felbocsátott Interkozmosz-6 műhold fedélzetén működött magyar fejlesztésű és gyártású berendezés, egy mikrometeorit-gyűjtő és -elemző rendszer. 1974. október 31-én, helyi idő szerint 13 órakor indították űtnak az Interkozmosz-12 műholdat, amelyen a K-1-3 jelű elektronikai egység szintén magyar tervezésű és gyártású volt [18].



8. ábra

A mikrometeorit-detektor K-1-3 jelű magyar elektronikájának szerkezete [MTA AEKI]

Az Apáthy István (1945–) vezette Űrelektronikai csoport az 1977-ben felbocsátott Prognóz–7 műhold komplex plazmadetektorához az adatok előzetes kiértékelését végző elektronikai egység megtervezésével és elkészítésével járult hozzá. Ez volt az első olyan berendezés az Interkozmosz program történetében, amelyben mikroprocesszort alkalmaztak az elsődleges, fedélzeti adatfeldolgozás céljára. A KFKI kezdeményezésére Magyarország részt vállalt egy széles körű nemzetközi űrprogramban is, amelynek célja a Halley-üstökös 1986. évi visszatérésének megfigyelése volt űrszondák alkalmazásával. A Halley-üstököshöz a földközelsége idején indított szovjet Vega-szondák fedélzetén számos magyar fejlesztésű berendezés kapott helyet, többek között az űreszköz kameráját pozicionáló elektronika, egy adatgyűjtő berendezés, valamint több sugárzást mérő detektor. A KFKI és a BME együttműködésében született Vega-műszerek határidőre elkészültek, és a bolygóközi térben is sikeresen működtek. Magyarország ezzel az első kelet-európai országgá vált, amelynek műszerei bolygóközi küldetés keretében jutottak el az űrbe [18].

A sikeres programok eredményeként a magyar űrkutatókat több bolygóközi szonda – például a Fobosz-program – fedélzeti berendezéseinek kidolgozásába és megvalósításába is meghívták. A sokoldalú nemzetközi műszercomagon belül elsősorban a plazmakörnyezet vizsgálatára szolgáló magyar fejlesztésű berendezések kerültek pályára. A legjelentősebb magyar hozzájárulás a Fobosz leszállóegység nagy megbízhatóságú és hibatűrő fedélzeti számítógépe volt. Ez a berendezés azonban az űrszondával való kapcsolat idő előtti megszakadása miatt nem tudta teljeskörűen végrehajtani feladatát. A KFKI részvételével készült két fedélzeti részecskedetektor, amely számos jelentős, új tudományos eredményt szolgáltatott a Mars környezetéről. A megszerzett tapasztalatok a későbbi missziók során hasznosultak, és megalapozták a hazai űrkutatás tudományos és ipari tevékenységének további kibontakozását [18].

A magyar űrkutatás talán legsikeresebb eszköze a Pille dózismérő, amelynek története az 1970-es évek végére nyúlik vissza. A KFKI mérnökei Farkas Bertalan (1949–) űrrepülésére készítették el a Pille első változatát. Az eszközt az első magyar űrhajós 1980 májusában, a Szaljut-6 űrállomás fedélzetén használta. A berendezés jelentősége abban rejlett, hogy korábban az űrhajósok szervezetét érő sugárdózist csak a Földre való visszatérést követően lehetett meghatározni. A korábbi adatkinyerő eszközök mérete és tömege nem tették lehetővé használatukat az űrben. A kis méretű, kis energiaigényű és mindössze 1 kg tömegű Pille ezzel szemben lehetővé tette a sugárdózis helyszíni, az űrrepülés alatti ismételt mérését is. A műszert később a Szaljut-7, majd a Mir űrállomás fedélzetén is alkalmazták. Az 1990-es évek elején a Pille továbbfejlesztett változata is elkészült, amely már mikroprocesszoros kivitelben került fel a Mir űrállomásra [18].



9. ábra
Pille dózismérő rendszer [MTA AEKI]

Az Apáthy István vezette fejlesztőcsoport által továbbfejlesztett Pille dózismérőt 2001-ben amerikai közreműködéssel juttatták fel a Nemzetközi Űrállomásra (ISS) tudományos kutatási célokra. A berendezést az egyik űrturista, a magyar származású Charles Simonyi is használta küldetése során. A Pille dózismérőt az ISS fedélzetén – elsősorban az orosz szektorban – megbízhatósága miatt mind a mai napig alkalmazzák [19].

A Balaton nevű műszert a munkavégző képesség mérésére Remes Péter (1941–) repülőorvos elméleti kutatásai alapján fejlesztette ki a Medicor. A műszert „Balaton № 3. Medicor Budapest” feliratú bőrtokban, majd fehér alumíniumdobozba csomagolva juttatták fel a Szaljut-6 űrállomás fedélzetére. Később a Szaljut-7 űrállomáson is alkalmazták. A fedélzeti kísérletet elsőként Valerij Nyikolajevics Kubaszov (1935–2014) hajtotta végre. Kubaszov a könyvében így írja le a berendezést: „Külsőre egy hordozható számológéphez hasonlított, melynek kijelzőjén számok és betűk jelentek meg. Ezekre kellett reagálnunk a megfelelő gombok lenyomásával. Sokféle programot teljesítettünk az egyszerűbb feladatoktól a bonyolultabbakig. Ezenkívül fülhallgatón keresztül a műszer morzehangokhoz hasonló rövid és hosszú jeleket sugárzott, amelyeket össze kellett számolnunk.” A Balaton alkalmazásának nem csupán a kozmonauták körében volt jelentősége, alkalmazták a pilóták fáradtságának ellenőrzésében, valamint a közlekedés számos területén, ahol a diszpécserok, operátorok és irányítópultoknál dolgozók csökkent munkaképessége potenciálisan veszélyhelyzeteket idézhet elő. Mindez azért lehetséges, mert a berendezés rövid idő alatt képes a pszichomotoros paraméterek és a munkavégző képesség objektív értékelésére. A Balaton műszer további sajátossága, hogy az űrhajósok feladatvégzése során kifejtett mentális és fizikai terhelés mértékéről is információt szolgáltatott [20].



10. ábra
A Balaton műszer és használata a Szaljut-6 fedélzetén [20]

A Miskolci Egyetem Anyagtudományi Intézetében Roósz András (1945–) akadémikus vezetésével fejlesztett űrkohó egy mikrogravitációs körülmények között működő, univerzális, sokzónás kristályosító berendezés volt [21]. A kristályosító kemencét 1995-ben a NASA Marshall űrközpontjában is eredményesen tesztelték, később további 3 példányt rendeltek belőle. Fancsali József a Nehézipari Műszaki Egyetem (NME) gépészeti főkonstruktorra szintén jelentős szerepet vállalt az „űrkohó” fejlesztésében. Magyarai Béla (1949–2018) kiképzett magyar űrhajós a Miskolci NME-n készítette doktori disszertációját, amelyben a Szaljut-6 űrállomás fedélzetén működő SPLAV és KRISTAL űrkohók kísérleti eredményeinek feldolgozását végezte el [22]. A fejlesztésekben részt vevő kutatók és űrhajósok munkája nemzetközi szinten is visszhangot keltett, hozzájárulva az ország nemzetközi tudományos kapcsolatainak erősítéséhez.



11. ábra

NME mikrogravitációs környezethez tervezett UMC¹-típusú űrkemencéje [22]

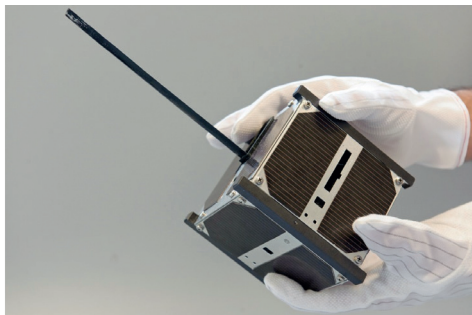
3.2. Magyar fejlesztésű és gyártású műholdak

A Masat-1 MO-72 (a „magyar” és a „satellite” szavak összevonásából származik) az első teljes egészében magyar fejlesztésű és építésű CubeSat műhold. A mintegy 1 kg tömegű, 10 cm élhosszúságú, kocka alakú, CubeSat-szabványú műholdat a BME hallgatói fejlesztették. A műholdat magyar idő szerint 2012. február 13-án 11 órakor indították útnak, több más műhold társaságában, az Európai Űrügynökség (ESA²) Vega hordozórakétájának első küldetésén. A felbocsátás a Francia Guyanában található Guyana Űrközpontból történt. A műholdon helyet kapott egy VGA-felbontású kamera, amelyet a 10 cm-es élhosszúságú kockába integráltak. Az 1 kg tömegű rendszernek ki kellett bírnia a felbocsátáskori mechanikai terhelést, valamint a világűr szélsőséges környezeti körülményeit (széles hőmérsékleti tartomány, vákuum). A műhold mintegy 2000 km magasságú pályán legalább 3 héten át képes volt működni, és folyamatos kapcsolatot tartott fenn a földi vezérlőállomással. A végső integráció során lehetőség nyílt egy kis tömegű kamera elhelyezésére is, így került a fedélzetre

¹ Universal Multizone Crystallizator.

² European Space Agency.

a VGA-érzékelő. Az első felvételek nem sikerültek, de miután a műhold teljesítette alapfeladatait és átvészelte a 2012. március eleji napvihart, az üzemeltető csapat kijavította a hibákat, és elkészítette az első sikeres felvételeket a Földről. A BME 2015. január 8-án jelentette be, hogy a folyamatosan csökkenő pályamagasságú Masat-1 várhatóan január 10-én belép a légkörbe, és megsemmisül. A műhold több mint 10 ezer Föld körüli keringést teljesített, és összesen 1061 napon keresztül működött. A projekt vezetője Gschwindt András (1941–) volt. A fejlesztőcsapat tagjai: Horváth Gyula, Szombathy Csaba, Kovács Zoltán, Marosy Gábor, Bükkfejes András, Czifra Dávid, Dudás Levente, Glisics Sándor, Hödl Emil, Knipfer Balázs, Mezei Tibor, Szimler András, Temesvölgyi Tamás, Vancsik János, Varga Lajos és Várhegyi Zsolt [23].



12. ábra

A MASAT-1 az első magyar CubeSat műhold [23]

A SMOG műholdból két repülőképés példány készült. Az elsőt eredetileg 2017-ben indították volna SMOG–1 jelzéssel, de a start többször csúszott, ezért a készítők újabb indítási lehetőséget kerestek a második példány számára. A SMOG-P (a „P” a *precursor*, azaz előfutár kifejezésre utal) magyar pikoműhold a SMOG műholdsorozat első tagja. A második magyar műhold és egyúttal a világ első működő 1PQ (*PocketQube*), azaz $5 \times 5 \times 5$ cm méretű műholdja, amelyet a BME Villamosmérnöki Karán fejlesztettek és építettek. A műhold fő feladata a földfelszíni digitális műsorszóró adók világűrbe kisugárzott jeleinek mérésével az elektromágneses szennyezettség – közismert nevén elektroszmozog – vizsgálata volt. A SMOG-P-t 2019. december 6-án állították Föld körüli pályára az új-zélandi Māhia-félszigetről a Rocket Lab Electron típusú hordozórakétájával. A SMOG-P-vel együtt indították a 2PQ ($5 \times 5 \times 10$ cm) méretű, magyar magáncégek által fejlesztett ATL–1 műholdat is. Kategóriájában világelsőként működőképesnek bizonyult. A műhold alacsony Föld körüli pályán keringett. Az ellipszis pálya apogeuma 405 km, perigeuma 353 km volt, a pályaelhajlás 97° . A műhold keringési ideje 92 perc volt. A SMOG-P tervezett élettartama három hónap volt, azonban ezt jelentősen túlteljesítve mintegy nyolc hónapon keresztül működött. 2020. szeptember 28-án, pályafutása végén, működő űreszközként lépett be a Föld légkörébe, ahol megsemmisült, és ezzel sikeresen teljesítette küldetését. Mérési eredményei alapján elkészült az első publikus, a Föld digitális földfelszíni TV-sávú elektromágneses szennyezettségét ábrázoló térképe. A SMOG-1-et 2021. március 24-én sikeresen pályára állította egy orosz hordozórakéta. Ez lett Magyarország negyedik működésre alkalmas műholdja. Ugyanez a hordozórakéta állította pályára a GRB-Alfa nevű mikroműholdat, amely már több mint 1797 napja üzemel, nagy számú gamma-kitörést detektált, és jelentős magyar fejlesztések alapjául szolgált.

A világegyetem távoli részein lezajló gigantikus katasztrófák során keletkező gamma-kitörések észlelésére fejlesztettek magyar-szlovák és japán együttműködéssel 2 mikroműholdat, a GRB-Alfát és GRB-Beta CubeSatokat. A GRB-Alfa 1U nagyságú, a GRB-Beta 2U nagyságú egységnek lett tervezve. A gamma-sugarak észlelésére kifejlesztett szcintillációs detektor és a mikroműhold több fedélzeti egysége is magyar fejlesztés. A GRB-Beta műholdat az új, Ariane-6 típusú ESA hordozórakéta kísérleti indítása során bocsátották fel. 2024. július 9-én sikeresen bejelentkezett, és a tervek szerinti módon küldi a mérései eredményeit. Ezzel Magyarország jelentős tapasztalatot szerzett, és bizonyított az eredményesen működő CubeSat és PocketQube nagyságú mikroműholdak tervezése, gyártása és üzemeltetése vonatkozásában. Sajnos ez messze elmarad a világ élenjáró műegyetemei közötti listákon, ahol napjainkban már 12–20 db CubeSat indítása is gyakran előfordul.

Magyar kutatók részt vesznek a legújabb, a Föld kozmikus biztonságát elősegítő, ESA által szervezett Hera-misszióban is. A Hera-küldetés 2024. október 7-én indult, és 3 kutató űreszközt – 1 nagyobb és 2 CubeSat egységet – szállít a Didymos-Dimorphos ikerkisbolygó felé. A 2026-ra tervezett megérkezésük után az űrszondák közelről fogják tanulmányozni a Didymos-Dimorphos ikerkisbolygók viselkedését. A főszondába épített, hat optikai kamerából álló képalkotó rendszert, „szemet”, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem MOGI tanszékének kutatói kalibrálták, és az űrszondáról visszaküldött képek utófeldolgozását is ők végzik. Ezáltal nagyobb pontosságú adatok állnak rendelkezésre a tudományos elemzésekhez. Ábrahám György professzor már az 1980-as években részt vett a NASA Vega-programjának kameratesztelésében. Kovács Gábor tudományos munkatárs és Nagy Vince Balázs egyetemi docens 2006-tól kapcsolódott be a NASA sikeres Dawn küldetésébe. A Hera-projektben a kalibrációs feladatokat Kovács Gábor és Nagy Balázs Vince végezték, mind tudományos, mind mérnöki szempontból, míg a tanszék adjunktusa, Pizág Bertalan a földi egységek kalibrálásában vett részt. A projekt több részfeladata hallgatók bevonásával valósult meg. 2025. november 28-án felbocsátották a HUNITY műholdat, amelynek weboldala a 13. ábrán látható. Érdekessége, hogy a BME munkatársai mellett 6 szakközépiskola diákjai is részt vettek a műhold megépítésében és a különböző feladatok megoldásában [23].



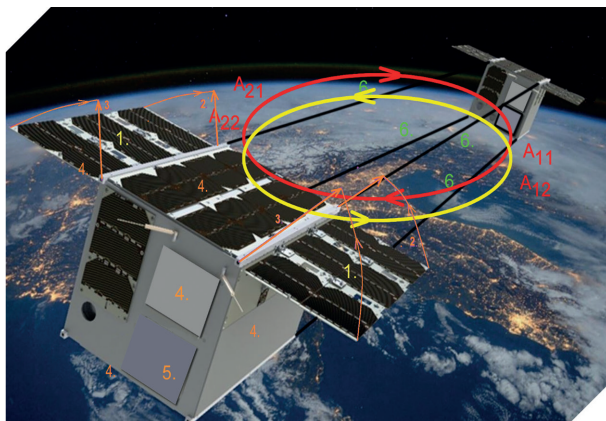
13. ábra

A HUNITY műhold weboldala [23]

A 14. ábrán bemutatott Gauss-féle monostatikus CubeSat-konceptió előnyei elsősorban az interferometrikus mérési elrendezésből adódnak, amely kiemelkedő mérési pontosságot, nagy felbontóképességet, valamint a mesterségesintelligencia-alapú adatfeldolgozás hatékony alkalmazhatóságát teszi lehetővé. A javaslat a közeljövő űrtechnológiai kihívásaira való felkészülést szolgálja, különös tekintettel a *Line-of-Sight* (LOS) pályák mérési kapacitásának

kiterjesztésére. Az olcsón megvalósítható, merev kapcsolatban lévő CubeSat-rendszerstruktúrák lehetőséget kínálnak komplex űrhelyzet-felismerési (SSA³) feladatok végrehajtására. A rendszer főbb alrendszerei a következők:

- analóg alrendszerek: bemeneti fokozatok, kvázimonosztatikus mérési elrendezés, A11–A22 jelű kalibrációs hurkok;
- digitális alrendszerek: direkt digitális szintézer (DDS); gyors Fourier-transzformáció (FFT) alapuló jelfeldolgozási módszerek; „állapotgép” Markov-láncok alkalmazásával;
- kommunikációs alrendszer (adatátvitel): fő kapcsolat Starlink hálózaton keresztül, tartalék VHF- és UHF-sávú rádiókapcsolat.



14. ábra
Gauss monostatikus CubeSat javaslat [24]

3.3. Magyar űrhajósok

A szocialista országok űrkutatási együttműködését szabályozó Interkozmosz-megállapodás biztosította a lehetőséget arra, hogy a részt vevő államok kiválasztott űrhajósai a szovjet űrállomások fedélzetére repülhessenek. Magyarország hetedik nemzetként kapott felkérést az űrrepülésben való részvételre, és 1977-ben megkezdődött a meghatározott feltételeknek megfelelő űrrepülőjelöltek kiválasztása.

A magyar űrhajósjelöltek kiválasztása a vadászpilóták közül Kecskeméten, a Repülőorvosi Vizsgáló és Kutatóintézetben (ROVKI) kezdődött. A vizsgálatok eredményeképpen négy pilóta közül kettőn, Farkas Bertalan és Magyarai Béla, a Gagarin Űrhajóskiképző Központban szovjet kollégáikkal közösen végezték el, 1978 és 1980 között, a kiképzést. Farkas Bertalan űrhajóstársa és parancsnoka Valerij Kubaszov, Magyarai Béláé Vlagyimir Dzsanibekov volt. Mindkét magyar kiváló eredménnyel teljesítette a kiképzést. A végső döntés alapján a magyar szervezők Farkas Bertalant jelölték az űrrepülésre, míg Magyarai Béla tartalék űrhajósként végig készen állt a helyettesítésére. Farkas Bertalan és Valerij Kubaszov 1980. május 26-án, moszkvai idő szerint 21 óra 20 perckor (magyar idő szerint 20 óra 20 perckor) indult a világűrbe a Szozuz-36

³ Space Situational Awareness.

űrhajó fedélzetén. Az űrhajó május 28-án kapcsolódott össze a Szaljut-6 űrállomással, ahol Leonyid Popov és Valerij Rjumin szovjet űrhajósok fogadták őket. Farkas Bertalan az űrrepülés során több tudományos kísérletet végzett a magyar gyártású orvosi biológiai műszerekkel. Magyar gyártású konzervekkel vendégelte meg orosz űrhajós társait. Az űrkonzerveket a Globus konzervgyár készítette, és az új ízek nagy sikert arattak a többi űrhajósnál.



15. ábra

Magyar gyártású, magyar ízvilágú Globus űrkonzervek kalocsai mintás dobozban [20]

Charles Simonyi (születési nevén Simonyi Károly) (1948–) szoftverfejlesztő, az Excel kidolgozója, a szándékorientált programozás (IP⁴) kutatója. Édesapja, Simonyi Károly, Akadémiai Aranyérmes, Kossuth-díjas fizikus, aki részt vett az 1946-os Bay Zoltán-féle Hold-radar-kísérletben. Charles Simonyi kettős – amerikai és magyar – állampolgár. Második magyarként ő volt a Nemzetközi Űrállomás ötödik és hetedik űrturista látogatója. Egyetlen űrturista, aki kétszer volt az ISS fedélzetén a világűrben, és ott érdemi kutatótevékenységeket is folytatott [25].



16. ábra

Simonyi Károly (Charles Simonyi) [25]

⁴ Intentional Programming.

42 év után az Európai Űrügynökség jóvoltából, a NASA és Magyarország közötti megállapodás alapján, lehetőség nyílt arra, hogy Magyarország ismét űrhajóst küldjön az Axiom Space magánipari program keretében a Nemzetközi Űrállomásra. A 240 jelentkező közül kiválasztott 4 jelölt (Cserényi Gyula 33 éves erőáramú villamosmérnök; Kapu Tibor 31 éves űripari fejlesztőmérnök; Schlégl Ádám 33 éves klinikai ortopédsebész és Szakály András 40 éves repülőipari tervezőmérnök) közül végül is Kapu Tibor lett az, akit Magyarország a világűrbe küldött, míg a tartalék űrhajós Cserényi Gyula volt.



17. ábra

Schlégl Ádám, Cserényi Gyula, Kapu Tibor és Szakály András (balról jobbra) űrhajósjelöltek [26]

Kapu Tibor űrutazására 2025. június 25-én került sor az Axiom Mission 4 (Ax-4) küldetés keretében. Az űrben töltött ideje 20 nap, 2 óra és 59 perc volt. A Grace nevű űrhajó 2025. július 15-én tért vissza a Földre. Kapu Tibor az ISS fedélzetén több mint 25 tudományos kísérletet végzett el. A fiatalabb generáció számára talán leglátványosabb kísérlete egy nagy méretű vízgömb létrehozása volt mikrogravitációs környezetben, valamint a gömb felszínén kialakuló folyadékáramlás videófelvétele és elemzése. További vizsgálatokat végzett az emberi mikrobiom kutatása, a növénytermesztés mikrogravitációs körülmények között, a DNS-károsodás helyreállításának mechanizmusai, valamint a nanotechnológiai alapú orvosi anyagok tesztelése területén. A kísérletek tudományos értékelése további elemzési és feldolgozási feladatokat jelent az érintett szakemberek számára [26].

4. Összefoglalás

A tanulmány röviden összefoglalta a Bay Zoltán által vezetett Tungsram Hold-radar-mérések és napjaink űrkutatása közötti út főbb eredményeit. A magyar mérnökök és a műszaki tudományokat ápoló akkori és napjainkban is elhivatott szakemberek komoly, világviszonylatban is elismert eredmények elérésére képesek. Tény, hogy Magyarország 2025-ben űrhajóst küldött az ISS-re, rekordszintű űrkutatási beruházásokat hajt végre, a nemzetközi űrkutatási

együttműködéseket folyamatosan bővíti, országos űrtudományi képzést indított, és több tucat magyar kísérlet jutott el az űrbe. A tanulmány ráirányítja a figyelmet az űrkutatással kapcsolatban megkerülhetetlen, hazai haditechnikai K + F + I és az ehhez szorosan kapcsolódó hadmérnökképzés jelentőségével [27] folyamatban lévő projektekre. A szerzők egyúttal felhívják a figyelmet arra, hogy a – néhány éve „eltűntként” vagy „titkosítottként” emlegett – Haditechnikai Intézet szakmai miliője és tapasztalati bázisa nélkül nem tartható fenn hatékony és gazdaságos hadiipar. Ezzel összefüggésben társadalmi igény is mutatkozik egy olyan, „titokzatos”, ugyanakkor valós megoldási lehetőségekkel rendelkező HTI iránt, amely képes e szerep újbóli betöltésére.

A Bay Zoltán vezetésével működő holdradaros mérnökcsapat sikere február 6-át a mérnöktársadalom számára minden évben emlékezetes nappá teszi.

Ezt az eseményt ünneplik a rádióamatőrök a Föld–Hold–Föld („EME”) összeköttetések létesítésével és a mért hullámterjedési jellemzők egyetemisták általi kiértékelésével [28]. A világűr kettős polgári és jelentősebben katonai alkalmazásai napjainkban kiemelik a mérnöki munka fontosságát, ezért javasoljuk, hogy nevezzük ki ezt a napot a hadmérnökök ünnepnapjává.

Erőfeszítéseinket pedig tovább kell fokozni úgy a hazai, mint a nemzetközi K + F + I kiszélesítésével, hiszen napjainkra az alacsony pályás műholdakkal kapcsolatos tudományos kutatások áttevéődnek az ipari alkalmazási területekre. A helyzet komplexitását növeli a Holdon található ásványkincsekért kialakuló verseny, ahol a legmodernebb műszaki megoldások, ipari alkalmazások kidolgozására és tömegtermelésére van szükség. A területen veszélyként kell kezelni az „űrszemét” növekedését, ami egyszerre kihívás, és eltakarítása üzleti lehetőség az élenjáró technológiákat alkalmazó cégek számára.

Felhasznált irodalom

- [1] E. Kollár, „Virtuális Rádiómúzeum.” Online: <https://www.radiomuseum.hu/index.html>
- [2] N. Wassits, *A Magyar Radar 1943–1946*. Békéscsaba, Typografika, 2011.
- [3] T. Prokob, T. Búza, „A Föld–Hold távolság megmérése. Az 1946-os Hold-reflexiók kísérlet megismétlése mai eszközökkel,” Haditechnikai Intézet. Online: <https://haditechnikaiintezet.hu/prokob-tibor-buza-tibor-fold-hold-tavolsag-megmerese>
- [4] I. Balajti, F. Hajdú, „Surprising Findings from the Hungarian Radar Developments in the Era of the Second World War,” *Radio Science Bulletin*, 358, pp. 82–108. 2016.
- [5] F. Hajdú, G. Sárhidai, *A Magyar Királyi Honvéd, Haditechnikai Intézettől a HM Technológiai Hivatalig, 1920–2005*. HM Technológiai Hivatal, 2005.
- [6] I. Balajti, *A radar. Haditechnika Fiataloknak sorozat*. Budapest, Zrínyi, 2021.
- [7] „Project Diana Radar Reaches the Moon”. Online: <https://www.projectdiana-eme.com/>
- [8] W. Stepp, „The First Reception of EME Echo in 1944”. Online: <https://www.ok2kkw.com/eme1960/eme1960eng.htm>
- [9] P. Novoszáth, „75 éve végezte Bay Zoltán holdradarkísérletét – a magyar űrtevékenység kezdetei és jelene,” *Repüléstudományi Közlemények*, 33. évf. 3. sz. pp. 25–41. 2021. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2021.3.2>

- [10] J. Bauer, „The 75th Anniversary of Zoltán Bay's World Famous Moon Radar Experiment,” *YouTube*, 2021. február 4. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=2Ffxz7m39EM>
- [11] „Gábor Dénes élete és munkássága,” Gábor Dénes-díjasok Klubja Egyesület. Online: <https://gabordenesklub.hu/gabor-denes-elete-es-munkassaga/>
- [12] „Kármán Tódor”, in *Magyar életrajzi lexikon*. Online: <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/Lexikonok-magyar-eletrajzi-lexikon-7428D/k-760F2/karman-todor-7620B/>
- [13] V. Kučera, „Rudolf E. Kalman: Life and Works”, *IFAC-PapersOnLine*, 50. évf. 1. sz. pp. 631–636. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.070>
- [14] „Neumann János életrajza,” Neumann János Számítógéptudományi Társaság. Online: <https://njszt.hu/hu/page/neumann-janos-eletrajza>
- [15] „Krausz Ferenc”, *Wikipédia*. Online: https://hu.wikipedia.org/wiki/Krausz_Ferenc
- [16] „Borbély Samu”, *Akadémikusok A Magyar Tudományos Akadémia tagjai*. Online: <https://akademikus.mtak.hu/adatlap/borbely-samu/>
- [17] „Űrkutatás Rákosligeten”. Online: <https://rakosliget.hu/html/urkutatas.html>
- [18] I. Apáthy, „A magyar űrkutatás története 1992-ig.” Online: <http://hso.hu/page.php?page=287>
- [19] „Pille dózismérő. A legsikeresebb magyar űreszköz”, Atomenergetikai Múzeum. Online: https://muzeum.atomeromu.hu/hu-HU/Muzeum/Meselo_mutargyak/Archiv/Pille
- [20] S. György, „Egy magyar űr az űrből,” *Napi Történelmi Forrás*, 2017. június 3. Online: <https://ntf.hu/index.php/2017/06/03/egy-magyar-ur-az-urbol-37-eve-jart-farkas-bertalan-a-kozmoszban/>
- [21] „A NASA teszteli a miskolci űrkemencét,” *Világgazdaság*, 2000. október 12. Online: https://www.vg.hu/vilaggazdasag-magyar-gazdasag/2000/10/a-nasa-teszteli-a-miskolci-urkemencet#google_vignette
- [22] Magyar Természettudományi Múzeum. Online: https://m.blog.hu/mt/mttmuzeum/image/2022/asvanytar/umc_mt_combo_at_admatis_lab.JPG
- [23] HUNITY Műhold adatok. Online: <https://gnd.bme.hu/hunity>
- [24] L. Szilvássy, I. Balajti, „Assessments on Drone and Hypersonic Weapons Surveillance Challenges and their Solutions,” in *Integrated Air and Missile Defense Strategies*, A. Kawalec, W. Bużantowicz, M. Walenczykowska szerk., Boca Raton, CRC Press, 2026, pp. 73–102. Online: <https://doi.org/10.1201/9781003739234-8>
- [25] „Charles Simonyi”, *Wikipedia*. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Simonyi
- [26] „Role of Future Hungarian Astronaut in Space Outlined,” *Hype&Hyper*, 2023. április 4. Online: <https://hypeandhyper.com/role-of-future-hungarian-astronaut-in-space-outlined/>
- [27] I. Balajti, „Gondolatok az Education 5.0 alapú hadmérnökképzés szükségessége és megvalósításának elvárásai témakörben: Hogyan képezzünk Ipar 5.0 környezetbe integrált Dobó Istvánokat és Bornemissza Gergelyeket?” in *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből IV*. Göcse I., Padányi J. szerk., Budapest, Ludovika, 2025. pp. 7–32. Online: https://doi.org/10.36250/01323_01
- [28] Magyar Rádióamatőr Szövetség (MRASZ). Online: <https://mrasz.hu/>

Hungarian Successes in Space Exploration

From the Tungsram Moon Radar Measurements to the Present Day

Getting us to participate as effectively as possible in space-related economic activities is a challenge for the present and the near future. The war raging in our neighbourhood once again highlights the scarcity of exploiting scientific results based on military applications. Hungarian radio electronics during the Second World War, e.g. radio tube production and their applications in the development and deployment of various types of radios, electronics, devices and radars such as the SAS, Borbala and Turul, were based on the military operational and technical requirements of the Military Institute of Technology (HTI). All our technical achievements are based on the intellectual potential of our world-class secondary and university education issued in 1920s by Kunó Klebelsberg. Today, as 80 years ago, our potential is largely determined by the Hungarian linguistic environment and our historical achievements in the field of engineering. By assessing these, we can explore and assess the industrial and technical background of our predecessors, the directions in which they were successful and how this was received in the international environment. Since the Tungsram Moon radar measurements led by Zoltán Bay represent a milestone in this process, the space-related aspects of the then and recent successes will be reviewed, highlighting the messages for today.

Keywords: Zoltán Bay, Tungsram, Moon radar, space exploration, satellites, Hungarian astronauts

Lányi Aladár ny. mk. őrnagy Magyar Repüléstörténeti Társaság Magyar Hadtudományi Társaság Légierő Szakosztály aladarlanyi@gmail.com orcid.org/0000-0003-3701-373x	Aladár Lányi ret. Eng. Major Hungarian Aviation Historical Society Hungarian Defence Forces Scientific Society Air Force Department aladarlanyi@gmail.com orcid.org/0000-0003-3701-373x
Balajti István ny. mk. alezredes Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola balajti.istvan@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3566-2904	István Balajti ret. Eng. Lt. Col. Ludovika University of Public Service Doctoral School of Military Engineering balajti.istvan@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-3566-2904

Gábor Terpecz, György Schuster

Reliability Factors of Unmanned eVTOL¹ Vehicles

Unmanned eVTOL aircraft, also known as drones, require advanced reliability and maintainability metrics for safe and efficient fleet operations. Beyond basic measures, drone-specific metrics offer a more accurate assessment. Technologies enabling predictive maintenance, such as health management and digital twins, are key. In the future, AI and blockchain will further enhance the effectiveness of these systems, promoting the safer and broader adoption of drone technology.

Keywords: drone, eVTOL, smart city, reliability, urban air mobility, advanced air mobility

1. Introduction

The integration of eVTOL vehicles into UAM² systems raises complex risk factors. The aim of the analysis is to systematically explore and quantitatively estimate the most significant risk factors of unmanned eVTOL vehicles. Our analysis is based on the regulatory frameworks of the FAA³ and EASA.⁴ We utilise quantitative and qualitative risk analysis methods. Risk assessment is carried out according to the DAL⁵ and SWAL⁶ frameworks. Particular attention is paid to the airworthiness environment (FAA, EASA), the differences due to unmanned eVTOL vehicle architectures (multicopter, tilt-rotor, tilt-wing, lift and cruise, etc.), as well as simple reliability calculations that highlight the role of redundancy. The proposed metrics and methods can be used to support regulatory compliance, design trade-offs, and operational risk management.

2. Reliability concepts

2.1. Mean Time Between Failures (MTBF)

The MBTF is defined as the operating time between two consecutive failure events, i.e. the reliability indicator between failures within the expected operating time. As MTBF is defined

¹ Electric Vertical Take-Off and Landing.

² Urban Air Mobility.

³ Federal Aviation Administration.

⁴ European Union Aviation Safety Agency.

⁵ Design Assurance Level.

⁶ Software Assurance Level.

as the expected time between failures, it is considered to be one of the fundamental indicators of system reliability. This indicator assumes particular significance in the context of drones given the potentially disastrous consequences of failures occurring during air operations.

This safety indicator is often given in hours or the number of flight operations for drones. Complete reliability largely depends on the reliability of the subsystems (e.g. battery, motor, control electronics) [7].

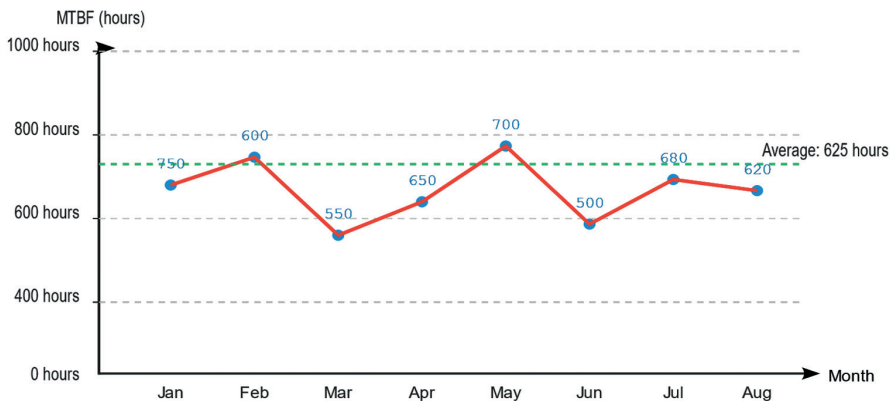


Figure 1.
Drone fleet MTBF analysis [the authors]

The chart (Figure 1) shows 8 monthly MTBF values, which illustrate the change in fleet performance.

It is important to note that an MTBF value of 50,000 hours does not mean that the device will definitely work for 50,000 hours. This is a statistical value that indicates how much the average time between failures is expected to be for high-volume devices.

Furthermore, it is not a warranty for a unique device, i.e. a particular device can fail much earlier or later than the MTBF value. The failure depends largely on the environment and usage. MTBF values generally refer to ideal or standardised conditions. In real, extreme conditions (high temperature, dust, or high loads), the time between actual failures can be significantly lower.

MTBF calculation:

$$MTBF = \frac{\text{Total Operating Time}}{\text{Number of Failures in a Given Period}} = \frac{\sum T_{op}}{N} \quad (1)$$

where: T_{op} – Cumulative error-free uptime for a given period

N – number of failures in the period.

For example:

A drone fleet consists of 10 drones that together completed 5,000 flight hours and 8 failures were recorded during this time.

$$MTBF = \frac{5000}{8} = 625 \text{ hours} \quad (2)$$

This indicates that, on average, a failure occurs in the fleet every 625 flight hours. The mean MTBF value of the fleet is 625 hours, which is considered to be an acceptable level. In the optimal month (January), an MTBF of 750 hours was achieved; conversely, in the sub-optimal month (June), only 500 hours were recorded. The variation (250 hours apart) indicates the potential for improvement. The mean of 500 hours per drone indicates that some drones likely had more and others had fewer error-free hours in operations.

2.2. Mean Time to Failure (MTTF)

MTTF is a standard reliability indicator defined in IEC 60050-192:2015 [3], the international standard. A product or system is expected Operational until the first failure. In the case of drones, it indicates how long a drone works on average without a component or the entire system failing. A higher MTTF means that the drone or one of its components (such as a battery, flight controller, or camera) is expected to continue to operate before it fails. This is vital for complex systems such as unmanned passenger drones. MTTF is usually used for parts such as a sensor, battery, or propeller, which are not repaired but replaced in the event of a malfunction, while MTBF refers to parts that can be repaired. MTTF helps determine the expected uptime of key drone components, allowing for proactive component replacement scheduling, reducing unexpected downtime and helping with maintenance planning. For commercial or industrial drones, a high MTTF means greater safety and lower costs over time, as it prevents sudden failures during operations. The IEC 60050-192:2015 [4] standard defines MTTF, while the DO-178C [9] and DO-254 [6] standards set out the reliability requirements for critical flight control systems.

Mathematical formula

$$MTTF = \frac{\text{All operation times}}{\text{Number of failures}} \quad (3)$$

where: *All operation times* – The combined operating time of all identical units during the measurement period.

Number of failures – Total number of units that failed in a given period

In integral form:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

where: $R(t)$ – the reliability function, which specifies the probability of the system working at a point in time.

λ – the failure rate (failures/hour)

t – time

For practical calculation:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (5)$$

where: t_i – Operating time of i -th parts until failure

n – Number of parts tested.

MTTF is not a random value, but the result of a number of factors that affect the reliability and service life of your equipment. These factors can be classified into the following main groups, which we will discuss below.

2.2.1. Design and manufacturing features

2.2.1.1. Solid design

The frame structure and other components that respond well to loads and stresses, as well as reliable design, reduce the risk of failures. Careful planning for loads and stresses is not a luxury, but a basic requirement. Using modern tools (finite element analysis–FEM,⁷ CFD⁸), designers can accurately model the behaviour of the drone in different conditions, allowing you to design the optimal structure. Drone design is not based on the principle of “the stronger the better”, but on the principle of precisely calculated, proportional reinforcement in relation to the stress. This ensures that the drone represents a minimum weight and can safely withstand expected and unexpected loads throughout its lifetime.

2.2.1.2. Quality of the materials used

The material quality of drones directly determines not only performance, but also safety and service life. The ideal material is always the result of an optimised compromise between the specific requirements of the application, the budget and the production possibilities. The utilisation of durable, high-quality materials has been demonstrated to result in a longer service life and higher reliability.

2.2.1.3. Operating conditions

The operating conditions of drones determine their actual performance, reliability and economic efficiency. Successful operation depends not only on the quality of the drone, but also on understanding and adapting to environmental conditions. Even the best drone design can lead to failure if actual operating conditions are not taken into account at all stages of design, operation, and maintenance.

⁷ Finite Element Method.

⁸ Computational Fluid Dynamics.

2.2.1.4. Environmental impacts

Extreme temperatures can cause a significant reduction in the lifespan of motors and batteries. A humid or corrosive environment can cause electronics problems, oxidation, and structural damage. The following equation can be used to determine the actual failure rate in operation under specific environmental conditions:

$$\lambda_{eff} = \lambda_0 \prod_{i=1}^n k_i \quad (6)$$

where: λ_{eff} – (lambda effective): The actual operating failure rate (or equivalent parameter) under specific environmental conditions. This number indicates how often the drone (or its component) fails under real, non-ideal conditions.

k_i – Environmental factors (temperature, humidity, vibration).

2.2.1.5. Load profile

The MTTF value of drones depends significantly on the flight profile. Continuous or strong vibrations can lead to loosening of components, wear, breakage under heavy loads. Operations that constantly exceed the rated capacity accelerate the depreciation and failure of drones. Floating in a stationary position causes a 20-30% shorter service life, while stable cruising provides optimal operating conditions at the system level.

The value of MTTF is significantly affected by other factors, including:

- *Drone type:* Hobby or industrial (enterprise) drones;
- *Manufacturing accuracy:* Precise, standard-compliant manufacturing processes reduce the likelihood of early failures due to manufacturing errors.

Comprehensive knowledge and application of these factors allows you to improve reliability, optimise maintenance and extend service life.

MTTF is not an unpredictable figure, but a consequence of a number of factors. By knowing these factors, we can proactively improve the life of our equipment.

With the rapid expansion of drone technology, the reliability and operational readiness of fleets have become crucial both in industrial applications and in the control of critical infrastructure. The concept of Average Operating Time to Failure, although originally derived from general manufacturing, is also of paramount importance in the world of drones. This metric statistically expresses how long an unrepairable drone part or system can operate on average before a permanent failure occurs. In the case of drones, there are a number of such components, such as batteries, propellers, certain sensors or motor coils, which, in the event of a failure, are not repaired, but replaced. Knowing the value of MTTF allows fleet managers to make informed decisions about inventorying spare parts, compiling maintenance schedules, and estimating the expected life expectancy of drones.

Calculating MTTF is relatively simple: it is the total service life of all components of the same type divided by the number of failures that occurred during the observation period. Imagine being able to track the status of all the batteries in a fleet of 30 drones. If these batteries permanently fail 10 times over 15,000 charge cycles, the MTTF is 1,500 cycles. This data is extremely valuable, as it can predict the approximate number of flights after which the batteries will need replacing en masse. This allows you to prepare your battery budget and avoid stopping flight operations. However, it is important to distinguish MTTF from the related MTBF. While MTTF is specific to parts that need to be replaced, MTBF refers to systems that can be repaired. For example, a drone has batteries characterised by MTTF, but the flight control unit itself, which can be repaired, can be evaluated using an MTBF indicator.

The MTTF value is influenced by a number of factors that are specific to drones. Design quality and component materials are essential, but operating conditions often play a decisive role as well. For example, an agricultural drone operating in a dusty, humid environment with large temperature fluctuations will experience significantly faster component breakdown than a drone used for inventory surveys in an air-conditioned warehouse. The attitude and practice of the remote pilot or operator also make a significant difference, as rough handling, frequent hard landings, continuous use of maximum payload, or improper storage can all dramatically reduce component life expectancy. Therefore, fleet management involves not only maintaining the technology and managing the human factor, as well as ensuring compliance with operational protocols.

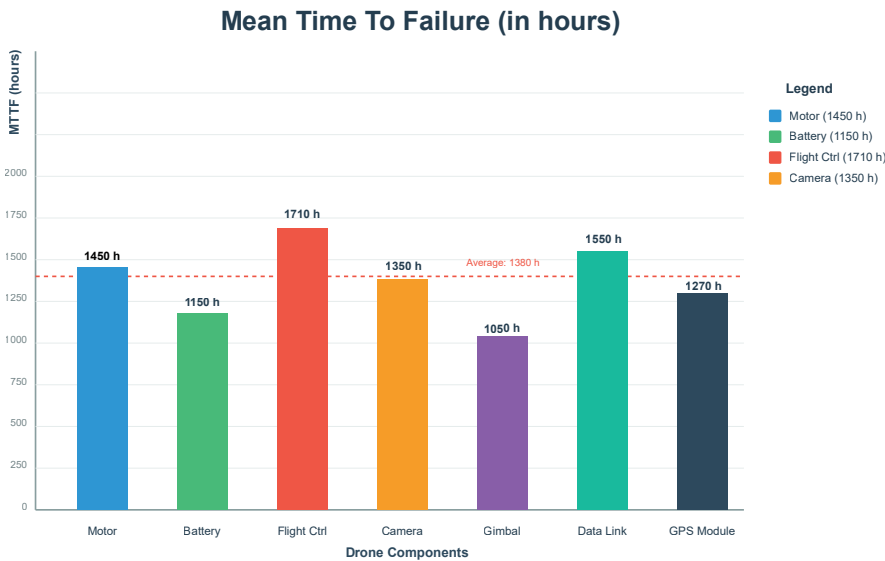


Figure 2.
MTTF analysis of drone components [the authors]

In this complex environment, modern drone fleet management (CMMS)⁹ software becomes an indispensable tool for improving MTTF values and increasing fleet reliability. These platforms offer much more than simple work order management. They facilitate predictive maintenance by continuously collecting and analysing data on the condition of each drone. For instance, built-in analysis software can detect an increase in a motor's vibration level or cells in a battery discharging faster than others. These signals, which occur before a malfunction, can trigger an alarm, enabling the technician to inspect and replace the problematic part during subsequent scheduled maintenance and preventing unexpected shutdowns.

The CMMS also becomes a central repository for all historical data, enabling in-depth analysis. It allows you to track whether the MTTF of parts purchased from a particular supplier is lower than average, or which component of a certain type of drone is the most likely to fail. This data-driven approach not only facilitates proactive maintenance, but also lays the foundation for purchasing decisions and long-term planning of fleet composition.

2.3. Bathtub Curve (BC)

In connection with the definition of MTTF, we must mention another important concept. This is the bathtub curve, which is a curve describing the development of the failure rate over time. The failure rate of drone components usually follows the famous BC, which consists of three characteristic stages:

- *Early failures* (manufacturing defects) – decreasing failure rate;
- *Accidental failures* (normal lifetime) – low, constant on;
- *Wear failures* – increasing failure rate.

2.3.1. Stage of early failures

This stage is characterised by low MTBF values, i.e. frequent failures. According to calculations [1] 20–30% of new drones (prototypes) can fail during the first 50 flights. In such cases, the common causes are manufacturing errors, software errors and component compatibility problems.

2.3.2. Stage of accidental failures

This section is characterised by a stable, high MTBF value. The average MTBF of commercial drones at this stage is 500–1,000 flight hours [2]. Reliability prevails under the intended conditions of use.

⁹ Computerised Maintenance Management System.

2.3.3. Wear failures stage

At this stage, the MTBF is constantly decreasing. The service life of drone components is 300–500 charge cycles for batteries, 1,000–2,000 flight hours for motors, and fatigue cracks and fractures due to vibration can occur in structural elements. The MTBF value can be increased by up to 60% through the implementation of redundant GPS,¹⁰ IMU¹¹ and computer systems.

Other factors that increase reliability include *predictive maintenance*, which can be used to predict failures based on sensor data, and early¹² detection of the third stage of the bathtub curve using AI-powered analytics.

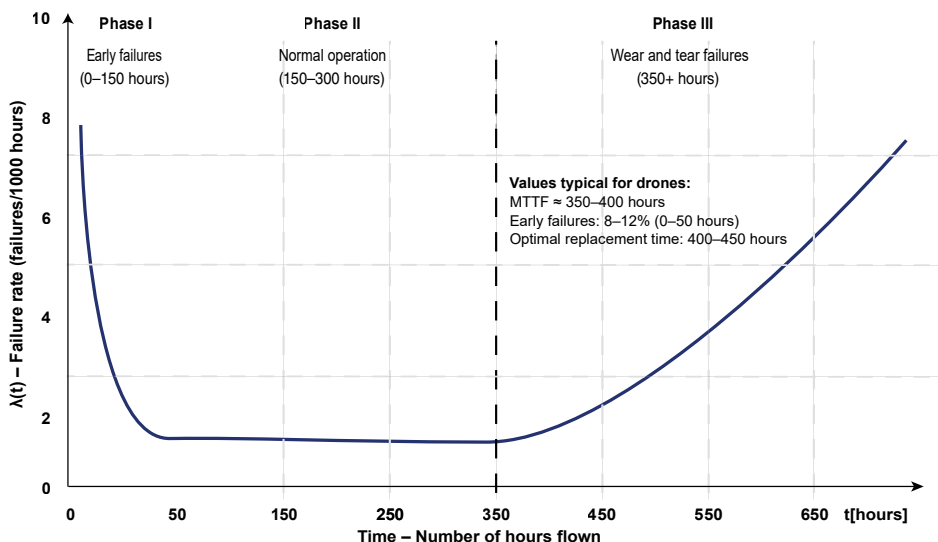


Figure 3.
Tub curve in the reliability of drones [the authors]

The following parameters are to be observed in relation to the stage:

$\beta < 1$ ($\beta \approx 0.5$) – early failures

$\beta = 1$ – normal operation (exponential distribution)

$\beta > 1$ ($\beta \approx 3.0$) – wear failures

Mathematical model: The three-parameter Weibull distribution is defined by the following equation:

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (7)$$

¹⁰ Global Positioning System.

¹¹ Inertial Measurement Unit.

¹² Artificial Intelligence.

Table 1.
Explanation of the tub curve [the authors]

$\lambda(t)$	0–10 bugs/1000 hours	Failure rate
t	0–650 hours	Flight time
β	0.5, 1.0, 3.0	Weibull Shape Parameter
MTTF	~400 hours	Expected failure time

2.3.4. System reliability

In the case of serial switching, the MTTF of the entire drone system is as follows:

$$MTTF_{\text{system}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n x \lambda_i} \quad (8)$$

where: i – Index or ordinal number that runs from 1 to n .

For example:

$i = 1 \rightarrow$ battery

$i = 2 \rightarrow$ motor

$i = 3 \rightarrow$ flight controller

$i = 4 \rightarrow$ communication system

the failure rate of each (i)-th component. Unit of Failures/Hour or 1/Hour

Calculation:

$$\lambda_i = \frac{1}{MTTF_i} \quad (9)$$

n – total number of system components.

For example: If a drone consists of 4 critical components (battery, motor, flight controller, communication system), then $n = 4$.

2.3.5. Practical examples

An MTTF value of 150 hours means that an average of 63 out of 100 drones will fail in 150 operating hours (assuming an exponential distribution).

Let's say a drone consists of 3 critical components in series (Table 2):

Table 2.
MTTF calculation specific data [the authors]

Component	Index (i)	MTTF $_i$ (hours)	$\lambda_i = 1/MTTF_i$ (1/hour)
Battery	1	200	0.00500
Engine	2	500	0.00200
Flight controller	3	1,000	0.00100

Calculation step by step:

$n = 3$ (there are 3 components)

Summary $i = 1$ to 3:

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0.00500 + 0.00200 + 0.00100 = 0.00800 \quad (10)$$

System MTTF calculation:

$$MTTF_{system} = 10.00800 = 125 \text{ hours} \quad (11)$$

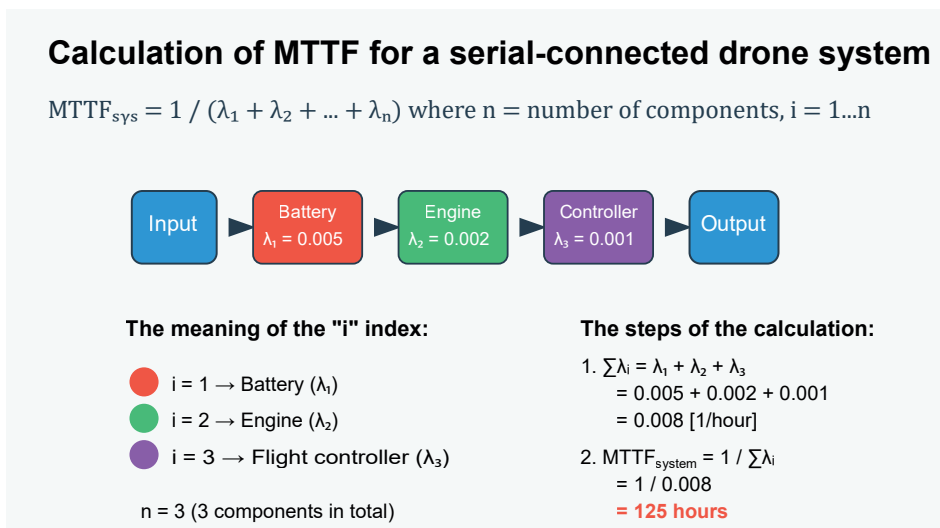


Figure 4.
Calculation of serial drone systems [the authors]

2.4. Mean Time to Repair (MTTR)

The MTTR shows the average time between when a failure occurred and when the repair is completed. For drones, this includes diagnostics, component replacement time, and testing.

$$MTTR = \frac{\sum \text{Repair time}}{\text{Repair time}} = \frac{\sum T_{repair}}{N} \quad (12)$$

where: T_{repair} – Repair time
 N – Number of repairs.

The repair time for the above 8 malfunctions is: 2, 3, 1, 4, 2, 3, 5, 2 hours.

$$MTTR = \frac{2+3+1+4+2+3+5+2}{8} = \frac{22}{8} = 2.75 \text{ hours.} \quad (13)$$

2.5. Mean Cycles Between Failures (MCBF)

The MCBF is the number of cycles between failures. In the case of drones, a cycle is usually a series of take-offs, flight missions and landings.

$$MCBF = \frac{\text{All flight cycles}}{\text{Number of failure}} = \frac{C_{\text{total}}}{N} \quad (14)$$

where: C_{total} – Number of failure
 N – Number of failure.

Example:

If the 10 drones in the previous example performed a total of 2,500 flight cycles and 8 failures occurred:

$$MCBF = \frac{2500}{8} = 312.5 \text{ cycle.} \quad (15)$$

2.6. Degradation Rate (DR)

DR shows the rate of performance degradation over time. In the case of drones, this can be, for example, a decrease in battery capacity or a decrease in motor efficiency.

$$DR = \frac{P_{\text{initial}} - P_{\text{final}}}{T_{\text{operation}}} \quad (16)$$

where:

P_{initial} – initial performance
 P_{final} – end-state performance
 $T_{\text{operation}}$ – Operation time.

Example:

The battery capacity of a drone drops from 10,000 mAh to 8,500 mAh after 200 cycles.

$$DR = \frac{10,000 - 8,500}{200} = 7.5 \text{ mAh/cycle} \quad (17)$$

2.7. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

FMEA is a system-wide method for identifying, prioritising, and preventing potential failures that helps you assess their risk and determine the necessary corrective actions. The parameters

underlying the calculation, which need to be analysed as failure modes in drones, are the following:

- Battery Failure – $RPN^{13} = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection}$
- Engine Failure – RPN Evaluation
- Loss of communication link – RPN calculation
- Navigation error – RPN value

2.8. Risk Priority Number rating

The primary purpose of RPN classification is to *rank sources*. The above categories are a good starting point, but they should be adapted to the needs of the organisation.

The *most important rule* is to focus on the items with the highest risk first, especially those that endanger life safety and have serious consequences.

2.8.1. General RPN classification categories and operational boundaries

The goal of risk management is to focus resources on managing the items with the highest risk. Therefore, RPN values are usually classified into 3-4 categories.

Category I

High risk: Immediate intervention is required.

RPN Range: For example, above 100 (common threshold), or even above 125/150, or for any very high severity ($S = 9$ or 10) error, regardless of the total RPN. These are unacceptable risks. The product/process must not leave the design/development phase, or production must stop.

Mandatory measures: It requires an immediate and prioritised solution. Changes in planning/process are necessary to reduce the risk (first of all, reduction of severity and then incidence). The activity must be completed before work can continue.

Category II

Medium risk: Planned repair required.

RPN Range: For example, between 30 and 100. This is the most common "warning" zone. The risk may be acceptable in the short term, but it must be reduced in the long term. Indicates that repairs are needed to increase reliability, quality, or safety.

¹³ Risk Priority Number.

Mandatory measures: Planning and implementing corrective actions with a set deadline. Responsible persons should look for cost-effective solutions (e.g. process optimisation, better control methods to improve detection), and the effectiveness of measures should be monitored.

Category III

Low risk: Accepted/To Watch.

RPN Range: For example, under 30. The risk is currently acceptable. These error modes usually do not require specific action, or the measure is not cost-effective.

Proposed actions: They should be treated as part of routine process control. Further mitigation of risk may be considered if there is an easy way to do so. It should be reviewed regularly, especially if the product, process, or environment changes.

Table 3.
RPN risk levels [the authors]

Risk Level	RPN Range	Severity (S) Criteria	Mandatory Operations
HIGH	> 100 or S = 9–10	Catastrophic, dangerous to security	IMMEDIATE INTERVENTION The product/process cannot be started/continued. Changes need to be made to the plan/process
MEDIUM	30–100	Significant, reduces performance, causes operational risk	PLANNED IMPROVEMENT Development and implementation of a deadline-bound action plan. Impact assessment
LOW	< 30	Minor, unnoticeable, or causes slight disadvantage	ACCEPTABLE/MONITOR NEEDED Routine process control Recommended to review when updating FMEA

Calculation of RPN value:

$$RPN = S \times O \times D \quad (18)$$

where: S – Severity (scale 1–10)
O – Occurrence (scale 1–10)
D – Detectability (scale 1–10).

Calculation example of a drone battery system:

Let us examine the lithium-polymer battery of a drone, where we have identified the following modes of failure.

Failure mode: Battery overheating in flight

Impact: Interruption of drone power supply, crash, fire hazard

Causes: Overload, faulty charger, extreme values of ambient temperatures

Rating:

1. Severity (S) = 9
 - failure can cause significant property damage (e.g. destruction of the drone);
 - it poses a safety risk (e.g. crash and fire);
 - it has a high severity value, as personal injury may occur.
2. Prevalence (O) = 3
 - modern batteries have proper load management;
 - it rarely occurs with proper maintenance;
 - the incidence is low but not negligible.
3. Detection (D) = 2
 - the drone has temperature sensors in its system;
 - early warning is given to the operator;
 - failure is easy and early to detect.

2.8.2. RPN calculation example for a battery

$$RPN = S \times O \times D = 9 \times 3 \times 2 = 54 \quad (19)$$

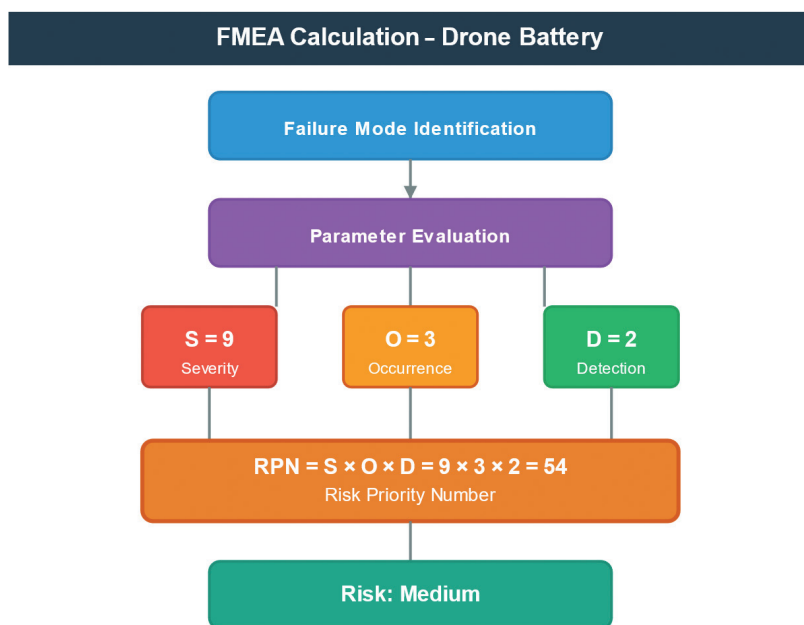


Figure 5.
FMEA calculation for batteries [the authors]

Based on the above calculations, the RPN is 54, which indicates medium risk. Although the severity is high, the low incidence and good detectability reduce the overall risk value. In the event of such failure modes, it is recommended to strengthen preventive measures, such as regular testing of the temperature monitoring system and periodic replacement of batteries. It is important to note that it is a mistake to focus only on RPN! Analysing the unique values of S-O-D is much more important.

For example: An $S = 10$, $O = 2$, $D = 3$ ($RPN = 60$) is actually much more dangerous than an $S = 5$, $O = 6$, $D = 4$ ($RPN = 120$) because it has serious consequences, even if it is rarer. Therefore, items with a high severity rating should always take priority.

The FMEA calculation helps prioritise risks so that limited resources can be focused on the items with the highest risk [12]. In the case of the drone, in addition to the battery system, it is also important to examine the motors, control system and communication system to obtain a comprehensive risk assessment.

2.9. Overall Equipment Effectiveness (OEE)

OEE is a comprehensive performance indicator that evaluates, for example, the efficiency of drone fleets based on three key factors:

- availability;
- performance;
- quality.

From a mathematical perspective, the following equation is applicable:

$$OEE = A \times P \times Q \quad (20)$$

where: A – availability
 P – the performance factor
 Q – the quality factor

Availability (A)

Measures system availability, and can be calculated from traditional reliability indicators.

$$A = MTBF / (MTBF + MTTR) \quad (21)$$

If a drone fleet has an MTBF value of 200 hours and an MTTR value of 6 hours, the following calculation can be made:

$$A = 200 / (200 + 6) \approx 0.971 = 97.1\%. \quad (22)$$

Performance factor (P)

This term refers to the discrepancy between the actual performance and the ideal cycle time. In the event of a drone possessing a nominal speed of 50 km/h, yet, in practice, operating at an average speed of 46 km/h, the following equation can be utilised:

$$P = 46 / 50 = 0.92 = 92\%. \quad (23)$$

Quality factor (Q)

It expresses the proportion of flawless products (or successful tasks). If the drone fleet performed 98 out of 100 operations without errors, then the following conclusions can be drawn:

$$Q = 98 / 100 = 0.98 = 98\%. \quad (24)$$

The product of these three components gives the OEE value:

$$OEE = 0.971 \times 0.92 \times 0.98 \approx 0.875 = 87.5\%. \quad (25)$$

This means that a civilian drone fleet uses 87.5% of its potential capacity to create real value. The remaining 12.5% loss consists of: availability losses (2.9%), performance losses (8%) and quality losses (2%).

An OEE of 100% is an ideal case that can only be achieved if all drones are always available, operating at rated speeds, and performing all tasks flawlessly [13].



Figure 6.
Analysis of the Efficiency of the Entire Drone Fleet (OEE) [the authors]

2.10. Technology and design risks

The majority of modern multirotor and higher payload drones use lithium-ion / lithium-polymer (Li-ion / LiPo) technology. These have a high energy density but are susceptible to high discharge/load ratios, high or low temperatures, physical damage, and improper BMS¹⁴ application. Reliability is determined by several factors, which are as follows:

¹⁴ Battery Management System.

- capacity fade;
- increase in internal resistance;
- cell consistency;
- BMS errors;
- temperature rise to a critical level.

It is important to take into account the concept that defines the use of batteries, which is known as thermal runaway. Thermal runaway is a feedback-based, self-excitatory heating process in lithium-ion (and other types) batteries that can lead to the complete, often irreversible destruction of the cell. Since thermal runaway is a dangerous, self-excitatory process, internal overheating can trigger a chemical chain reaction. This reaction can lead to rapid heat release, the release of gases, and eventually a fire or explosion. For Li-ion batteries, the TR¹⁵ probability of 1×10^{-7} /hour/cell [5], [10] for a 1000-cell configuration.

2.10.1. Risk

The initial and final phases of flight are particularly challenging, because take-off and landing, as well as hover phases, require short but very high power drawdowns, which can lead to high loads, heating and rapid aging of the battery. In the absence of thermal control, increased loads can cause catastrophic battery failure.

3. Predictive Maintenance (PdM)

PdM primarily reduces the probability of technical failure in the field of flight safety; at the same time, it itself requires cybersecurity protection, because if diagnostic data or models can be manipulated, maintenance decisions may also become incorrect.

Therefore, PdM should not be treated as a standalone algorithm. From a scientific and engineering perspective, PdM becomes a genuine safety mitigation only when it is integrated into the complete system of risk assessment, operation, maintenance, cybersecurity, and compliance. EASA's SORA methodology also applies risk-based thinking. It treats operational risk, mitigations, personnel training, technical requirements, and operational procedures as an integrated whole [14].

3.1. *The role of PdM in the drone safety threat model*

PdM mainly addresses technical risks originating from degradation. These are failures that do not necessarily occur suddenly, but appear as measurable deterioration in condition. Examples include motor bearing wear, ESC overheating, an increase in battery internal resistance, propeller microcracks, IMU drift, or structural fatigue.

¹⁵ Thermal Runaway.

Several studies on multirotor multicopters emphasise that vibration data are particularly valuable for estimating the condition of the propulsion system, because motor, rotor, or propeller faults often appear first as deviations in the frequency domain, before visible physical damage can be observed [8]. The task of PdM is therefore not only to determine whether a component is functioning, but also to estimate how long it may continue to operate at an acceptable level of risk.

The role of PdM differs across various drone safety risks. In the case of motor failure, the system may monitor vibration and current anomalies; in the case of battery failure, it may monitor capacity loss, cell-voltage deviation, internal resistance, and temperature trends; in the case of propeller failure, spectral vibration changes; and in the case of sensor failure, drift and inconsistency. GNSS spoofing or radio jamming, however, belongs more to the security category, which PdM can support only indirectly through anomaly-detection tools.

Predictive maintenance alone does not constitute safety evidence. The fact that a model predicts motor failure or battery degradation does not yet prove that the overall drone operation has become safer. This requires a security justification; that is a structured security argument that demonstrates which hazards the given technology reduces, under what conditions, and based on what evidence [15].

The role of PdM within a safety case can be described using the following logic:

hazard → failure mode → PdM indicator → decision threshold → evidence

For example:

loss of control → motor bearing wear → increase in vibration spectrum → RUL < 5 hours
→ flight prohibition

In this example, loss of control is the hazardous system state, motor bearing wear is the failure mode, the increase in the vibration spectrum is the condition indicator detected by PdM, and RUL < 5 hours is the decision threshold below which the drone may no longer be permitted to fly.

The previously described FMEA is suitable, for example, for analysing motor bearing wear, ESC overheating, battery cell weakening, propeller cracking, or IMU drift. FMEA fits well with PdM because both start from the condition of individual components [15].

4. Conclusion

A complex system of drone reliability and maintainability metrics is essential for the efficient and safe operation of modern drone fleets. In addition to the basic MTBF and MTTR indicators, drone-specific metrics (MTBF, MCBF, DR) provide a more accurate picture of the real operational reliability of drones. Advanced technologies like PdM and digital twin [8] enable predictive maintenance and proactive improvements in reliability. The integration of artificial intelligence and blockchain technology in the future [11] will further increase the accuracy and usability of drone reliability metrics, which will contribute to a safer and more economical use of drone technology in both civilian and military areas.

References

- [1] B.S. Dhillon, *Reliability, Quality, and Safety for Engineers*. Boca Raton, CRC Press, 2004. Online: <https://doi.org/10.1201/9780203006139>
- [2] K. Dalamagkidis, "Definitions and Terminology," in *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, K. P. Valavanis, G. J. Vachtsevanos eds., Dordrecht, Springer, 2015, pp. 43–55. Online: https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1_92
- [3] International Electrotechnical Commission, *IEC 60050 – International Electrotechnical Vocabulary – Search results (by Area)*. Online: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=192>
- [4] International Electrotechnical Commission, *Details for IEV number 192-05-11: "mean operating time to failure"*. Online: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=192-05-11>
- [5] ISO, *ISO 26262-1:2018, Road Vehicles – Functional Safety*. Online: <https://www.iso.org/standard/68383.html>
- [6] M. Lange, *DO-254 Overview, Pros, Cons, and Discussion*, 2009. Online: https://nepp.nasa.gov/mapld_2009/talks/083109_Monday/01_Lange_Michelle_mapld09_pres_1.pdf
- [7] J. O'Reilly, "Will MTBF Kill Drone Delivery?," *EE Times*, 13 July 2017. Online: <https://www.eetimes.com/will-mtbf-kill-drone-delivery/>
- [8] Q. Qi et al., "Enabling Technologies and Tools for Digital Twin," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 58, pp. 3–21, 2021. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- [9] RTCA, *DO-178C Documents & Supplements*, 2011. Online: <https://www.rtca.org/do-178/>
- [10] D. H. Doughty, *SAE, SAE J2464 "EV & HEV Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing Procedure"*. Technical Paper, SAE International, 2010. Online: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1077>
- [11] D. Wanner, H. A. Hashim, S. Srivastava, and A. Steinhauer, "UAV Avionics Safety, Certification, Accidents, Redundancy, Integrity, and Reliability: A Comprehensive Review and Future Trends," *Drone Systems and Applications*, Vol. 12, pp. 1–23, 2024. Online: <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0091>
- [12] E. Ancel, S. D. Young, C. C. Quach, R. F. Haq, K. Darafsheh, K. M. Smalling, S. L. Vazquez, E. T. Dill, R. C. Condotta, B. E. Ethridge, L. R. Teska, and T. A. Johnson, "Design and Testing of an Approach to Automated In-Flight Safety Risk Management for sUAS Operations," *AIAA AVIATION 2022 Forum*, June 2022. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2022-3459>
- [13] OEE, *World-Class OEE: Set Targets to Drive Improvement*. Online: https://www.oee.com/world-class-oe/?utm_campaign=1195&utm_content=v1&utm_medium=email&utm_source=vorne
- [14] EASA, *Specific Operations Risk Assessment (SORA)*. Online: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/specific-category-civil-drones/specific-operations-risk-assessment-sora>
- [15] International Electrotechnical Commission, *IEC 60812:2018*. Online: <https://webstore.iec.ch/en/publication/26359>

A pilóta nélküli eVTOL légi járművek megbízhatósági mutatói

A személyzet nélküli eVTOL légi járművek, vagy más néven drónok, megbízhatósági és karbantarthatósági mutatóinak fejlett rendszere elengedhetetlen a biztonságos és hatékony üzemeltetéshez. Az alapvető mérőszámok mellett a drónra jellemző metrikák pontosabb képet adnak. A prediktív karbantartást lehetővé tevő technológiák, mint az állapotfelügyelet és a digitális iker, kulcsfontosságúak. A jövőben a mesterséges intelligencia tovább fogja javítani ezek hatékonyságát, elősegítve a drónok szélesebb körű, biztonságos alkalmazását.

Kulcsszavak: drón, eVTOL, megbízhatóság, smart city, nagyvárosi légi mobilitás, fejlett légi mobilitás

Terpecz Gábor, MSc egyetemi tanársegéd Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék terpecz.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837	Gábor Terpecz, MSc Assistant Lecturer Óbuda University Faculty of Instrumentation and Automation Institute of Electronics and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation terpecz.gabor@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0001-7899-2837
Schuster György, PhD tanszékvezető, egyetemi docens Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670	György Schuster, PhD Head of Department, Associate Professor Óbuda University Faculty of Instrumentation and Automation Institute of Electronics and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation schuster.gyorgy@kvk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-8573-3670

Jevuczó Gábor, Bauer Péter

Mágneses szenzorhibák monokamerakép-alapú detektálása pilóta nélküli légi járműveken valós repülési adatok felhasználásával

A modern inerciális mérőegységekbe integrált magnetométerek alapvető szerepet játszanak a pilóta nélküli légi járművek irányítási és navigációs rendszereiben. Ebből fakadóan a meghibásodásuk detektálása kulcsfontosságú feladat a megbízható navigáció biztosítása és a repülés biztonságának fenntartása érdekében. Ezen feladat megoldására ígéretes megközelítés a fedélzeti kamera használata, ugyanis a mai drónok többsége az IMU- és GNSS-szenzorok mellett kamerával is fel van szerelve különböző funkciók (például felvétel készítése) ellátása céljából. Ebből fakadóan ennek a munkának a célkitűzése egy mágneses szenzormeghibásodást detektáló algoritmus kifejlesztése monokameraképek felhasználásával. A kutatás során egy monokamera képén alapuló IMU-magnetométer-hibadetektálási módszert fejlesztettünk ki, amelyet valós repülési adatokon teszteltünk. A monokamera felvételekből a kamera relatív elfordulását két egymást követő képkocka között a homográfia vagy az esszenciális mátrixok segítségével határoztuk meg. Az így meghatározott kumulált forgatási mátrix felhasználásával egy mágneses szenzorhibák detektálására szolgáló módszert dolgoztunk ki, amely egy fel-le számlálón és határértékeken alapuló döntési mechanizmuson alapul. Az IMU által szolgáltatott valós mágneses mérésekben három különböző típusú, a valóságban is előforduló hibát generáltunk mesterségesen, és a kidolgozott módszer mindhárom hibatípust sikeresen detektálta.

Kulcsszavak: pilóta nélküli légi járművek, inerciális mérőegység, magnetométer-hibadetektálás, monokamera, szenzorhiba-detektálás, valós repülési adatok

1. Bevezetés

A pilóta nélküli légi járművek (UAV¹-k) biztonságos működésének és megbízható navigációjának egyik kulcsfontosságú eleme a fedélzeti szenzorok helyes működése. Az inerciális mérőegységek (IMU²-k) alapvető szerepet töltenek be a drónok állapotbecslésében, mivel ezek segítségével határozható meg a jármű sebessége, orientációja és pozíciója. A kereskedelemben elérhető

¹ Unmanned Aerial Vehicle: pilóta nélküli légi jármű.

² Inertial Measurement Unit: inerciális mérőegység.

UAV-k többsége MEMS³-alapú, kilenc szabadságfokú inerciális mérőegysége(ke)t alkalmaz, amely háromtengelyes gyorsulásmérőt, giroszkópot és magnetométert tartalmaz [10].

Egy IMU-ban található háromtengelyes magnetométer a Föld mágneses terét három egymásra merőleges tengely mentén méri, ezáltal információt szolgáltat a szenzor környezetében jelen lévő mágneses tér nagyságáról és irányáról. Amennyiben a környezetben érzékelhető mágneses teret nem éri zavarás, abban az esetben a mért értékek a Föld mágneses terének valós komponenseit tükrözik, és felhasználhatók a légi jármű orientációjának meghatározására.

Ugyanakkor ezeket a méréseket torzíthatják a környezetben jelen lévő lokális mágneses anomáliák, a szenzor gyártási pontatlanságai, más elektromos eszközök által keltett elektromágneses terek, valamint maga a szenzor meghibásodása [21]. Az ilyen zavarok ronthatják az UAV-k navigációs és irányítási rendszereinek pontosságát, ami kiemeli a magnetométerek kalibrációjának és hibadetektálásának fontosságát. Jelen munka az utóbbi problémakört vizsgálja, míg a magnetométer kalibrációjáról egy részletes leírás a [18] forrásban található.

Számos orientációbecslő módszer szenzorfüztiót és/vagy szűrő algoritmusokat alkalmaz a mágneses zavarok hatásának csökkentése céljából [1], [4], [16], [24]. Azonban ezen módszerek alkalmazása korlátokba ütközhet, amennyiben a zavarok mértéke egy bizonyos szintet meghalad, vagy ha a szenzor meghibásodik, mert ezen esetekben zavarkompenzációs képességük jelentősen lecsökken [4], [24]. Ennek következtében a mágneses zavarok és a szenzorhibák detektálása nélkülözhetetlen feladat.

A probléma kezelésének egyik lehetséges megközelítése a mágneses mérések megbízhatatlanságának detektálása. Ennek egyik módszere a mágneses lehajlás (mágneses inklináció) és a mágneses vektor nagyságának felhasználása, valamint ezek várható értékétől való eltérésének folyamatos vizsgálata [5], [15], [22], [23].

A [22] forrásban a szenzort körülvevő mágneses teret három kategóriába sorolják a mágneses lehajlás alapján: standard; stabil, de nem standard; illetve változó zavarokat tartalmazó mágneses tér. Ezt követően a referenciavektort a becslő algoritmus mágneses mérési modelljében, a detektált mágneses tér kategóriájának megfelelően adaptívan módosítják, és ezáltal jobb irányszögbecslést érnek el.

A [5], [15], [23] munkákban a mágneses lehajlást a gyorsulásmérő és/vagy a magnetométer mérései alapján számítják ki, majd az így kapott értéket a World Magnetic Model⁴ (WMM) alapján számított referenciaértékkel hasonlítják össze.

A [24] forrás két szűrőből álló megközelítést alkalmaz: az úgynevezett elsődleges szűrő figyelembe veszi a mágneses méréseket a pozíció-, orientáció- és sebességállapotok becslése során, míg a másodlagos szűrő a mágneses mérések felhasználása nélkül becsüli az állapotokat. Ha pedig mágneses zavart detektálnak, abban az esetben a másodlagos szűrő által szolgáltatott irányszögbecslés felülírja az elsődleges szűrő kimenetén a becsült irányszöget. A zavarok detektálására új döntési algoritmust vezettek be, amely a Mahalanobis-távolságon és a Chi-négyzet-próbán alapul. Továbbá bemutatják azt is, hogy az eredményeik szerint a mágneses zavarok az elsődleges szűrő irányszögbecslésében jelentős becslési hibákat okoznak.

³ *Micro-Electro-Mechanical Systems*: mikro-elektromechanikai rendszerek.

⁴ *World Magnetic Model*: világ mágneses modell.

Neurális hálózatokon alapuló módszerek is léteznek. A [2] forrás egy új, automata mágneses zavar detektálási módszert mutat be, ahol a bemenő adat a mágneses mérés, a kimenet pedig a mágneses zavarok a *poszteriori* valószínűsége egy idősorba rendezve.

Reziduális alapú küszöbölési hibadetektálási módszer is létezik [8]. Ebben a munkában két kiterjesztett Kálmán-szűrőt (EKF⁵) alkalmaznak: az egyiket a pozíció- és sebességállapotok becslésére, míg a másikat az orientáció becslésére. A mágneses szenzorhibák detektálását az orientációbecslő EKF reziduáljának vizsgálatával végzik, amelyet valós adatokon, mesterségesen generált hibák segítségével tesztelnek. A hibadetektálás küszöbértékét a reziduál minimum- és maximumértékei alapján határozzák meg: amennyiben a reziduál meghaladja ezt a küszöbértéket, a szenzort hibásnak tekintik.

Számos orientációbecslő módszer validációja optikai mérőrendszerek alkalmazásával történik [4], [16], [20], [22], amelyek optikai markerek és kamerák segítségével biztosítanak referenciaorientációt. Ugyanakkor a kamera relatív orientációja két egymást követő képkocka között speciális markerek alkalmazása nélkül is meghatározható, kizárólag monokamera-képfelvételek alapján. Ennek megfelelően jelen munka célja egy olyan mágneses szenzorhiba-detektáló algoritmus kidolgozása, amely képes a mágneses szenzorhibák detektálására multikopterrel, valós repülési tesztek során rögzített monokamera-képfelvételek felhasználásával.

A cikk fő hozzájárulása egy új hibadetektálási módszer, amely a monokamera-képfelvételekből meghatározott kumulált forgatási mátrixon alapul. Tudomásunk szerint ez az első olyan tanulmány, amely monokameraképeket használ mágneses szenzorhibák detektálására. A szakirodalomban korábban bemutatott módszerekkel ellentétben a javasolt eljárás nem támaszkodik GNSS⁶-szenzorokra, amelyek érzékenyek mind a szándékos zavarásokra (például *spoofing*⁷ és *jamming*⁸), mind pedig a nem szándékos zavarokra (például GNSS-mentes környezet).

2. Repülési adatok és képfeldolgozás

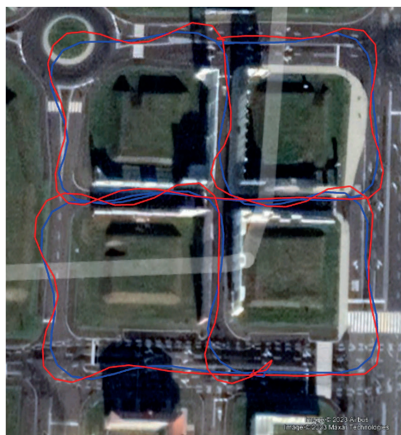
Ebben a munkában két különböző repülés során készült valós kamera- és szenzoradatokat vizsgáltunk, amelyek egy DJI M600 Pro típusú multikopterre rögzített, ferdén előre néző Basler acA2040-35gc kamerával készültek a Zala-ZONE Smart City felett. A két repülés útvonalai az 1. ábrán láthatók. Bár multikopterrel repültünk, azt repülőgépszerű dinamikával bedöntéseket alkalmazva vezettük végig a megadott pályán, hogy a rögzített kamera-képeken nagyobb mozgások legyenek, és így a kidolgozott képfeldolgozási módszerek szélesebb körben alkalmazhatóvá váljanak.

⁵ Extended Kalman Filter.

⁶ Global Navigation Satellite System: a globális műholdas helymeghatározó rendszer.

⁷ GNSS Spoofing: GNSS-jelhamisítás, navigációs rendszer megtévesztése hamis jelekkel.

⁸ GNSS Jamming: GNSS-zavarás, műholdas helymeghatározó jelek zavarása.



1. ábra

A vizsgált repülések útvonalai ZalaZONE Smart City felett, kék vonallal az 539-es repülés és piros vonallal az 540-es repülés [a szerzők Google Earth felhasználásával]

A drón mindkét repülés kezdetén a talajon állt (az 539-es repülés esetében 13 s-ig, az 540-es esetében 31 s-ig). A felszállás után a drón egy rövid ideig a kezdeti pozícióban, a repülési magasságon – amely a repülés időtartama alatt konstans 35 m – lebeg, majd ezt követően megkezdte az előre definiált pályák követését (az 539-es esetében 49 s-től, az 540-es esetében 66 s-től). A hosszirányú sebesség mindkét repülés során konstans 5 m/s. A két repülés közötti különbséget a fordulók során alkalmazott maximális bedöntési szög adja: az 539-es repülés esetében 10° , míg az 540-es repülésnél 15° . Az IMU-méréseket 50 Hz-es mintavételi frekvenciával rögzítettük, majd azokat a 10 FPS⁹ sebességű kamerafelvételekhez igazítva 10 Hz-en mintavételeztük újra.

A javasolt hibadetektálási algoritmushoz szükséges a kamera két egymást követő képkocka közötti relatív elfordulásának becslése. A relatív elfordulás meghatározása többféle módszerrel történhet, attól függően, hogy milyen geometriai viszonyok jellemzik a kamera látómezőjében megjelenő pontokat. Amennyiben a jellemzőpontok egy síkban helyezkednek el, a relatív elfordulás a homográfia mátrixból becsülhető. Ha azonban a jellemzőpontok térbeli eloszlásúak, vagyis nem egy síkra illeszkednek, akkor az esszenciális mátrix alkalmazása indokolt.

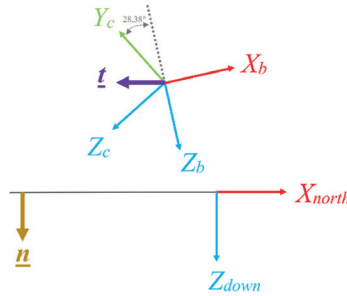
Ezen mátrixok meghatározásához első lépésként jellemzőpontokat detektálunk az első szürkeárnyaltos képen a Shi-Tomasi sarokdetektor segítségével [17]. Ezt követően meghatározzuk, hogy ezek a pontok a következő képkockán hova mozdulnak el, a Lucas–Kanade optikai áramlás algoritmus alkalmazásával [12]. Előfordulhat azonban, hogy ezek a párosítások hibásak, például a pixelintenzitás változása vagy a túl nagy elmozdulások következtében. Ennek a problémának a kezelésére az optikai áramlást visszafelé is kiszámítjuk, és a hibás párosításokat eltávolítjuk [11], majd ezt követően a szűrt jellemzőpontokon elvégezzük a lencsetorzítás korrekcióját.

A szűrt és párosított jellemzőpontok felhasználásával a kamera relatív mozgása kétféleképpen becsülhető. Az egyik lehetőség a homográfiamátrix meghatározása a findHomography

⁹ Frames Per Second: képkocka/másodperc.

OpenCV függvény alkalmazásával, amely a [13] alapján egy forgatási mátrixra és egy transzlációs irányvektorra bontható. Alternatív megoldásként az esszenciális mátrix számítás is alkalmazható a findEssentialMat OpenCV függvény segítségével, amelyet a [3] szerint szintén egy forgatási mátrixra és egy transzlációs irányvektorra bontunk fel.

Ebben a munkában az esszenciális és a homográfiamátrix közötti váltás a repülési magasság alapján történt, azonban a szakirodalomban több megoldás is létezik a kettő közötti automatikus kiválasztásra [6], [19]. A földön állás és a felszállás során az esszenciális mátrixot számítjuk ki. Amint azonban a drón eléri a repülési magasságot, a homográfiamátrixot, mivel ezen a magasságon a jellemzőpontok közelítőleg egy síkban lévőknek tekinthetők a kamera és a pontok közötti megnövekedett távolság következtében.



2. ábra

Az alkalmazott koordináta-rendszerek: a kamerarendszer (C: $Y_c Z_c$), a test koordináta-rendszer (B: $X_b Z_b$), valamint a Földhöz rögzített (North-East-Down) rendszer (E: $X_{north} Z_{down}$) [a szerzők]

A 2. ábra az alkalmazott koordináta-rendszereket szemlélteti. A szokatlan konfiguráció oka, hogy a drón egyszerre több projektben is használva van, ezért további más eszközöket is felszereltek, amelyek egyébként a kamera látóterét kitakarnák. A kamera ezért a jármű hátulja felé van irányítva, így a repülések során a drón végig hátrafelé repült. Viszont ez a koordináta-rendszerek közötti transzformációk megfelelő definiálásával és következetes alkalmazásával nem okoz különösebb problémát.

A kamera két egymást követő képe közötti relatív elfordulás R_{C2C1} (az első kamerahelyzetből az azt követő második kamerahelyzetbe) meghatározását követően ebből – a javasolt hibadetektálási algoritmushoz – egy test- és földrendszer közötti forgatási mátrixot, R_{EB} , állítottunk elő.

A $k + 1$ -edik időpillanatban a test-föld forgatási mátrix, az R_{C2C1} mátrix transzponáltjának felhasználásával az alábbiak szerint írható fel:

$$R_{EB_{k+1}} = R_{EB_k} R_{BC} R_{C1C2_k} R_{CB} = R_{EB_k} \Delta R_k \quad (1)$$

ahol ΔR_k a drón két egymást követő képkocka (a k -edik és $k + 1$ -edik időpillanat) közötti elfordulását jelöli, és ez által az R_{EB_k} mátrix megváltozását fejezi ki. Mivel a kamera mereven van rögzítve – a drón vízszintes tengelyéhez képest $28,38^\circ$ -kal van lefelé döntve – az R_{BC} kamera- és testrendszer közötti forgatási mátrix egy állandó, fix transzformáció. Az R_{EB_k} pedig a test- és földrendszer közötti forgatási mátrix a k -edik időpillanatban.

Hasonlóan az (1)-es egyenlethez, a test-föld forgatási mátrix felírható a $k + 2$ -edik időpillanatra is.

$$R_{EB_{k+2}} = R_{EB_{k+1}} R_{BC} R_{C1C2_{k+1}} R_{CB} = R_{EB_k} R_{BC} R_{C1C2_k} R_{CB} R_{BC} R_{C1C2_{k+1}} R_{CB} \quad (2)$$

Az (1) és (2) egyenletek alapján felírható az N -edik időpillanatra is a test-föld forgatási mátrix, ahol a közbelső $R_{CB} R_{BC} = I$ tagok kiesnek.

$$R_{EB_{k+N}} = R_{EB_k} R_{BC} \left(\prod_{j=0}^{N-1} R_{C1C2_{k+j}} \right) R_{CB} = R_{EB_k} \Delta R_{k+N} \quad (3)$$

A $R_{EB_{k=1}}$ mátrix kezdeti értéke a DJI fedélzeti egysége által becsült Euler-szögekből meghatározható, majd ezt követően 20 s-es időközönként ugyanezen becslések alapján újrainicializálásra kerül, mivel egyébként a kameraadatokból számított kumulált becslés idővel elcsúszna. Mivel a fedélzeti szűrő maga is felhasználja a mágneses méréseket, mágneses hiba jelenléte esetén az újrainicializálás pontatlanná válhat. A probléma kezelésére a jövőben csúszó ablakos megoldás fejlesztésével szeretnénk kiegészíteni az itt bemutatott módszert.

3. Hibadetektáló eljárás

Ebben a fejezetben egy, a korábban meghatározott test-föld forgatási mátrixon alapuló mágneses szenzorhibák detektálására szolgáló módszert mutatunk be.

A kidolgozott módszer alapelve, hogy először meghatározunk egy átlagolt mágneses vektort, amelyet a föld koordináta-rendszerben rögzítünk (ez a rövid repülési távolságok miatt megtehető). Ezt követően minden időlépésben a kameraképből származtatott kumulatív forgatási mátrix segítségével a föld rendszerben rögzített kezdeti mágneses vektort vissza-transzformáljuk test koordináta-rendszerbe. A hibadetektálás minden időpillanatban a mért mágneses vektor és a transzformált mágneses vektor – mindkettő test koordináta-rendszerben kifejezve – összehasonlításán alapul.

3.1. A fix mágneses vektor becslése

Az átlagolt mágneses vektor meghatározása az IMU által testkoordináta-rendszerben mért mágneses vektor felhasználásával történik, miközben a drón a földön, álló helyzetben van. Ezzel párhuzamosan a DJI fedélzeti egysége által becsült Euler-szögek (ϕ, θ, ψ) is átlagolásra kerülnek. Az így kapott átlagolt Euler-szögek segítségével az átlagolt mágneses vektort föld rendszerbe transzformáljuk, ahol a repülés teljes időtartamára rögzítjük. Ezt a lépést kizárólag egyszer szükséges elvégezni, a felszállás előtt, amíg a drón álló helyzetben tartózkodik a földön. Ez kizárólag a rövid repülési pályák feltételezése mellett tehető meg. Hosszabb repülések esetén, például Budapest és Bécs vagy New York között, a kezdeti mágneses vektor jelentősen megváltozna, ugyanakkor a kis méretű drónok jellemzően lokálisan, kis távolságokon repülnek, ahol ez a feltételezés érvényes.

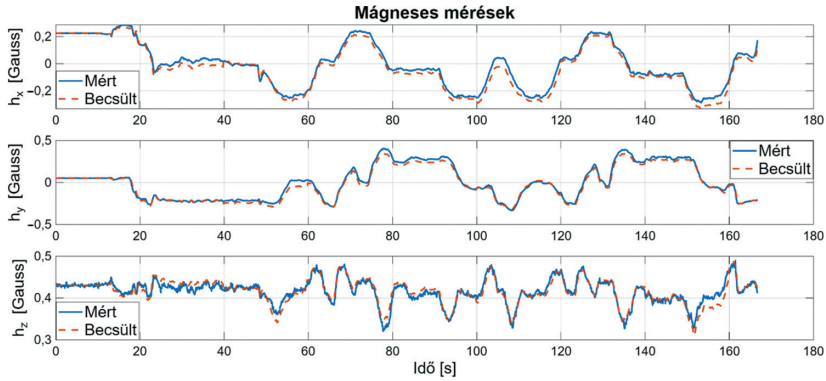
Jelöljük a test rendszerben mért átlagolt mágneses vektort $\bar{H}_{mért}^B$ -el, valamint az átlagolt Euler-szögekből számított forgatási mátrixot $R_{EB}(\bar{\phi}, \bar{\theta}, \bar{\psi})$ -vel, ekkor a föld koordináta-rendszerbe transzformált átlagolt mágneses vektor az alábbiak szerint számítható:

$$\bar{H}_{mért,rögzített}^E = R_{EB}(\bar{\phi}, \bar{\theta}, \bar{\psi}) \cdot \bar{H}_{mért,rögzített}^B \quad (4)$$

Ezt követően a k -adik időlépésben, a rögzített $\bar{H}_{mért,rögzített}^B$ mágneses vektort a kamera képeiből meghatározott R_{BE_k} kumulált forgatási mátrix transzponáltjával visszatranszformáljuk test koordináta-rendszerbe, amelynek eredményeként megkapjuk a k időpillanatra vonatkozó, test koordináta-rendszerbeli becsült mágneses vektort, $H_{becsült_k}^B$:

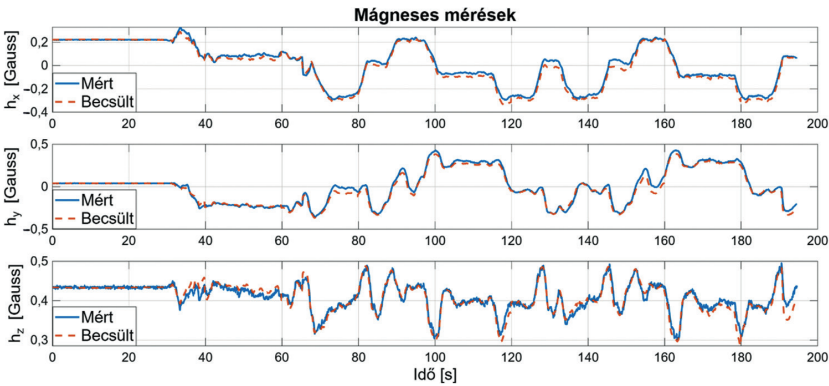
$$H_{becsült_k}^B = R_{BE_k} \cdot \bar{H}_{mért,rögzített}^E \quad (5)$$

Ennek a módszernek az alkalmazásával mesterségesen hozzáadott mágneses hiba nélkül és 20 s-es újrainicializálással, az 539-es repülésre a 3. ábrán, az 540-es repülésre a 4. ábrán látható eredmények adódtak.



3. ábra

A mért és becsült mágneses vektorok komponensei az 539-es repülés során [a szerzők]



4. ábra

A mért és becsült mágneses vektorok komponensei az 540-es repülés során [a szerzők]

1. táblázat
Az 539-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
1%	55,52 (1634)	31,76 (1637)	1,85 (1667)	1329,2	766,1	8,92	0,002	0,013	0,002
5%	34,29 (1446)	18,81 (1513)	1,85 (1667)	298,5	315,3	8,92	0,002	0,013	0,002
10%	17,35 (1128)	11,68 (1386)	1,85 (1667)	127,2	105,2	8,92	0,002	0,013	0,002

2. táblázat
Az 540-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
1%	33,05 (1935)	46,6 (1906)	1,92 (1945)	635,2	1642,7	12,13	0,031	0,008	7,2e-05
5%	24,36 (1867)	15,37 (1741)	1,92 (1945)	258,3	301,5	12,13	0,031	0,008	7,2e-05
10%	17,07 (1713)	13,14 (1294)	1,92 (1945)	128,3	171,9	12,13	0,031	0,023	7,2e-05

A 1. és 2. táblázat mutatja be a teljes repülésre vonatkozóan a mért és a becsült mágneses vektorok komponensei (h_x, h_y, h_z) között számított átlagos relatív hibát, a maximális relatív hibát, valamint a minimális relatív hibát. A relatív hiba számítása során problémát jelent, hogy a nullához közeli mért értékek esetén a nevező nagyon kicsivé válik. Ebből fakadóan a relatív hibát különböző küszöbértékek mellett is kiértékeljük. Egy adott időlépésben a komponenst csak akkor vettük figyelembe, ha annak abszolút értéke meghaladta a mért mágneses vektor hosszának adott százalékát (1%, 5%, 10%). Ez lehetővé teszi annak vizsgálatát, hogy a nullához közeli komponensek milyen mértékben befolyásolják a relatív hibát.

Az 1. és 2. táblázatban az átlagos relatív hibák mellett zárójelben látható azon időlépéseknek a száma is, amelyekben a relatív hibát ténylegesen kiértékeljük. Az összes időlépés száma a h_z komponens mögötti zárójelben látható, mivel ez a komponens egyik repülés során sem vesz fel nulla közeli értéket, így annak relatív hibája nem is függ a választott százaléktól.

3. táblázat
Az 539-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
0,2 [Gauss]	9,05 (598)	9,18 (869)	1,85 (1667)	31,28	23,9	8,92	0,002	0,013	0,002

4. táblázat
Az 540-es repülés relatív hibái [a szerzők]

Küszöb	Átlagos relatív hiba [%]			Maximum relatív hiba [%]			Minimum relatív hiba [%]		
	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z	h_x	h_y	h_z
0,2 [Gauss]	5,97 (887)	7,59 (897)	1,92 (1945)	32,24	44,78	12,13	0,031	0,023	7,2e-05

Az átlagos és a maximális relatív hibák nagy értékeit elsősorban a nullához közeli mért értékek, valamint a tranziens szakaszokban – például a drón elfordulásakor a felfutó és lefutó élek mentén – fellépő kismértékű késések okozzák. Ebből fakadóan a relatív hibát 0,2 Gauss feletti tartományban is kiértékeljük – ahol ezek a torzító hatások már nem dominálnak –, azaz csak akkor számítottuk a relatív hibákat, amikor az adott komponens abszolút értéke 0,2 Gauss feletti értéket vett föl. Ennek eredményeit tartalmazza a 3. és 4. táblázat. Az így szűrt adatok alapján megállapítható, hogy a becslések pontossága megfelelő, mivel az átlagos relatív hibák 10% alatt maradnak, ezért ezek a becslések felhasználhatók IMU mágneses mérések hibáinak vizsgálatára. Fontos továbbá ismételtlen megjegyezni, hogy itt a becslés során a test-föld transzformációt 20 s-enként újrainicializáljuk.

3.2. Mágneses szenzorhibák típusai és döntéshozatal

A [8] és [24] irodalmak alapján a következő mágneses szenzorhibákat vizsgáltuk:

1. Szenzor teljes meghibásodása: a hiba beállta után a szenzor kimenete zérus.
2. Szenzor beragadása konstans értéken: a hiba beállta után a szenzor kimenete a legutolsó konstans érték.
3. *Drift* típusú szenzormeghibásodás: a hiba beállta után a szenzor kimenete időben lineárisan, állandó meredekséggel változik (*driftel*).

A fentebb felsorolt hibákat kizárólag egyetlen szenzor mért értékein állítottuk elő mesterségesen, annak ellenére, hogy a DJI M600 Pro drón három egymástól független IMU-szenzorral rendelkezik. Ennek oka, hogy a DJI fedélzeti egysége mindhárom IMU-hoz külön Euler-szöveget becsül, amelyek között jelentős eltérések figyelhetők meg (egyet választ fő forrásnak, a többi igazából csak tartalékként szerepel), és mivel a test-föld transzformáció 20 s-es időközönként ugyanezen becslések alapján újrainicializálódik, a különböző szenzorok adatait felhasználó becslések, ebben az esetben, nem lennének összehasonlíthatók.

A fentebbi hibák detektálására egy fel-le számlálót használó reziduál alapú küszöbölési hibadetektálási módszert alkalmaztunk. Ez a módszer széles körben használt a hibadetektálás területén [7], [11], [14]. A módszer alapelve, hogy minden időpillanatban egy reziduált képezünk a mért $H_{mért}^B = (h_{x,mért}^B, h_{y,mért}^B, h_{z,mért}^B)^T$ és a becsült mágneses vektorok $H_{becsült}^B = (h_{x,becsült}^B, h_{y,becsült}^B, h_{z,becsült}^B)^T$ között. A reziduál a mért és a becsült mágneses vektorok komponensei közötti eltérések abszolút értékeinek összegeként (1-es vektor norma) kerül definiálásra, az alábbi módon:

$$r = |h_{x,mért}^B - h_{x,becsült}^B| + |h_{y,mért}^B - h_{y,becsült}^B| + |h_{z,mért}^B - h_{z,becsült}^B| \quad (6)$$

Ezután a reziduálra bevezetünk egy *Tol1* küszöbértéket, és ha ez a reziduál nagyobb, mint ez a bizonyos határérték, akkor egy számláló értékét növeljük egy előre meghatározott *U* értékkel; viszont, ha kisebb, mint a határérték, csökkentjük az értékét egy előre meghatározott *D* értékkel. Ezeknek az *U* és *D* értékeknek nem kell szükségszerűen azonosnak lenniük. Itt a számlálóra egy zérus alsó korlátot alkalmazunk – azaz nem lehet negatív az értéke –, továbbá egy felső korlát is definiálható, azonban ebben a munkában ezt nem alkalmaztuk.

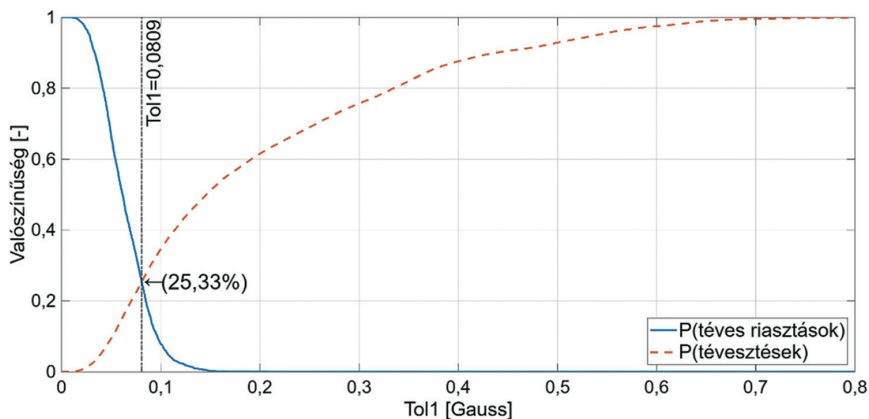
Majd erre a számlálóra is bevezetünk egy $Tol2$ határértéket, és abban az esetben, ha a számláló átlépi ezt az értéket, akkor a szenzort hibásnak tekintjük.

A $Tol1$ reziduál küszöbértéke a hibadetektálás érzékenységét, vagyis a detektálható legkisebb eltérés nagyságát határozza meg, míg a $Tol2$ számláló küszöbértéke a zajokból vagy a becslésben megjelenő hibákból adódó téves riasztások elnyomását szolgálja. Azért előnyös ez a megoldás, mert kisebb hibák detektálására is alkalmas – szemben egy egyszerű határérték használatával –, miközben hatékonyabban szűri a zajokból eredő téves riasztásokat. A következő alfejezet a határértékek hangolását, valamint a hibadetektálási eljárás eredményeit mutatja be.

3.3. Határértékek hangolása

A munka során a képfeldolgozást és a mágneses vektor becslését Python környezetben implementáltuk és futtattuk, míg a küszöbértékek hangolása, a hibák generálása, valamint a hibadetektálás tesztelése MATLAB-környezetben történt. Minden számítást offline végeztünk.

A [9] és [11] alapján a $Tol1$ küszöbérték hangolása a téves riasztások (False Alarm [FA]) és a tévesztések (Missed Detection [MD]) valószínűségi eloszlásai alapján történt, amely eloszlások a 5. ábrán láthatók.



5. ábra

Téves riasztások és a tévesztések valószínűségi eloszlásai [a szerzők]

A tévesztések arányának meghatározásához bevezettük a $P(data < Tol1 | error)$ valószínűséget, amely azt fejezi ki, hogy milyen gyakorisággal nem lépi át a reziduál a $Tol1$ küszöbértéket, miközben a szenzor hibás. Ez úgy határozható meg, hogy megszámoljuk mindkét repülés esetén, hányszor nem lépi át a hibás reziduál a $Tol1$ értéket, majd ezt elosztjuk azon időlépések számával, amelyekben a hiba fennállt.

A $P(data < Tol1 | error)$ meghatározásához mindkét repülésben „beragadás konstans értéken” típusú hibák lettek mesterségesen előállítva a mágneses vektor mindhárom komponensében egyenként. Az 539-es repülésnél a hibák 70 s és 150 s közötti intervallumban,

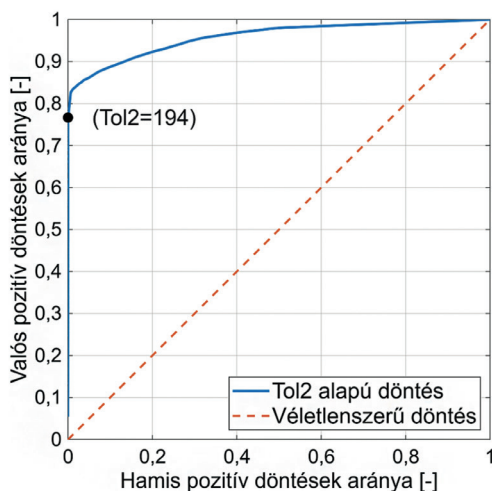
míg az 540-es repülésnél 70 s és 170 s közötti intervallumban lettek előállítva 5 s-ként eltolva a hibaaktiválás idejét. Ennek megfelelően például a h_x komponens esetében az 539-es repülés során összesen 17 hiba történt, tehát első esetben 70 s-nél majd a következő esetben 75 s-nél és így tovább egészen 170 s-ig, 5 s-enként eltolva a hibaaktiválás idejét. A hiba az aktiválást követően a repülés végéig fennmaradt.

Mind a 114 esetre – összesen 114 konstans értéken történő beragadás a két repülés három mágneses vektor komponensében (az 539-es repülés esetén 3×17 eset, az 540-es repülésnél 3×21 eset) – megszámloljuk, hogy a hibás reziduál hányszor nem lépi át a Tol1 küszöbértéket, majd ezt elosztjuk az összes olyan időlépés számával, amelyekben a hiba fennállt.

Továbbá a téves riasztások arányának meghatározásához bevezettük a $P(data > Tol1 | no\ error)$ -t, amely azt fejezi ki, hogy milyen gyakorisággal lépi át a reziduál a Tol1 küszöbértéket, miközben a szenzor hibamentes. Ez úgy határozható meg, hogy megszámloljuk mindkét repülés esetén, hányszor lépi át a hibamentes reziduál a Tol1 értéket, majd ezt elosztjuk az összes időlépés számával.

A $P(data < Tol1 | error)$ és a $P(data > Tol1 | no\ error)$ valószínűségeket több különböző Tol1 értékre – 0 és 0,8 Gauss között – kiszámítva az 5. ábrán látható görbék állíthatók elő. Mind a téves riasztások, mind a tévesztések aránya a két görbe metszéspontjában éri el a minimum-értékét, ezért a Tol1 – 0,0809 Gauss-érték került kiválasztásra, ahol mind a téves riasztások és tévesztések aránya 22,92%.

A Tol2 érték hangolásához egy Receiver Operating Characteristic (ROC) görbét használtunk. Az ROC-görbe a hamis pozitív döntések arányának (False Positive Rate, FPR) – azaz amikor a szenzorunk nem hibás, de mégis hibásnak ítéljük – függvényében ábrázolja a valós pozitív döntések arányát (True Positive Rate, TPR) –, azaz amikor a szenzorunk hibás, és hibásnak is ítéljük – különböző küszöbértékek mellett.



6. ábra

ROC-görbe az optimális Tol2 érték meghatározásához [a szerzők]

A hamis pozitív döntések arányának meghatározásához a hibamentes jel fel-le számlálóján mindkét repülés esetén megszámloljuk, hányszor haladja meg a számláló a $Tol2$ értéket, majd ezt az értéket elosztjuk a hamis pozitív és a valós negatív döntések számának az összegével.

A valós pozitív döntések arányának meghatározásához az eredeti jelen ugyanazon „beragadás konstans értéken” típusú hibák lettek 5 s-es eltolással előállítva mindkét repülésben, amelyeket a $Tol1$ hangolása során már ismertettem. Mind a 114 esetben a hibás jel fel-le számlálóján megszámloljuk, hogy hányszor haladja meg a számláló a $Tol2$ értéket, majd ezt az értéket elosztjuk a valós pozitív és a hamis negatív döntések számának összegével.

Mind a hamis pozitív döntések arányát, mind a valós pozitív döntések arányát $U-2, D-1$ és $Tol1 = 0,0809$ Gauss-paraméterek mellett 0 és 1500 közötti küszöbértékekkel határoztuk meg, amelynek eredményeként a 6. ábrán látható ROC-görbe adódott. A számláló határértékét az y tengely metszéspontjaként definiáltuk, ahol a valós pozitív döntések aránya maximális, miközben a hamis pozitív döntések aránya zérus. Ez a metszéspont a $Tol2 = 194$ értéket adta, amelynél a hamis pozitív arány $FPR = 0$, míg a valós pozitív arány $TPR = 0,7661$.

3.4. A hibadetektálás eredményei

A bemutatott hibadetektálási algoritmust a bemutatott két különböző repülésen teszteltük, $U-2, D-1$ és $Tol1 = 0,0809$ Gauss és $Tol2 = 194$ paraméterek mellett, miközben az algoritmus párhuzamosan futott a hibamentes és a hibás szenzoradatokon. A 5. táblázat tartalmazza a hiba bekövetkezése és a detektálása között eltelt időket.

5. táblázat
Hibadetektálási időtartamok [a szerzők]

Hiba típusa		Repülés 539	Repülés 540
Szenzor teljes meghibásodása	h_x	7,2 s + 0,1 s	13 s + 0,5 s
	h_y	7,2 s + 0,1 s	9,7 s + 0,1 s
	h_z	7,2 s + 0,1 s	19 s + 0,1 s
Konstans értéken beragadás	h_x	7,2 s + 0,1 s	9,7 s + 0,1 s
	h_y	7,2 s + 0,1 s	10,3 s + 0,1 s
	h_z	7,2 s + 0,1 s	8,7 s + 0,0 s
Drift (0,003 [Gauss/s])	h_x	10,2 s + 0,4 s	17,8 s + 0,1 s
	h_y	10,2 s + 0,4 s	17,8 s + 0,1 s
	h_z	15,1 s + 0,6 s	18,4 s + 0,1 s
Drift (0,01 [Gauss/s])	h_x	7,2 s + 0,1 s	13,1 s + 0,5 s
	h_y	7,2 s + 0,1 s	13,1 s + 0,5 s
	h_z	8,5 s + 0,1 s	13,1 s + 0,5 s

Fontos megjegyezni, hogy az előző szakaszban bemutatott hangolás mindkét repülés adatainak felhasználásával történt, és a 5. táblázatban szereplő detektálási idők ehhez a kombinált hangoláshoz tartoznak. Ugyanakkor az 5. táblázat azt is bemutatja, hogyan változnak a detektálási idők, amennyiben az algoritmust kizárólag csak az 539-es repülés (narancsszínnel jelölve) vagy kizárólag az 540-es repülés (kék színnel jelölve) felhasználásával hangoljuk.

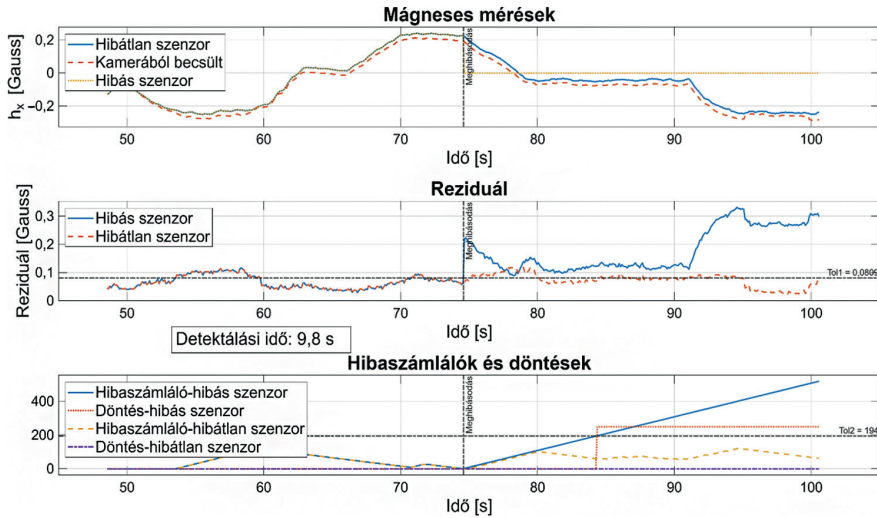
Ha csak az egyik esetre történik hangolás, akkor a másik repülésről az algoritmus nem rendelkezik információval. Ez lehetőséget ad annak vizsgálatára, hogy ilyen körülmények között hogyan változnak a detektálások.

Ebben az esetben természetesen a hangolt paraméterek is eltérnek: az 539-es repülésre hangolás az $U = 2$, $D = 1$, $Tol1 = 0,0794$ Gauss és $Tol2 = 204$ paramétereket eredményezi, míg a 540-es repülésre végzett hangolás az $U = 2$, $D = 1$, $Tol1 = 0,0827$ Gauss és $Tol2 = 194$ paramétereket eredményezi.

Megfigyelhető, hogy amikor az algoritmus hangolása kizárólag egyetlen repülés adatainak felhasználásával történik, akkor a detektálási idők növekednek, de nem jelentős mértékben. Ez összefügg a hangolt paraméterek kismértékű változásával is. Az 539-es repülésre hangolás a kombinált hangolásnál érzékenyebb, ugyanis a $Tol1$ reziduál küszöbérték kisebb, de hosszabb döntési időt igényel, ugyanis a $Tol2$ számláló küszöbértéke nagyobb értéket vesz fel. Ezzel szemben az 540-es repülésre hangolt paraméterek esetén a $Tol1$ nagyobb, ami kevésbé érzékeny, míg a $Tol2$ értéke azonos a kombinált hangolásával, ami így szintén lassabb döntéshozatalt jelent.

Ebből az következik, hogy a csak egy repülésre hangolt küszöbértékek kevésbé általánosíthatók, és egy másik repülés során lassabb hibadetektálást eredményeznek. Természetesen több repülési adat felhasználásával jobban általánosíthatók ezek a küszöbértékek, így gyorsabb detektálást tudnak biztosítani. Ugyanakkor a detektálási idők kismértékű növekedése, valamint a külön-külön hangolt küszöbértékeknek a kombinált hangolás paramétereitől való kismértékű szórása arra utal, hogy a módszer más repülések esetén is megfelelően alkalmazható.

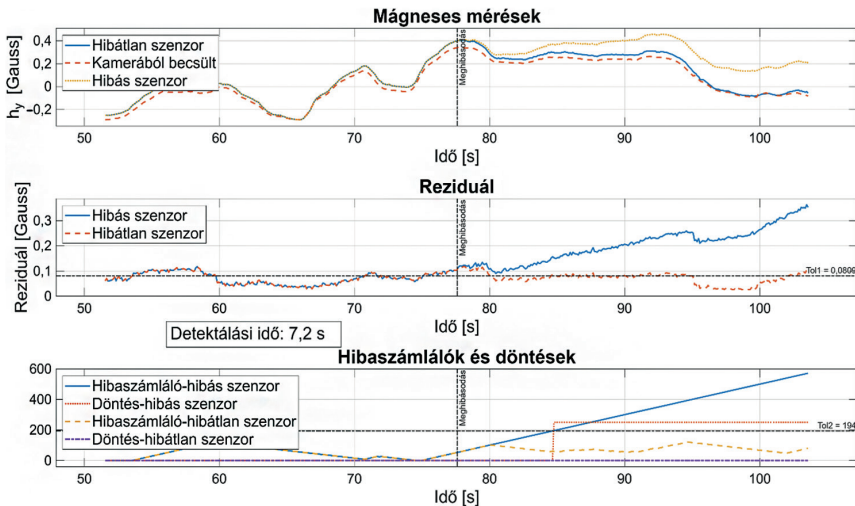
A kidolgozott módszer minden szenzorhibatípust sikeresen detektált. A detektálási idők 7,2 s és 19 s között változnak, és több esetben nagyon hasonlóak, ami annak köszönhető, hogy ha a meghibásodás pillanatában a számláló értéke nulla, és nincs lefelé történő számlálás, akkor a $Tol2 = 194$ érték eléréséhez – a leggyorsabb detektáláshoz – 9,8 s-re van szükség, figyelembe véve az $U = 2$ felfelé számlálási lépésközt és a 10 Hz-es mintavételezést, amely 0,1 s-es időlépéseket eredményez. Egy ilyen detektálás látható a 7. ábrán: egy teljes szenzormeghibásodás az 539-es repülés során. A hiba 74,5 s-nél aktiválódik, hatására a reziduál értéke jelentősen megnő és át is lépi a reziduál küszöbértékét. Ennek következtében a hibás szenzorhoz tartozó számláló nulláról monoton növekszik csökkenés nélkül, és 9,8 s alatt eléri a számláló küszöbértékét és jelzi is, hogy a szenzor meghibásodott.



7. ábra

Szenzor teljes meghibásodása 539-es repülés során a mágneses vektor x komponensében [a szerzők]

Továbbá, mivel minden hiba az adott repülésen belül az összes komponensre ugyanabban az időpillanatban (az 539-es repülés esetén 77,6 s-nél, a 540-es repülés esetén pedig 94,5 s-nél) került előállításra, mindhárom komponens és mindhárom hibatípus jobb összehasonlíthatósága érdekében, a hiba bekövetkezésekor a hibaszámlálók azonos kezdőértékről indulnak. Megjegyzendő, hogy a 7. ábrán látható detektálás nem szerepel az 5. táblázatban, mivel ebben az esetben a hiba aktiválási ideje az 539-es repülés során 74,5 s.

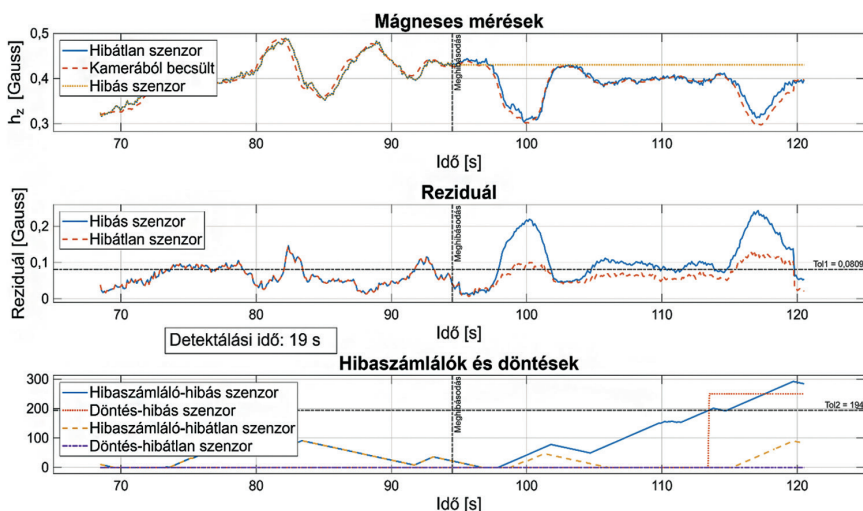


8. ábra

Drift típusú meghibásodás 539-es repülés során a mágneses vektor y komponensében [a szerzők]

Természetesen, ha a számláló egy magasabb értékről indul, akkor az gyorsabb detektálást eredményez, mint ahogy az a 8. ábrán is látható.

A *drift* típusú szenzorhibák esetén is a detektálási idők egymáshoz nagyon közel esnek. Ez abból adódik, hogy a hiba, a konstans *drift* sebesség következtében egyenletes ütemben növekszik. Ezzel szemben egy nagyobb *drift* sebesség esetén a hiba gyorsabban növekszik, ami a detektálási idők csökkenéséhez vezet.



9. ábra

Konstans értéken beragadás típusú meghibásodás 540-es repülés során a mágneses vektor z komponensében
[a szerzők]

A 9. ábra a leghosszabb detektálási esetet szemlélteti. Ebben az esetben egy beragadás konstans értéken típusú hiba lett létrehozva az 540-es repülésben. A hiba aktiválását követően a becsült mágneses vektor z komponense rövid ideig eltér, majd visszatér a hibás (beragadt) érték közelébe. Ekkor a számláló nem növekszik, sőt csökken, és csak a drón újbóli elfordulását követően, a megfelelő gerjesztés hatására válik detektálhatóvá a hiba.

Ez a jelenség a gerjesztés hiányára vezethető vissza. Ilyen esetekben, például egyenes vonalú repülés során, a gerjesztés hiánya megnövekedett detektálási időket eredményezhet. Ugyanakkor ez nem tekinthető a módszer hátrányának, ugyanis ez esetben a hibás szenzor még a valóságnak megfelelő értéket mutatja, és a hiba majd csak akkor válik detektálhatóvá, amikor a hibás érték ténylegesen eltér a valós értéktől, amely hibát a drón újbóli elfordulását követően lehetett detektálni.

4. Összefoglalás

Ebben a munkában egy monokamera képén alapuló IMU-magnetométer-hibadetektálási módszert fejlesztettünk ki, amelyet valós repülési adatokon teszteltünk. A felhasznált teszt-repülések rövid ismertetése után bemutattuk a szükséges képfeldolgozási lépéseket, amelyek a kamera két egymást követő képe közötti relatív elfordulás meghatározásához szükségesek.

A kameraképből nyert kumulált forgatási mátrix felhasználásával egy mágneses szenzorhibák detektálására alkalmas módszert dolgoztunk ki. A vizsgált szenzorhibák ismertetését követően ezeket a hibákat mesterségesen állítottuk elő valós szenzoradatokon, majd egy fel-le számlálót használó reziduál alapú küszöbölési módszerrel detektáltuk. A módszer hangolása a téves riasztások és tévesztések valószínűségi eloszlásai alapján, valamint egy Receiver Operating Characteristic görbe segítségével történt.

A kidolgozott módszer minden szenzorhibatípust sikeresen detektált. A detektálási idők 7,2 s és 19 s között változnak. Ugyanakkor egyes esetekben, amikor a hibás érték nagysága közel esik a mért értékhez, a gerjesztés hiánya hosszabb detektálási időket eredményezhet.

Ugyanakkor ez nem tekinthető a módszer hátrányának, ugyanis ez esetben a hibás szenzor még a valóságnak megfelelő értéket mutatja, és a hiba majd csak akkor válik detektálhatóvá, amikor a hibás érték ténylegesen eltér a valós értéktől, amely hibát a drón újbóli elfordulását követően detektáltuk is.

A módszer egyik korlátja, hogy a kumulált forgatási mátrixot 20 s-enként újra kell inicializálni a drón fedélzeti egysége által becsült Euler-szögekkel, amelyek meghatározására maga is felhasználja a mágneses méréseket. Ebből fakadóan a hibákat egy 20 s-es időablakon belül kell detektálni, amelyet a bemutatott módszer minden esetben teljesített. Ugyanakkor amennyiben a szenzor a 20 s-es időablakon belül hibásodik meg, és az újrainicializálás már a hibás Euler-szögekkel történik, akkor az a mágneses vektor hibás becsléséhez vezet. A jövőben ezt a problémát egy csúszó ablakos megoldással szeretnénk megoldani.

A jövőbeli munka során a homográfia és az esszenciális mátrix becslés közötti automatikus választás bevezetésével tervezzük az algoritmus továbbfejlesztését, illetve tervben van az algoritmus összevetése másfajta hibadetektálási megoldásokkal.

Felhasznált irodalom

- [1] B. Armstrong, E. Wolbrecht, D. B. Edwards, „AUV Navigation in the Presence of a Magnetic Disturbance with an Extended Kalman Filter,” In *Oceans’10 IEEE Sydney*, 2010, pp. 1–6. Online: <https://doi.org/10.1109/OCEANSSYD.2010.5603905>
- [2] E. A. Belalcazar-Bolaños, D. Torricelli, J. Pons, „Automatic Detection of Magnetic Disturbances in Magnetic Inertial Measurement Unit Sensors Based on Recurrent Neural Networks,” *Sensors*, 23. évf. 24. sz. 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/s23249683>
- [3] Q. Cai et al., „Equivalent Constraints for Two-View Geometry: Pose Solution/Pure Rotation Identification and 3D Reconstruction,” *International Journal of Computer Vision*, 127. évf. 2. sz. pp. 163–180. 2019. Online: <https://doi.org/10.1007/s11263-018-1136-9>
- [4] H. Chen, M. Schall, N. Fethke, „Effects of Movement Speed and Magnetic Disturbance on the Accuracy of Inertial Measurement Units,” *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61. évf. 1. sz. pp. 1046–1050. 2017. Online: <https://doi.org/10.1177/1541931213601745>
- [5] N. Gao, M. Y. Wang, L. Zhao, „A Novel Robust Kalman Filter on AHRS in the Magnetic Distortion Environment,” *Advances in Space Research*, 60. évf. 12. sz. pp. 2630–2636. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.04.012>

- [6] S. Gauglitz et al., „Live Tracking and Mapping from Both General and Rotation-Only Camera Motion,” In *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 13–22. 2012. Online: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2012.6402532>
- [7] J. Gertler, M. Costin, „Model-Based Diagnosis of Automotive Engines: Case Study on a Physical Vehicle,” *IFAC Proceedings*, 27. évf. 5. sz. pp. 393–402. 1994. Online: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)48059-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)48059-1)
- [8] G. Gopalratnam, C. Zorn, A. Koch, „Multisensor Data Fusion for Sensor Failure Detection and Health Monitoring,” In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. 2005. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2005-5843>
- [9] T. Grof, P. Bauer, „Voting-Based Fault Detection for Aircraft Position Measurements with Dissimilar Observations,” *IFAC-PapersOnLine*, 53. évf. 2. sz. pp. 14724–14729. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1841>
- [10] J. S. Jang, D. Liccardo, „Automation of Small UAVs Using a Low Cost Mems Sensor and Embedded Computing Platform,” In *2006 IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference*, pp. 1–9. 2006. Online: <https://doi.org/10.1109/DASC.2006.313772>
- [11] G. Jevuczó, P. Bauer, „Optical Flow-Based Vertical Angular Rate Fault Detection on UAVs,” *IFAC-PapersOnLine*, 58. évf. 4. sz. pp. 109–114. 2024. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.202>
- [12] B. Lucas, T. Kanade, „An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision (IJCAI),” In *Conference: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI, 81)*, pp. 121–130. 1981. Online: https://www.researchgate.net/publication/215458777_An_Iterative_Image_Registration_Technique_with_an_Application_to_Stereo_Vision_IJCAI
- [13] E. Malis, M. Vargas, „Deeper Understanding of the Homography Decomposition for Vision-Based Control,” 2007. Online: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118992441>
- [14] A. A. Ozdemir, P. Seiler, G. J. Balas, „Wind Turbine Fault Detection Using Counter-Based Residual Thresholding,” *IFAC Proceedings*, 44. évf. 1. sz. pp. 8289–8294. 2011. Online: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01758>
- [15] D. Roetenberg et al., „Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation,” *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 13. évf. 3. sz. pp. 395–405. 2005. Online: <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2005.847353>
- [16] A. Sabatini, „Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing,” *Biomedical Engineering, IEEE Transactions*, 53. évf. 7. sz. pp. 1346–1356. 2006. Online: <https://doi.org/10.1109/TBME.2006.875664>
- [17] S. Jianbo, Tomasi, „Good Features to Track.” In *1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 593–600. 1994. Online: <https://doi.org/10.1109/CVPR.1994.323794>
- [18] S. Halil, S.-I. Sakai, „Magnetometer Calibration for Advanced Small Satellite Missions,” 2015. Online: <https://bit.ly/4wbsBAm>
- [19] P. Torr, A. W. Fitzgibbon, A. Zisserman, „Maintaining Multiple Motion Model Hypotheses over Many Views to Recover Matching and Structure,” In *Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271)*, pp. 485–491. 1998. Online: <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710762>

- [20] W. H. K. Vries, de, et al., „Magnetic Distortion in Motion Labs, Implications for Validating Inertial Magnetic Sensors,” *Gait & Posture*, 29. évf. 4. sz. pp. 535–541. 2009. Online: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.12.004>
- [21] A. Wahdan, et al., „Magnetometer Calibration for Portable Navigation Devices in Vehicles Using a Fast and Autonomous Technique,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15. évf. 5. sz. pp. 2347–2352. 2014. Online: <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2313764>
- [22] X. Wang, et al., „Low-Cost MEMS-Based AHRS Using an Adaptive Robust Error-State Kalman Filter for Motion Capture,” *Measurement*, 251, 2025. Online: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117108>
- [23] N. Yadav, C. Bleakley, „Accurate Orientation Estimation Using AHRS Under Conditions of Magnetic Distortion,” *Sensors*, 14. évf. 11. sz. pp. 20008–20024. 2014. Online: <https://doi.org/10.3390/s141120008>
- [24] W. Youn, „Magnetic Fault-Tolerant Navigation Filter for a UAV,” *IEEE Sensors Journal*, 20. évf. 22. sz. pp. 13480–13490. 2020. Online: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3004133>

Detection of Magnetic Sensor Faults Based on Monocular Camera Images on Unmanned Aerial Vehicles Using Real Flight Data

Modern magnetometers integrated into inertial measurement units play a fundamental role in control and navigation systems of unmanned aerial vehicles. Consequently, detecting their failures is a key task for ensuring reliable navigation and to maintain flight safety. A promising approach to solve this problem is to use the onboard cameras, as most modern drones come equipped not just only with IMU and GNSS sensors but also with cameras for various tasks such as video recordings. Accordingly, the objective of this work is to develop an algorithm for detecting magnetic sensor failures using mono camera images. During this research, we developed an IMU magnetometer fault detection method based on mono camera images and tested on real flight data. The relative rotation of the camera between two consecutive frames was determined using homography and essential matrices derived from the mono camera image sequence. Based on the resulting cumulative rotation matrix, a method for detecting the magnetic sensor faults was developed by applying an up-down counter-based residual thresholding method. Three different types of sensor faults were artificially generated on the IMU's magnetic measurements and the proposed method successfully detected all three fault types.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, inertial measurement unit, magnetometer fault detection, mono camera, sensor fault detection, real flight data*

Jevuczó Gábor, MSc doktori hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar	Gábor Jevuczó, MSc PhD student Budapest University of Technology and Economics Department of Control for Transportation and Vehicle Systems Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Research Associate HUN-REN Institute for Computer Science and Control (SZTAKI) jevuczo.gabor@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0009-0003-6859-8790
Tudományos segédmunkatárs HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI) jevuczo.gabor@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0009-0003-6859-8790	
Dr. Bauer Péter, PhD tudományos főmunkatárs, kutató HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (SZTAKI) Széchenyi István Egyetem (SZE) bauer.peter@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0000-0002-1925-2270	Péter Bauer, PhD Senior Research Fellow HUN-REN Institute for Computer Science and Control (SZTAKI) University of Győr bauer.peter@sztaki.hun-ren.hu orcid.org/0000-0002-1925-2270

A publikációban szereplő kutatást a HUN-REN SZTAKI és az SZE az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

A TKP2021-NVA-01 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Beller Balázs

A Force Protection repülésbiztonsági szemmel

A tanulmány a katonai repülésbiztonság és az erők védelme közötti kapcsolat keretében a NATO szabványosítási rendszerében vizsgálja a kockázatkezelés, a döntéshozatal és az információkezelés területén megfigyelhető hasonlóságokat és különbségeket. Mindkét terület a műveleti hatékonyság fenntartását szolgálja, de eltérő kockázatfogalmakkal és eszközrendszerekkel dolgozik, a repülésbiztonság elsősorban a nem szándékolt eseményekből eredő kockázatokat kezeli, míg az erők védelme a szándékos fenyegetésekkel szembeni sebezhetőséget csökkenti. A cikk rámutat a kockázatkezelési folyamatok, az eljárási dokumentációk, a képzés és a mélységi védelem közös szerkezeti felépítésére, gondolkodásmódjára, miközben hangsúlyozza a cél, a döntéshozatali mechanizmusok közötti alapvető eltéréseket.

Kulcsszavak: erők védelme, repülésbiztonság, kockázat, kockázatelemzés

1. Bevezetés

A NATO-erők védelme, megóvása, más néven Force Protection fontos a szövetségi műveletek tervezésének és végrehajtásának hatékonyabbá tételében, a fennálló kockázatok csökkentésével igyekszik megóvni a rendelkezésre álló erőforrásokat a harc megvívása érdekében. Igaz ez a szárazföldi és légi műveletekkel kapcsolatban is. A katonai repülésbiztonság ugyanakkor szintén egy olyan, erők megóvására törekvő eszköz, amely a repülési feladatok, légi műveletek hatékonyságát növelheti azáltal, hogy csökkenti a légi járművekkel végrehajtott feladatok kockázatát, a veszélyeknek való kitettségét, vagy éppen az esetlegesen bekövetkező veszteségek hatásait.

A műveleti területen kitelepült repülőterekről, de akár saját hazai légi bázisokról indított légi műveletek, repülési feladatok eredményességét befolyásolhatja a beléptetési rendszer hibája, az illetéktelen betolakodó által elkövetett szabotázsakció, vagy „kerítés mellől” pilóta nélküli légi járművel végzett támadás, ugyanúgy, mint mondjuk az esetleges emberi hiba jelentésének hiánya, a rossz időjárási körülmények hatására bekövetkezett légi közlekedési esemény, vagy a nem megfelelő kiképzettséggel rendelkező személy feladat-végrehajtásának engedélyezése.

A fenti indokok mellett a cikk megírásának másik oka az volt, hogy repülésbiztonsági szemszögből vizsgálja az erők védelmének elméleti hátterét, hogy a különböző fegyvernemek közötti gondolkodásmódbeli különbségek, az esetleges félreértések feloldhatók legyenek. Az összhaderőnemi műveleteket tervező törzsek szárazföldi és légierős törzstisztjeinek közösen

kell gondolkodniuk, közösen kell tervezniük, és ezért mindkét félnek értenie kell a másik fél gondolkodásmódját. Ehhez kíván segítséget nyújtani jelen tanulmány.

2. Az erők védelme és a katonai repülésbiztonság definiálása

A Force Protection, az AJP-3.14¹ doktrína alapján az *erők védelme* magába foglalja mindazon intézkedéseket és eszközöket, amelyeknek célja a személyi állomány, a létesítmények, az anyagi eszközök, a műveletek és a tevékenységek különböző fenyegetésekkel és veszélyekkel szembeni sebezhetőségének minimalizálása a haderő cselekvési szabadságának és műveleti hatékonyságának megőrzése érdekében, hozzájárulva ezzel a feladatvégrehajtás sikeréhez [6, p. 1].

A NATO által vezetett összhaderőnemi erők szempontjából a terület alapvető fontosságú a stratégiai és műveleti tervezés, valamint a döntéshozatal során, részét képezi és hatással van nemcsak egy adott, hanem az összes összhaderőnemi tervezési funkcióra.² Emellett életbevágóan fontos a koordináció szerepe a hadászati, hadműveleti és harcászati szintű műveletek tervezése és végrehajtása során [6, pp. 1–2].

Az erők védelme, megóvása feladatainak hadműveleti szintű tervezése, a feladatok végrehajtásának folyamatos nyomon követése, a kialakított rendszabályok betartása és betartatása a harcászati szint sikerének alapja a művelet kezdeti időszakától a művelet befejezéséig, az erők teljes kivonásáig. Az erők védelme tehát azon tevékenységek összessége, amelyek a műveleti környezet kihívásaiból fakadó kockázatok ellensúlyozását, ideértve az ellenség tevékenységéből fakadó fenyegetéseket, hivatottak biztosítani [3, p. 35].

A repülésbiztonság a repülési feladatok végrehajtásában jelentős szerepet kap, mind a polgári, mind a katonai repülésben. Sokan sokféle módon próbálták megfogalmazni a repülésbiztonság mibenlétét, de abban minden szakember egyetértett, hogy a légi közlekedésben korábban bekövetkezett események tapasztalatai felhasználhatók arra, hogy a hasonló körülmények között bekövetkező repülőesemények valószínűségét csökkentsük.

A katonai repülésbiztonság célja az erők védelméhez hasonlóan fogalmazódik meg a vonatkozó NATO-szabványban,³ azaz a katonai repülésbiztonság növelni tudja a légierő eszközeinek műveleti hatékonyságát azzal, hogy a légi közlekedési eseményeket kiváltó veszélyforrások biztonsági kockázatát a praktikus megvalósítható mértékig minimálisra⁴ csökkenti, valamint törekszik arra, hogy minimalizálja a légi közlekedési események következményeinek súlyosságát. A légi műveletek során a katonai repülésbiztonság ezzel erő többszörözővé válik, mivel igyekszik eliminálni az erőforrások elvesztését azzal, hogy azonosítja a potenciális

¹ AJP-3.14 *Allied Joint Doctrine of Force Protection* a STANAG 2528 NATO Egységesített Egyezményvel bevezetett dokumentum, amelyet Magyarország úgy fogadott el, hogy a nem multilaterálisan tervezett és végrehajtott műveletek esetén Magyarország a saját műveleti tervezési eljárásainak megfelelően fogja elvégezni az erők védelmének tervezését, ugyanakkor ezekben az esetekben Magyarország a lehető legnagyobb mértékben figyelembe veszi és alkalmazza a doktrína vonatkozó fejezeteit. (Magyarországon az egyes NATO szabványosítási egyezmények nemzeti bevezetéséről szóló 25/2025. HVK szakutasítás vezette be.)

² Bár minden összhaderőnemi funkció egyedi, mindegyikhez kapcsolódó képességek és feladatok tartoznak, amelyek összehangolt figyelembevétele szilárd keret biztosít a műveletek tervezéséhez és végrehajtásához [6, p. 1].

³ AFSP-01Ed. C. ver. 1 Flight Safety, amelyet a STANAG 7160 Egységesített Egyezmény keretében adtak ki. (Magyarországon az egyes NATO-szabványosítási egyezmények nemzeti bevezetéséről szóló 400/2023. HVKF [HK 10.] szakutasítás vezette be.)

⁴ *As Low as Reasonably Practicable* (ALARP).

kockázatokat, és javaslatot tesz azok csökkentésére, megoldására, mielőtt az esetlegesen bekövetkező légi közlekedési események negatívan befolyásolnák a műveletek végrehajtásának hatékonyságát [7, pp. 1–2].

A fenti két definíció alapján már érzékelhető, hogy NATO-szinten ezen területek ugyan nem fedik egymást, de vélelmezhető, hogy akár elméletben, akár gyakorlatban sok hasonlóságot találunk a párhuzamosan alkalmazott rendszerek között.

3. Hasonlóságok

Az erők védelme és a katonai repülésbiztonság közös vonásai elsősorban a NATO-szabványosítási elképzelése mentén, funkcionális szinten érhetők tetten.

3.1. Kockázatkezelés

A vonatkozó STANAG-ek által leírt folyamatok első és legszembetűnőbb hasonlósága a kockázatalapú megközelítés.

A repülésbiztonságra vonatkozó előírások alapján⁵ a kockázatkezelés folyamatának rendszere az alábbiak szerint építhető fel [5, pp. 2–3]:

1. *Veszélyforrások azonosítása* [7, p. 8-4]: olyan releváns veszélyforrások azonosítását jelenti, amelyek kockázatot jelenthetnek a repülések végrehajtására.⁶
2. *Kockázat értékelése* [7, p. 8-4]: a veszélyforrások azonosítását követően értékelni kell a velük kapcsolatos biztonsági kockázatokat. Ez magába foglalja a lehetséges balesetek vagy események bekövetkezési valószínűségének (relatív gyakoriságának) és a következménye súlyosságának értékelését.
3. *Kockázatok csökkentése, szabályozása* [7, p. 8-4]: a kockázatok értékelése után intézkedéseket kell kialakítani a kockázatok enyhítésére vagy csökkentésére, ami a kockázat három komponensének⁷ – egységes vagy részenként történő – csökkentését célozza meg.⁸
4. *Kockázatok elfogadása/döntéshozatal* [7, p. 8-4]: a felelős vezetőnek/parancsnoknak minden esetben meg kell határoznia azt a kockázati szintet, amely számára a feladat fontosságát tekintve elfogadható, illetve a további intézkedést igénylő kockázatokat elválasztja egymástól. Emellett a repülési feladatok fontossága és sürgőssége függvényében döntenie kell a kockázatok esetleges elfogadásáról vagy azok kikerüléséről, áthárításáról vagy kiterjesztéséről [5, p. 2].
5. *Kockázatcsökkentő eljárások alkalmazása* [7, p. 8-4]: a kockázatkezelés következő lépése a kiválasztott intézkedés beépítése a feladat végrehajtásába. Ez a veszély-

⁵ ICAO- és NATO-előírások, szabványok.

⁶ Alapvetően műszaki meghibásodások, az emberi hibák, hibázások, a működő rendszerben meglévő rendszer-, illetve szervezeti hibák vagy éppen a külső környezet hatásai jelennek itt meg.

⁷ Az esemény bekövetkezési valószínűsége, a következmények súlyossága és a veszélyforrásnak való kitettség.

⁸ Ez lehet új technológiák bevezetése, eljárások módosítása, szervezeti rendszerproblémák esetén felülvizsgálat és módosítás, illetve operátorszinttől a vezetősztig tartó átfogó felkészítés és képzés.

forrásnak való kitettség, a bekövetkezés valószínűsége vagy a hatások csökkentésével mérsékli a kockázatot.

6. *Nyomon követés, felülvizsgálat* [7, p. 8-4]: a repülési rendszer folyamatosan változik, ezért a kockázatcsökkentő intézkedéseket rendszeresen figyelni kell. Ha ezek nem működnek elég hatékonyan, vagy új veszélyek jelennek meg, a repülésbiztonsági rendszernek valamilyen módon alkalmazkodnia kell.

Ehhez tartozik a végrehajtó és a vezetői állomány felé folytatott folyamatos és hatékony kommunikáció [1, pp. 21–22].

Az erők védelme eljárásrendjében alkalmazott kockázatkezelés feladata, hogy a fenyegetések és veszélyek által jelentett kockázatokat a parancsnok számára elfogadható szintre csökkentse, ezáltal elérve azt a célt, hogy megvalósuljon az intézkedések, lépések és feladatok azonosítása és végrehajtása, valamint az esetleges incidensekre való hatékony reagálás képessége [6, p. 27]. Ehhez a repülésbiztonsághoz hasonló eljárásrendet alkalmaz, amely a következő elemekből áll:

1. *A kontextus meghatározása*: az erők megóvása tervezéséért felelős törzstisztnak, a műveleti tervezési eljárásban részt vevő személyként ismernie és értenie kell a műveleti tevékenység hátterét és azt, hogy mi szükséges az adott feladat sikeréhez, hogy ezáltal később felismerhesse a műveletre leselkedő kockázatokat. Ennek érdekében fontos, hogy az erők védelméért felelős törzstiszt a művelettervezés teljes időtartama alatt jelen legyen, és aktívan részt vegyen a kidolgozó, tervezői munkában [6, p. 28].
2. *Kockázatértékelés*
 - a) *Kockázatazonosítás*: ennek célja, hogy átfogóan áttekintse az erők védelme szempontjából fontos kockázatokat azoknak az eseményeknek az alapján, amelyek előidézhetik, fokozhatják, megakadályozhatják, ronthatják, felgyorsíthatják vagy késleltethetik a műveleti feladat céljainak elérését [6, p. 28].
 - b) *Kockázatelemzés*: a kockázatelemzés része a *kritikus kockázati tényezők értékelése*, amely azonosítja és rangsorolja a küldetés sikeréhez nélkülözhetetlen eszközöket és képességeket a feladat elemzése és a kiválasztott végrehajtási változat alapján. Értékeli a személyi állományt, eszközöket, létesítményeket, információkat és tevékenységeket, amelyek sérülése veszélyeztetné a küldetést. Az eszközöket mennyiségi és minőségi szempontból vizsgálja jelentőség, hatás és helyreállíthatóság alapján, figyelembe véve például a rendelkezésre állást, integritást és értéket. A folyamat meghatározza a kockázatok bekövetkezésének lehetséges hatását, és prioritási sorrendet állít fel a további fenyegetés-, veszély- és sérülékenységetértékeléshez. Ezt követi a *fenyegetettség- és veszélyforrás-elemzés*, amelyek felderítési, hírszerzési és rendvédelmi információk támogatásával lehetővé teszik a parancsnokok számára a fenyegetések azonosítását és az erők megóvása irányának meghatározását.⁹ A *fenyegetettség értékelésének* ki kell terjednie a küldetést befolyásoló környezeti és feladat-végrehajtással kapcsolatos veszélyekre is, felhasználva például a műveleti

⁹ Ehhez a parancsnokoknak ismerniük kell a NATO-művelet súlypontjait és az ellenfél alkalmazott módszereit, amelyet támogat az a tény, hogy a különböző szintű parancsnokságok elemzik és megosztják a fenyegetettség információkat. A fenyegetettség-elemzés a felderítés, a hadművelet, a tervezés és a civil-katonai együttműködés törzselemek, főnökségek szoros kooperációjában valósulhat meg.

terület felderítői előkészítéséből származó elemzéseit, és biztosítva, hogy minden azonosított veszély beépüljön az erőк védelmének folyamatába. Veszélyforrásként értékelhető a *sérülékenység* is, amely az eszközökben rejlő, kihasználható gyengeség, és a tervezési, biztonsági vagy reagálási képességek hiányosságából ered. A sérülékenység értékelése megmutatja, hogy a saját erőк mennyire kitéttek a fenyegetéseknek vagy veszélyeknek, feltárva azokat a gyengeségeket, amelyeket az ellenfél alkalmazott módszereinek ismeretében csökkenteni szükséges [6, pp. 29–31].

- c) *Kockázatértékelés*: a konkrét kockázatértékelés célja, hogy támogassa az erőк védelmével összefüggésben meghozott döntéseket abban, milyen prioritással mely kockázatok igényelnek kezelést. A kockázatelemzés eredményeire támaszkodva elvégezhető a kockázatok értékelése, majd azok rangsorolása.¹⁰ A kockázatértékelést követően a parancsnok felel a kockázatkezelési döntés meghozataláért [6, p. 31].
3. *Kockázatkezelés*: a kockázattal összefüggésben meghozott döntések az adott szintű parancsnok felelősségébe tartoznak. A legmagasabb szintű parancsnok határozza meg az alapvető intézkedéseket és kockázatvállalási irányelveket, míg az alárendelt parancsnokok saját erőкre vonatkozóan döntenek a kockázatokkal kapcsolatban.
- a) *Kidolgozás és végrehajtás*: az erőк védelmét célzó intézkedéseket (előírások, hatások, cselekvések) a fennmaradó kockázat alapján folyamatosan elemzik, amíg elfogadható szintet nem érnek el, vagy amíg az összes kockázatot olyan szintre nem csökkentik, ahol az előnyök meghaladják a lehetséges költségeket. Ezeket a bevezetendő előírásokat a hatályos műveleti eljárásokban,¹¹ parancsokban és intézkedésekben integrálva jelenítik meg.¹²
- b) *Eseményre való reagálás és helyreállítás*: az eseményekre reagálás célja a fenyegetések megszüntetése, hatásuk csökkentése és a műveleti képesség gyors helyreállítása, több szakterület összehangolt tevékenységével. Magában foglalja az azonnali reagálást, az incidens elszigetelését és kezelését, a folytonosság biztosítását, az információkezelést, valamint az egészségügyi és kiürítési intézkedéseket. A helyreállítás célja a károk és veszteségek csökkentése, valamint az alapvető képességek mielőbbi visszaállítása egy incidens után, több szakterület összehangolt bevonásával [6, pp. 32–33].
4. *Nyomon követés és felülvizsgálat*: a folyamatos monitorozás és felülvizsgálat biztosítja a haderővédelmi intézkedések hatékonyságát, azonosítja a hiányosságokat, lehetővé teszi a korrekciókat, és rögzíti a tapasztalatokat és bevált gyakorlatokat [6, p. 33].
5. *Kommunikáció és konzultáció*: a kommunikáció és konzultáció a teljes szakterület érdekében folytatott kockázatkezelési folyamat során szükséges, biztosítva a pontos és érthető információcserét, valamint a kockázatszlelési képesség különbségeinek kezelését [6, p. 34].

¹⁰ Fontos, hogy az értékelés eredményeként az is eldönthető, hogy a kockázatot nem kezelik tovább, hanem a meglévő intézkedéseket tartják fenn.

¹¹ *Standard Operating Procedures, SOP*.

¹² Ezt általában úgy érik el, hogy az erőк védelmére vonatkozó irányelveket a fennmaradó kockázat figyelembevételével egyértelmű, egyszerűen végrehajtható utasításokká alakítják át, meghatározzák a megfelelő hatásköröket és felelősségi köröket, valamint biztosítják a végrehajtáshoz szükséges támogatást.

A fentiek alapján kijelenthető, hogy mind a katonai repülésbiztonság, mind az erők védelme a kockázatmenedzsment elveit használja, azaz fenyegetés/sérülékenység/valószínűség/hatás kombinációját elemzi, majd prioritásokat állít fel. Mindkét esetben a parancsok felelőssége a megfelelő kockázatcsökkentő eljárás bevezetése, és nem a repülésbiztonsági szervezet, vagy az erők védelméért felelős döntés-előkészítési törzs az, amely intézkedést vagy parancsot ad ki. Emellett megjelenik a nyomon követés és a kommunikáció mint fontos terület az egyes intézkedések bevezetésének megértése, a kockázatértékelési és kockázatterzékelési különbségek elmagyarázása érdekében.

A katonai repülésbiztonsági kockázatkezelés területén három alapelvet alkalmaznak: az első, hogy a döntéshozó/végrehajtó ne vállaljon felesleges repülésbiztonsági kockázatot, a második az, hogy a kockázatvállalással kapcsolatos döntéseket a megfelelő vezetési szinten hozzák meg, illetve a harmadik, hogy a döntéshozó akkor fogadjon el egy adott repülésbiztonsági kockázati szintet, amikor a feladat végrehajtása során elérhető előnyök nagyobb értéket képviselnek, mint a végrehajtás során a kockázatokból fakadó veszteségek költsége [7, p. 8-2]. Ezek az alapelvek valamilyen szinten utolérhetők az erők védelme érdekében végrehajtott kockázatkezelés során is, hiszen a katonai műveletek tervezése során a megóvás érdekében bevezetett előírásokat adott vezetési szinten¹³ a fennmaradó kockázat figyelembevételével hozzák meg [4, p. 213].

3.2. Eljárás és dokumentáció

A területre vonatkozó szabványokból jól kimutatható, hogy a két területen *ad hoc* döntések helyett eljárasközpontú, a szabványosítási alapelvnek megfelelő, ismételhető, auditálható előírások valósulnak meg. Ennek oka, hogy a tagállamok által elfogadott vagy részlegesen elfogadott és bevezetett közös szabványok (STANAG) alapján elérhetővé válnak a közös műveletek gördülékeny tervezése, végrehajtása.

Ugyanakkor az alkalmazott eljárásokkal csökkentik a kockázatot, amely a repülésbiztonságnál a repülésbiztonsági kockázattertékelési logikában, az erők védelménél a tervezési és végrehajtási folyamatban jelenik meg. A katonai repülésbiztonság területén ehhez felhasznált dokumentációk például az ellenőrző listák, a kockázatelemzési formanyomtatványok, a karbantartási dokumentációk vagy a repülésbiztonsági jelentési rendszerhez tartozó kötelező, illetve önkéntes jelentési űrlapok. Az erők védelme szempontjából ilyen dokumentációk például a fenyegetettség- vagy sérülékenységtértékelésre kialakított űrlapok, a fegyveralkalmazás szabályaira¹⁴ vonatkozó előírások, a bázisvédelmi tervek, a beléptetési eljárásrend vagy a hatályos műveleti eljárások.

¹³ A magasabb szintű döntéshozók előírják az elsődleges kockázatcsökkentő direktívákat, az alacsonyabb szintű parancsnokok a saját egységük szempontjából hozzák meg a döntéseiket.

¹⁴ *Rules of Engagement, ROE.*

3.3. Képzés

A két területen összetett, dinamikus és részben kiszámíthatatlan környezetben kell megbízható teljesítményt fenntartani, amely a repülésbiztonságban a technikai, emberi és környezeti kockázatokból, az erők védelme esetében a fenyegetettség, a sérülékenységi és a műveleti kitettség változása miatt adódik. Az erők megóvása doktrína nagy hangsúlyt fektet a kiképzésre és a felkészítésre [6, p. 46–47], a parancsnoknak és a beosztott állományának ki kell alakítani az erők védelmével kapcsolatos tudatosságot, amely az egyéni és kötelékkiképzés, a műveleti feladatra vagy missziós feladatra történő felkészülés, a végrehajtási és a kivonási szakaszokban is folytatódik. Az egyéni képzés nemzeti feladat, a kollektív kiképzés és a hozzá tartozó értékelés az adott műveletben vezető NATO-parancsnok felelőssége. Az egyéni kiképzésből adódó fegyelmezettség, a szakmai szabványok és eljárások működése, az erők védelme érdekében kialakított rendszer működtetése csak a folyamatos gyakorlás és ellenőrzés/felügyelet megvalósulása mellett értelmezhető igazán.

Ugyanez a szemlélet jelenik meg a másik területen is, mivel a repülésbiztonságot nem egyszeri kinyilatkoztatásnak, megoldásnak, hanem folyamatos, szervezeti szintű tanulási folyamatnak tekinthetjük. A repülésbiztonsági képzés elengedhetetlen mind az érintett szakemberek, mind pedig azok számára, akiknek a mindennapi munkájuk során tisztában kell lenniük ezen kérdésekkel [7, p. 6–2]. A repülésbiztonsági irányítási rendszerekben az előírások betartása, a szakmai szabványok és a közös eljárások, mint a területre jellemző egyik magyarázó elméletben szereplő Reason-féle modell egyik „sajtszelete” [8, p. 8] csak akkor működhet jól, ha a szervezet folyamatosan gyakoroltatja, ellenőrzi és felülvizsgálja azokat.

A képzés mindkét esetben a kockázatok csökkentésének alapja. A katonai repülésbiztonság egyik alapvető célja, hogy a veszélyeket még azelőtt azonosítsák, és az azokból eredő kockázatokat kezeljék, mielőtt azok negatívan hatnának a műveleti hatékonyságra. Az erők védelme ugyanígy kezeli a képzést, azaz a védelmi intézkedések csak akkor működnek, ha a végrehajtó személyzet tudja, hogy mit, hol, mikor és hogyan kell tennie. A gyakorlatok célja az, hogy a személyzet ne csak elméletben ismerje az eljárást, hanem nyomás, időhiány és részleges információ rendelkezésre állása mellett is végre tudja hajtani.

Ehhez nagy szükség van a visszacsatolásra és a tapasztalatok feldolgozására. Az AFSP-01 alapján a repülésbiztonsági irányítási rendszer¹⁵ egyik központi eleme a jelentési rendszer, a hibák elemzése, a kivizsgálás és az eljárások folyamatos fejlesztése.¹⁶

Az *AJP-3.14 doktrína* ugyanezt a logikát követi, azaz előírja a folyamatos értékelést, a hírszerzési információk frissítését, a fenyegetések ismételt elemzését, valamint a jelentések, a keletkezett tapasztalatok feldolgozását, visszacsatolását. A parancsnoknak folyamatosan monitoroznia kell a fenyegetést, a sérülékenységet és a saját erők megóvása érdekében kiadott intézkedések hatékonyságát, és a felülvizsgálatok után ehhez kell igazítani az intézkedéseket.

Az összességében hasonló szerkezeti logika mögött azonban eltérő tartalom van. A repülésbiztonsági képzés főleg repülési eljárásokra, emberi tényezőre, hibamegelőzésre és eseménykezelésre épül, míg az erők megóvása érdekében végrehajtott kiképzés inkább fenyegetettségértékelésre, őrzés-védelemre, reagálásra, infrastruktúra-védelemre és túlélőképességre fókuszál.

¹⁵ *Safety Management System, SMS.*

¹⁶ Az AFSP-01 hangsúlyozza ugyanakkor, hogy a visszacsatolási rendszer, illetve a repülésbiztonsági kultúra lényege nem a szankcionálás, hanem az esetekből való tanulás, a trendek követése és az eljárások módosítása.

3.4. Mélységi védelem

A Reason-féle modellben felvonultatott mélységi védelem a képzés, az alkalmazott eljárások, szabályok, a technikai berendezések [8, p. 7–9] rétegzett felhasználásával próbálja a légi közlekedési esemény bekövetkezésének valószínűségét minimalizálni.

Az erők védelme is törekszik arra, hogy a műveleti terület teljes spektrumán egymásra épülő, egymást kiegészítő, térben és időben megvalósuló védelmi rendszert hozzon létre [6, p. 3]. Az erők védelmének egyik alapelve a mélységi védelem [6, p. 3]. A védelmi rétegek az erők védelmének koordinációs területén¹⁷ fogható meg igazán, ezek az aktív, passzív és helyreállítási területek.

Az aktív terület azokat a szabályokat, feladatokat és tevékenységeket foglalja magában, amelyekkel az ellenséges támadások elrettenthetők, megakadályozhatók vagy hatásuk csökkenthető, és ezt az erők megóvásának speciális elemei a hatályos műveleti eljárások és a fegyveralkalmazás szabályainak figyelembevételével és összhangjában valósítják meg [4, p. 214].

A passzív terület a megelőző intézkedések összességét jelenti, amelyek a parancsnoknak alárendelt személyek, erők és eszközök védelmét szolgálják a hagyományos és tömegpusztító fegyverek hatásaitól, ezzel elősegítve a csapatok túlélőképességét [4, p. 214].

A helyreállítás területe azokat a szabályokat, feladatokat és tevékenységeket tartalmazza, amelyekkel a támadás után a csapatok harci alkalmasságukat a lehető legrövidebb időn belül visszanyerik. Az erők megóvása érdekében kidolgozott terv ezért köteles figyelembe venni a lehetséges csapások következményeit és a képességek gyors helyreállítására szolgáló intézkedéseket [4, p. 214].

4. Különbségek

A szabványokat áttanulmányozva a fő különbség katonai repülésbiztonság és az erők védelme között röviden az, hogy az első a nem szándékolt eseményekből eredő kockázatokat kezeli, míg a második a szándékos fenyegetésekkel szembeni sérülékenységet igyekszik csökkenteni. A kettő terület részben ugyanazokat az eszközöket használja, de más a cél, más a veszélyforrás, a kockázat, illetve a fenyegetettség logikája, és ezért mások a kockázatsökkentő intézkedések, szabályozási eszközök is.

4.1. Különböző cél

Ha megvizsgáljuk a két terület célját, akkor ott találjuk az egyik legnagyobb különbséget, hogy pontosan mi az, amitől a két terület megpróbálja megóvni az azt működtető rendszert. A katonai repülésbiztonság elsődleges célja a repülőműveletek hatékonyságának növelése, a kockázat csökkentésével a személyzet és az eszközök védelme a balesetektől, téves végrehajtásoktól, műszaki hibáktól és emberi tévedésektől, azaz „hogyan előzzük meg a baleseteket?”.

Az erők védelme ezzel szemben a harcképesség megőrzését szolgálja azáltal, hogy csökkenti a személyi állomány, a repülőeszközök, a kiszolgáló infrastruktúra és a bázis

¹⁷ Force Protection Coordination Areas.

sérülékenységet ellenséges támadás, szabotázs, drón, rakéta, tüzérségi veszély vagy beszivárgás ellen, azaz „hogyan tegyük kevésbé sebezhetővé a saját rendszerünket egy aktív, támadó ellenféllel szemben?”.

4.2. Más lehet a veszély forrása

A katonai repülésbiztonság területén a veszélyforrás a teljesség igénye nélkül minden olyan tényező vagy körülmény, amely repülőeseményhez vezethet. Ezek lehetnek a műszaki hibák, meghibásodások, az emberi hiba, a működtetett rendszerbe beépült, lappangó rendszerhiba, az időjárási körülmények vagy eljárási eltérések, hibák.

Az erők védelme területén a veszélyforrás inkább az a fenyegetés vagy sérülékenység, amely a személyzetet, eszközöket, létesítményeket vagy a küldetés végrehajtását veszélyezteti; ide tartozhat beszivárgás, szabotázsakció, támadás, illetéktelen behatolás, drónnal, rakétával vagy egyéb módon végrehajtott ellenséges cselekmény. Az erők védelmének logikája ezért nem a repülési események „véletlen” kiváltóira, hanem a védett erők elleni szándékos vagy környezeti fenyegetésekre koncentrál. Természetesen kezelnie kell az időjárás, az éghajlat, a tengerszint feletti magasság, a domborzat, a növényzet, az állatok és a kártevők, az élelmiszer- és vízforrások, a higiéniai körülmények, a fertőző betegségek, a zaj, a pszichológiai és fizikai stresszfaktorok, a biológiai ágensek, a természetes és szintetikus vegyi anyagok, a részecskék, valamint a helyi lakossággal való érintkezés (például nemi úton terjedő betegségek) okozta veszélyforrásokat, amelyek kockázatot jelenthetnek a (katonai és polgári) személyzetre a NATO-tevékenységek során¹⁸ [6. p. 25].

4.3. Az idő és a reakció

A NATO STANAG-szintű szabályozásokban az időhorizont és a reakciólogika szerint a katonai repülésbiztonság és az erők védelme két különböző, de egymást kiegészítő logikát követ.

A repülésbiztonság – habár létezik időkritikus kockázatértékelési eljárása is [7, p. 8-3] – elsősorban egy üzemeltetési és folyamathorizonton működő, proaktív, hosszú távú kockázatkezelési megközelítést alkalmaz. Ide tartozik a repülési tevékenység teljes ciklusa, a repülés előtti, közbeni és utáni időszak, ahol a balesetek és légi közlekedési események megelőzése, a veszélyforrások azonosítása, a kockázatok kezelése a legfontosabb. A repülésbiztonsági tevékenység a folyamatos körciklusszerű kockázatkezelés mentén és mellett a szervezeti tanulás kialakítására, fenntartására és fejlesztésére irányul. A repülésbiztonsági válaszlelések, a bevezetett kockázatcsökkentő intézkedések mint reakciók itt nem egyetlen, eseményhez kötött választ jelentenek csupán, hanem folyamatos, strukturált, tapasztalatokat integráló és a jövőbeni repülési feladatok során alkalmazott intézkedések rendszerét, amely állandóan fejlődik, módosul és alkalmazkodik az újabb történésekhez, eseményekhez. A repülésbiztonság a „normál” üzem biztonságos működtetését optimalizálja.

Ettől eltérően a másik szakterületen kialakított rendszer a különböző műveleti és parancsnoki szinten működik, és a fenyegetés, a támadás, a veszélyre adott válasz, a következmények

¹⁸ A felsorolt veszélyforrások közül egyes elemek a repülésbiztonság területén is megjelenhetnek.

kezelése, a helyreállítás és a reziliencia időbeli horizontjára összpontosít. A hosszabb távú erők védelmi tervezése mellett a kockázatkezelés a fenyegetés észlelésétől kezdve, a támadás visszaverésén át a helyreállításhoz tartó időszakig incidensközpontú, rövid- és középtávú, operatív válaszok rendje szerint zajlik. Az erők védelmének reakciólogikája eseményközpontú. A fegyverhasználat szabályai és a műveleti szintek határozzák meg a válaszokat, ahol a védett erők és eszközök túlélőképességének és a küldetés folytatásának biztosítása a legfontosabb. Az erők védelme a normál „üzem” fenntartását próbálja biztosítani egy ellenséges környezetben.

4.4. *Kontrolleszközök*

A repülésbiztonsági kontrolleszközök azok a szabályok, eljárások, műszaki eszközök és szervezeti mechanizmusok, amelyekkel a kockázatot azonosítják, és kockázatcsökkentő intézkedések bevezetésével a légi közlekedési esemény bekövetkezésének lehetőségét minimalizálják. Ezek az eszközök a repülésbiztonsági irányítási rendszerbe épülnek be, és több szinten működnek. A kontroll szintjei a reasoni értelemben vett „kemény”¹⁹ és „lágy”²⁰ védelmi rétegek lehetnek. A reasoni lágy védelmi rétegek közé tartozik az emberi és a „papíralapú” eljárásrendek kombinációja, úgyis mint a jogszabályi és szabályozói háttér, az eljárási szabályok, a kiképzési, a felügyeleti eljárásrendek. Ide érti továbbá a szakszolgálati engedélyek, a tanúsítványok kiadását, a hatósági felügyelet megvalósulásának módszertanát, valamint a legkritikusabb szegmensként az első vonalbeli üzemeltetőkre vonatkozó eljárásrendek kialakítását [8, p. 8], [2, p. 26]. Ehhez számíthatók még az olyan folyamatszintű szabályozások is, mint a repülésbiztonsági irányítási rendszer kockázatértékelési és döntési eljárások. Az alkalmazott kontrolleszközök fő célja a balesetek megelőzése, a hibák és a véletlen, szabálytalan cselekvés csökkentése a szervezet teljes vertikumát tekintve.

Fontos kiemelni, hogy az itt alkalmazott kontrolleszközöket sosem a repülésbiztonsági felelős vezeti be, azokat mindig az adott szintű parancsnok intézkedése alapján lehet és kell alkalmazni. Az erők védelme kontrolleszközei inkább fizikai, műveleti és parancsnoki szintű intézkedések, amelyek a szándékos fenyegetésekkel szembeni védelmet szolgálják. Az itt bevezetett előírások, rendszabályok procedurális, személyi védelmi, anyagi, infrastruktúra-védelmi, információvédelmi területeket érintenek [6. p. B-1 – B-3], ide tartoznak például a beléptetési szabályok, az őrzés-védelmi intézkedések, a járőrözés, a megfigyelés, a passzív és aktív védelem, az infrastruktúra megerősítése, az álcázás, a riasztási és reagálási rendszerek, valamint a fenyegetésspecifikus intézkedések, például a drónellenes vagy rakétavédelmi eljárások.

4.5. *A siker különbsége*

A repülésbiztonsági irányítási rendszer akkor működik jól, ha kevesebb a légi közlekedési esemény, a repülésbiztonsági teljesítménymutatók alapján a kockázati trendek kedvezők, a kockázatelemzési eljárások időben, a megfelelő kockázatot azonosítják, és azokra adekvát

¹⁹ Technológiai eszközök, figyelmeztető berendezések stb.

²⁰ A szabályozás, üzemeltetési előírások, személyzet/operátor vonatkozásában bevezetett előírások.

kockázatsökkentő intézkedések születnek, illetve a rendszer nyílt kommunikációra épülő, jól használható, működő jelentési rendszer mellett igazságos, tanulni képes kultúrában²¹ [6, p. 3–1] üzemel.

Az erők védelme esetén akkor jó a rendszer, ha az ellenfél nem tudja eredményesen támadni a védelem alatt álló bázist, az alkalmazott eszközök túlélőképessége nő, a feladatok végrehajtása, a katonai szervezet működése folytatható marad, és az esetleges veszteségek-ből adódó helyreállítás gyorsan történik. A siker itt nem az események hiányában, hanem az ellenálló képességben és túlélőképességben mérhető.

4.6. Döntéshozatal-előkészítési mechanizmusok

A katonai repülésbiztonság és az erők védelme során alkalmazott döntéshozatal előkészítése abban különbözik, hogy milyen típusú kockázatot kezelnek, milyen időhorizonton döntenek, és milyen kritériumokat tekintenek elsődlegesnek (például baleset vs. fenyegetés, elfogadható kockázat vs. fennmaradó kockázat mellett a harcképesség megőrzése).

A repülésbiztonság – a korábban már említett célja miatt – területén a döntések előkészítése inkább analitikus, lassabb, folyamatszintű gondolkodásmódot követnek. Az előkészítést a parancsnoki döntések meghozatalában több, különböző szintű szervezet, csoport közös, bizonyítékalapú, strukturált, gyakran dokumentált folyamatának eredményeként hozzák meg, és a cél mindig az, hogy a repülési feladatot az elfogadható kockázat mentén végrehajtsák, miközben a baleseti kockázat minimálisra csökken [9, pp. 40, 44–45], [5, p. 1]. A repülésbiztonsággal összefüggésben meghozott döntések alapvetően engedélyező jellegűek, mint például felszálljon-e a repülőgép a feladat végrehajtása érdekében, megfelel-e a személyzet kiképzettségi szintje az adott feladatnak, elfogadható-e a meteorológiai helyzet, teljesültek-e a karbantartási feltételek.

Az erők védelme esetében a döntéshozatal ettől eltérő. Ahogy már fentebb megfogalmaztuk, az erők védelme során felmerülő kockázat nem véletlenszerű, hanem szándékos fenyegetés, így a döntés inkább harcászati és hadműveleti szinten, gyakran időkritikus keretek között történik. A parancsnok a műveleti helyzetértékelés, a fenyegetésértékelés, a sebezhetőség és a műveleti környezet változásai alapján határozza meg a védelmi intézkedéseket, a mozgási korlátozásokat és az erők elhelyezését, miközben a küldetés végrehajtása továbbra is prioritást élvez [4].

A parancsnoknak nem arról kell döntenie, hogy „mennyire valószínű, hogy ez megtörténik”, hanem inkább arról, hogy mit engedhet meg magának, például milyen beléptetési korlátozást vezet be, hány erőt von vissza, mekkora védelmet épít ki, miközben az eredeti cél, hogy továbbra is végezni tudja a küldetést. A döntés nem a „bekövetkezési valószínűség × súlyosság × kitettség” egyenlet matematikai minimumra csökkentése, hanem a kockázat és a műveleti tevékenység közötti arány megállapítása: „ezeket az intézkedéseket bevezetjük, de a mozgást és a bevetést így is végre tudjuk hajtani”.

²¹ Ez hívják a NATO-ban pozitív repülésbiztonsági kultúrának (*Positive Safety Culture*).

4.7. Információ kezelése, jelentések

A repülésbiztonsági kultúra meghatározza az információkezeléssel összefüggő rendszer tulajdonságait, a jelentési rendszer fejlettsége pedig hat az alkalmazott repülésbiztonsági kultúrára, azaz mit kezdünk a jelentési rendszerbe beérkezett információval, és mit kezdünk a jelentő személyével. Az AFSP-01 alapján a Pozitív Repülésbiztonsági Kultúra a következő komponensek mentén írható le.

Az első az *igazságos kultúra*,²² az a bizalmi légkör, amelyben az embereket nemcsak nem büntetik, de akár jutalmaznak is azért, ha biztonsággal kapcsolatos információkat szolgáltatnak. Ezen információk mindenki számára elérhetők, így minden szereplő tudja, hogy mi az elfogadott, illetve elfogadhatatlan viselkedés. Ugyanakkor ez a gondolkodásmód nem tolerálja a hanyag, szándékosan szabálytalan, gondatlan vagy káros szándékú viselkedést. Ehhez kapcsolódik a *jelentési kultúra*,²³ amely azt jelenti, hogy a szervezetben belül spontán és teljesen nyíltan jelentik a felmerülő problémákat, hibákat, a balesetközeli eseményeket, nem félve a következményektől. A jelentett és feldolgozott információkra épül a *tanulási kultúra*,²⁴ vagyis a szervezet képes és hajlandó a biztonsági adatokból helyes következtetéseket levonni, majd ezekre alapozva konkrét, megfelelő kockázatcsökkentő intézkedéseket hozni. A szakterületen szükség van a *rugalmasság kultúrájára*²⁵ is, amely alapján a szervezet változó körülményekhez és változó követelményekhez is képes alkalmazkodni, miközben a biztonság szintjét nem csökkenti. A fentiekhez kapcsolódik a *kérdező kultúra*,²⁶ előfeltétele, hogy a szervezet tagjai folyamatosan kritikusan gondolkodnak, felteszik a „mi lenne, ha?” és a „miért?” típusú kérdéseket, amelyekkel felszínre hozzák a feltételezéseket, a rendszerbe beépült „úgy szoktuk” elv alapján kialakított eljárásokkal kapcsolatos anomáliákat, és visszaszorítják a rejtett, hosszú távon mélyen gyökerező hibák elkövetésének valószínűségét [7. p. 3-1].

A rendszerben megjelenő jelentések és adatok olyan információkat tartalmaznak, amelyek légi közlekedési eseményekről, hibákról, baleset közeli helyzetekről és trendekről szólnak. Ezek az információk a nem büntető jellegű, nyitott jelentési kultúra keretében bizonyítékként hozzájárulnak a repülésbiztonsági irányítási rendszer fejlődéséhez.

Az AJP-3.14 az incidensek, fenyegetések, gyanús tevékenységek, atom-, biológiai, vegyi események és egyéb, az erők védelme szempontjából releváns incidensek jelentését, valamint a parancsnok számára készített kockázatkezelést és ajánlásokat említi, a szabvány nem tartalmaz a jelentési rendszerrel összefüggő hasonló gondolkodási módot, azaz nem foglalkozik külön formában azzal, hogy a végrehajtó állomány által elkövetett hibák, vagy azokra épülő eseményekkel kapcsolatos információk a büntetéstől való félelem nélkül jussanak el a megfelelő döntéshozói szinthez. Az erők óvása érdekében kialakított jelentési rendszerben a mindenkori, általánosan véve szigorúbb, és „büntető” jellegű katonai szervezeti kultúra érvényesül, amelyhez hozzájárul az is, hogy az erők védelme és a műveleti biztonsági információk (OPSEC,²⁷

²² *Just Culture.*

²³ *Reporting Culture.*

²⁴ *Learning Culture.*

²⁵ *Flexible Culture.*

²⁶ *Questioning Culture.*

²⁷ *Operational Security.*

INFOSEC²⁸) a műveletek biztos végrehajtása érdekében jellemzően minősített, részben titkos adatokat tartalmaznak, amelyekhez nem mindenki számára engedélyeznek hozzáférést.

A repülésbiztonsági jelentések általában szélesebb körben megosztódnak, míg az erők védelmével összefüggő minősített információkat csak szigorú adatkezelési szabályok alapján terjesztik.

5. A két terület a gyakorlatban

A fenti hasonlóságok és különbségek alapján fontos kiemelni, hogy a két terület nem váltható ki egymással. Egy jól védett bázis is lehet repülésbiztonsági szempontból rosszul működtetett, és egy kiváló repülésbiztonsági rendszer sem fogja megvédeni a repülőbázist egy ellenséges támadástól.

A katonai repülésbiztonság és az erők védelme egymásra hatását a gyakorlatban láthatjuk a repülőter biztonsági területére (például szigorított biztonsági terület²⁹) történő beléptetési, védelmi szabályozás és az új repülőteri infrastruktúra tervezése során is.

A repülésbiztonság oldaláról a belépés a repülőter biztonsági területeire azt jelenti, hogy csak a megfelelő képzéssel, biztonságtudatos alapismeretekkel rendelkező és jogosult személyzet léphet be és közlekedhet a felszállópálya, gurulóutak, hangárok, állóhelyek, irányítótorony, műszaki karbantartó területek kritikus zónáiba, mivel ezen érzékeny területeken elkövetett egyetlen emberi-műszaki-eljárási hiba is komoly baleseti kockázatot jelenthet. A beléptetés szabályait ezért úgy alakítják ki, hogy a légi járművek üzemeltetése, a légi közlekedési szempontú működés fennmaradjon,³⁰ de a baleset bekövetkezésének kockázata csökkenjen. Az oktatási és dokumentációs követelmények, a beléptetőrendszerek és eljárások ezen a szinten nem elsősorban a szándékos fenyegetések elhárítását célozzák.

Ugyanezt a beléptetőpontot az erők védelme koncepciója alapján nemcsak az eljárási hibák elkerülése érdekében, hanem szándékos beszivárgás, terrorista, szabotőr vagy idegen hírszerző elemek bejutásának megakadályozása érdekében alakították ki. A beléptetési eljárásrend ebben a kontextusban bevezetett rendszabályoktól (védelmi készenléti szint), a harci alkalmazás szabályaitól és a műveleti helyzetértékeléstől függően szigorítható, kiterjedhet a civil forgalomra, a logisztikai gépjárművekre, a szervizelést végző külső személyekre, és emellett a repülőtéren dolgozó személyek belépési joga is korlátozható időszakosan, kiegészítve a fizikai védelemmel, átvizsgáló eszközökkel. A cél itt nem a baleseti kockázat csökkentése, hanem a harcképesség megőrzése, a küldetés végrehajtásának fenntartása és az ellenséges cselekményekkel szembeni sebezhetőség csökkentése.

A másik gyakorlati példa egy új repülőteri infrastruktúra építése. A repülésbiztonság szempontjából a felszállópályák, a gurulóutak rendszere, az állóhelyek és *apronok*, a hangárok, a légi navigációs, híradó és informatikai rendszerek tervezésekor a döntést a repülésbiztonsági kockázatértékelés határozza meg. Az ezen a területen dolgozó szakértők felmérik a potenciális

²⁸ Information Security.

²⁹ Security Restricted Area, SRA.

³⁰ Üzemeltetési feladatok egyszerűbb hatékony végrehajtása miatt békeidőben például célszerű a repülőtechnika repülés előtti felkészítését, repülés utáni ellenőrzését, üzemanyaggal vagy folyadékokkal való feltöltését egymáshoz kis távolságra lévő állóhelyen vagy központi apronon végrehajtani, ezzel az adott humán erőforrás, a logisztikai háttér hatékonyabban tervezhető, a repülőműszaki feladatok kisebb idővesztéssel végezhetőek.

baleseti lehetőségeket, veszélyforrásokat, annak negatív hatásait és járulékos kockázatait, majd a szabályokat, működési eljárásokat úgy finomítják, hogy a baleseti események természetes okokból adódó valószínűsége minimálisra csökkenjen. A kockázatkezelési folyamat dokumentált, többlépcsős, és a döntést szakmai csoportok, hatóság, üzemeltetők bevonásával készítik elő és hozzák meg.

Ha az új repülőtéri infrastruktúra egy magasabb fenyegetettségű, művelési területen épül ki, az erők védelme teljesen más szemszögből hozza meg a döntéseket. Itt a felszállópályák, a gurulótak rendszere, az állóhelyek és *apronok*, a hangárok, a légi navigációs, híradó és informatikai rendszerek tervezése a fenyegetésre és sebezhetőségre irányuló kockázatelemzés alapján történik. A kerítés megerősítése, a felszállópálya elhelyezésének újragondolása, a rakétabelövés elleni védelem kialakítása, a felhasznált állóhelyek megerősítése, a légi járművek széttelepítése, a beszívargó csoportokkal szembeni fizikai korlátozások, valamint a modern érzékelőrendszerek és drónellenes védelem beépítése lép előtérbe. A cél ebben az esetben is a sérülékenység csökkentése, a műveletek folytathatóságának biztosítása.

A fentiek alapján két terület érdekeinek összeegyeztetése, egymás melletti működtetése szükséges mind a béke időszakában, mind a magasabb fenyegetettségű időszakokban.

6. Összegzés

Az erők védelme és a katonai repülésbiztonság két különböző, de egymást kiegészítő feladatrendszer, mindkettő a művelési hatékonyság megőrzésére törekszik, de eltérő kockázatokkal és eszközökkel dolgozik. Mindkét terület hasonló kockázatkezelési folyamatokat, standardizált eljárásokat és dokumentációkat, képzésre és visszacsatolásra épülő tanulási folyamatokat alkalmaz, a többrétegű, mélységi védelem elgondolása mindkettőben megtalálható. Ugyanakkor különböző célt kíván elérni és különböző gondolkodásmódot alkalmaz. Ez a szemléletmódbeli különbség elsősorban a repülésbiztonsági kultúrákkal összefüggésben állapítható meg.

A polgári célú légi közlekedés területén alkalmazott repülésbiztonsági irányítási rendszer nagyon hasonló a katonai repülésbiztonsági rendszerhez. A polgári légiközlekedés-védelem pedig a polgári légi közlekedés összes eleme ellen irányuló szándékos, ellenséges cselekményekkel szembeni védelmet jelenti, annak érdekében, hogy a légi közlekedés rendes üzemeltetése biztonságos módon, veszteség nélkül folytatódhasson. Felmerülhet a kérdés, hogy ami a polgári légi közlekedés területén a légiközlekedés-védelem, az a katonai területen az erők védelmét jelenti-e, illetve felmerülhet a „...miért a körtét az almával...” dilemmája is. Sokkal fontosabb ugyanakkor, hogy a polgári repülésbiztonság és légiközlekedés-védelem párosa biztosítja azt a hátteret, amely segítségével napjainkban a légi közlekedés a legbiztonságosabb közlekedési forma.

A katonai légi műveletek, az állami célú légi közlekedés szempontjából a katonai repülésbiztonság és az erők védelme kettőssében érhető tetten a hasonló hatékonyságnövelést célzó eljárásrend. Ennek megfelelően a katonai oldalon e két terület kapcsolatának, egymásra hatásának vizsgálata volt indokolható.

A cikk emellett a légierő és a szárazföldi haderő képviselői között meglévő szemléletmódbeli különbségekből adódó félreértések, a két szakterület közötti esetleges idegenkedés feloldását kívánja elősegíteni, hiszen a szárazföldi művelettervezés nem nélkülözheti a hatékonyságnövelő tulajdonsággal is bíró, az erők védelme érdekében tett erőfeszítéseket. A légi műveletek

tervezése, a légierő műveletek feladat-végrehajtása pedig nem képzelhető el repülésbiztonság nélkül. Az összhaderőnemi művelettervezésnek pedig mind a kettőre szüksége van.

Felhasznált irodalom

- [1] B. Beller, „A repülésbiztonsági kockázatelemzési eljárások evolúciója I.,” *Repüléstudományi Közlemények*, 36. évf. 1. sz. pp. 19–33. 2024. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2024.1.2>
- [2] B. Beller, Z. Dudás, „A Reason-modell a 21. században – Meddig jó a svájci sajt?,” In *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből V.* Hallgatói és oktatói kötet, Budapest, Ludovika, 2025, pp. 23–38. Online: https://doi.org/10.36250/01266_02
- [3] A. Csurgó, „Az erők megóvása napjaink műveleti környezetében,” *Honvédségi Szemle*, 149. évf. 3. sz. pp. 29–39. 2021. Online: <https://doi.org/10.35926/HSZ.2021.3.3>
- [4] A. Csurgó, „Force Protection, az erők megóvásának alapjai,” *Műszaki Katonai Közlöny*, 28. évf. 1. sz. pp. 209–217. 2018. Online: https://mkk.uni-nke.hu/document/mkk-uni-nke-hu/2018_1_14_Csurgo%20A_Az%20erok%20megovasanak%20alapjai.pdf
- [5] Z. Dudás, „Repülésbiztonsági kockázat, repülésbiztonsági felelősség,” *Repüléstudományi Közlemények*, 21. évf. 2. sz. pp. 1–8. 2009. Online: https://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Dudas_Zoltan.pdf
- [6] NATO, *AJP-3.14 Allied Joint Doctrine of Force Protection Ed. B, Ver. 1.* (STANAG 2528 Ed. 3.), Bruxelles, NATO Standardization Office (NSO), 2024.
- [7] NATO, *NATO Standard AFSP-01 Aviation Safety Ed. C, Ver. 1.* (STANAG 7160 Ed. 5.), Bruxelles, NATO Standardization Office (NSO), 2023.
- [8] J. T. Reason, *Managing the Risks of Organizational Accidents*, New York, New Jersey, USA, Routledge (1997, 2016). Online: <https://doi.org/10.4324/9781315543543>
- [9] J. Rohács J., Zs. Cs. Horváth, „A repülésbiztonság problémája és fejlesztési elvei,” *Repüléstudományi Közlemények*, 25. évf. 3. sz. pp. 39–55. 2013. Online: https://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2013_3/2013-3-05-Rohacs_J-Horvath_Zs-Cs.pdf

The Force Protection from Flight Safety Point of View

This study examines the similarities and differences in risk management, decision-making, and information management within the NATO standardisation system, within the context of the relationship between aviation safety in military environment and the force protection. Both fields serve to maintain operational effectiveness but operate with different risk concepts and toolkits; aviation safety primarily manages risks arising from unintended events, while force protection reduces vulnerability to intentional threats. The article highlights the common structural framework and mindset of risk management processes, procedural documentation, training, and defence in depth, while emphasising the fundamental differences in objectives and decision-making mechanisms.

Keywords: *force protection, aviation safety, flight safety, risk, risk assessment*

Beller Balázs
vezető kiemelt főtiszt
HM Állami Légügyi Főosztály
Repülésbiztonsági és Repülőtérfelügyeleti
Osztály
balub77@gmail.com
orcid.org/0009-0009-6117-1026

Balázs Beller
Senior Executive Staff Officer
MoD State Aviation Department
Flight Safety and airport Operations
Supervisory Division
balub77@gmail.com
orcid.org/0009-0009-6117-1026

Hajnal Kornél, Békési Bertold

Precíziós növényvédelmi kijuttatás légi és földi megvalósításának rendszerszintű összehasonlító elemzése

A precíziós növényvédelem fejlődése egyre inkább a platformfüggetlen technológiai megközelítés felé halad, ahol a légi és földi kijuttató rendszerek azonos működési elvekre épülnek, ugyanakkor eltérő fizikai és üzemeltetési sajátosságokkal rendelkeznek. A légi rendszerek működését elsősorban aerodinamikai és repülésdinamikai tényezők befolyásolják, amelyek hatással vannak a cseppeloszlásra és az elsodródásra, míg a földi rendszereknél a stabil hidraulikai és mechanikai környezet biztosítja az egyenletes kijuttatást. A tanulmány célja egy multikopteres drón és egy vontatott szántóföldi permetező összehasonlító vizsgálata azonos agronómiai körülmények között, ULV-technológia alkalmazásával. A kutatás elemzi a két platform működési sajátosságait, teljesítményét, időigényét és hatékonyságát, majd azonos tesztfeltételek mellett értékeli a kijuttatás minőségét és alkalmazhatóságát. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a légi és földi rendszerek összehangolt alkalmazása jelentős előnyöket kínálhat a precíziós növényvédelemben.

Kulcsszavak: precíziós növényvédelem, multikopteres drón, vontatott permetező, ULV-technológia, kijuttatási hatékonyság

1. Bevezetés

A növényvédelem a mezőgazdasági termelési rendszerek egyik legkritikusabb eleme, hatékonysága közvetlen hatással van a termésbiztonságra, valamint a gazdaságosságra [8]. A technológiai fejlődés eredményeként a kijuttatási rendszerekkel szemben támasztott követelmények a dózishelyesség, az egységnyi területre vetített precíz kijuttatás, valamint a környezetre gyakorolt negatív hatások minimalizálásának irányába toldott el [1], [3]. Ennek következtében a permetezőstechnológia fejlődése nem csupán új megoldások megjelenésében, hanem a meglévő rendszerek határainak egyre meghatározóbbá válásában is megmutatkozik [2], [8]. A szántóföldi permetezés esetében a legjelentősebb, nehezen kezelhető, ugyanakkor meg nem szüntethető problémát a talajjal való fizikai kapcsolatból adódó tapadási kár jelenti [1], [7]. A nagy tömegű gépek ismétlődő áthaladása a termesztett állományon és a talajon nemcsak közvetlen növénykárosodást okoz, hanem a talajszerkezet tartós romlásán keresztül is negatívan befolyásolja a termelést [7], [8]. Kedvezőtlen talajállapot mellett ez a hatás

felelősödik, a kijuttatás időzítését, valamint bizonyos esetekben annak megvalósíthatóságát is korlátozza [1]. Ezzel párhuzamosan a drónos permetezés esetében eltérő jellegű, de hasonlóan meghatározó probléma jelentkezik, amely az energiaellátás és a hordozható tömeg korlátozottságából adódik [2], [5], [10]. A repüléshez szükséges folyamatos teljesítményigény, valamint a rendelkezésre álló energiatárolási kapacitás együttesen határozza meg a kijuttatható folyadékmennyiséget és az egy repülési ciklusban kezelhető terület nagyságát [2], [9], [10]. Ez a korlát alapvetően befolyásolja a technológia hatékonyságát, különösen nagyobb összefüggő területek esetében [3], [9].

Megállapítható, hogy a két technológia működését eltérő fizikai korlátok határozzák meg, amelyek nem csupán a rendszerek kialakítására, hanem azok gyakorlati alkalmazhatóságára is jelentős hatással vannak. Jelen cikk célja ezen eltérő korlátozó tényezők mentén a szántóföldi és a drónos permetezési rendszerek összehasonlító vizsgálata. A tárgyalás középpontjában annak bemutatása áll, hogy a két technológia milyen működési sajátosságokkal rendelkezik, valamint hogy ezek a sajátosságok milyen módon befolyásolják a kijuttatás hatékonyságát és alkalmazhatóságát a gyakorlatban [2], [9].

2. Szántóföldi vontatott permetező

2.1. Adatgyűjtés során alkalmazott konfiguráció

Az adatgyűjtés elvégzésekor a [32] irodalomban bemutatott, rekonstruált szántóföldi vontatott permetezőt alkalmaztuk, a célérték hektáronként 100 l permetlé kijuttatása volt, amelyhez a munkavégzés során alkalmazott erőgép egy MTZ 820.4 típusú traktor volt [16]. A traktor üzemi karakterisztikájából adódóan a teljesítményátvitel szempontjából meghatározó, hogy a TLT névleges 540 1/min értéke a motor 2000–2200 1/min tartományában biztosítható, amelyhez illeszkedve a munkavégzést a nyolcadik sebességfokozatban, megközelítőleg 13 km/h átlagsebesség mellett optimalizáltuk [15]. A valós üzemi körülmények között azonban a haladási sebesség nem tekinthető állandónak, hanem 10 és 16 km/h közötti tartományban változik, amely a szabályozórendszer számára folyamatos korrekciós feladatot jelent. A hidraulikai rendszer működése ezen sebességtartományhoz illeszkedve 1,8 és 2,3 bar közötti nyomástartományban valósul meg [11], [12], ami jelentősen elmarad a szivattyú maximálisan mért, 7,2 bar teljesítményétől, ugyanakkor elegendő a kívánt kijuttatási karakterisztika biztosításához. Az adatgyűjtés során kék színekű, azaz 03-as méretű szabványos fúvókákat alkalmaztunk [13], amelyek az üzemi nyomás és sebesség tartományban optimális porlasztási és térfogatáram viszonyokat biztosítanak [11], [15]. A szórókereten összesen 36 db fúvóka található, 50 cm-es osztással [14], öt szakaszra bontva. A szakaszolás elrendezése szimmetrikus, az első és az ötödik szakaszon 7–7 db, a második és negyedik szakaszon 9–9 db, a középső szakaszon pedig 4 db fúvóka helyezkedik el, biztosítva ezzel a teljes 18 m-es munkaszélesség egyenletes lefedettségét.



1. ábra

A 03-as méretű fúvókás kijuttató egység szerkezeti felépítése és elhelyezkedése a szórókereten
[Hajnal Kornél]

Az adatgyűjtés elvégzéséhez használt kijuttató egység szerkezeti felépítését az 1. ábra szemlélteti. Az 1. jelölés a fúvóka rögzítését biztosító bajonettzárat mutatja, amely lehetővé teszi a gyors és üzembiztos cserét, a 2. jelölés az 50 mesh¹ ($\gg 300 \mu\text{m}$) finomságú szűrőt jelöli [12], amely a szennyeződések visszatartásával védi a rendszert az eltömődéstől [16], míg a 3. jelölés a 03-as méretű lapos sugarú fúvókát ábrázolja. A 4. jelölés ezen elemek összeépített egységét mutatja a fúvókataratóban, míg az 5. jelölés a szórókereten elhelyezett, összesen 36 db kijuttató egységet szemlélteti.



2. ábra

A szakaszolási rendszer működése és megjelenítése monitoron, valós üzemi körülmények között [Hajnal Kornél]

¹ A „mesh” egy szitasűrűségi érték, azt jelenti, hogy 1 inch (25,4 mm) hosszúságon 50 nyílás található a szítán. A tényleges nyílásméret a huzalvastagságtól is függ, de általánosan elfogadott érték szerint: 50 mesh $\approx 297 \mu\text{m}$. Tehát egy 50 mesh szita körülbelül 300 μm szemcseméret alatti anyagok átérésztésére alkalmas.

A rendszer fontos eleme a GNSS-alapú helymeghatározásra épülő szakaszolás, amelynek működését a 2. ábra mutatja be. Az 1. jelölés a traktor fülkéjében elhelyezett monitort jelöli, míg a 2. jelölés a monitoron látható útvonalat szemlélteti. A vezérlőrendszer a pozícióadatok és a munkavégzés során rögzített pálya alapján folyamatosan értékeli az átfedettséget, és amennyiben az adott szakaszon az átfedés mértéke meghaladja az 50%-ot, a szakasz automatikusan lezáródik.

2.2. Adatgyűjtés kiértékelése

A gyűjtött adatok alapján megállapítható, hogy a rendszer különböző sebességtartományokban eltérő jellegű dóziseltérést mutat. Alacsonyabb, körülbelül 9 km/h sebesség esetén a kijuttatás enyhe túladagolást eredményez, megközelítőleg 104 l/ha értékkel, míg magasabb, körülbelül 16 km/h sebességnél a kijuttatás enyhén aluladagolt, körülbelül 96 l/ha értékkel. Ez az eltérés nem esetleges, hanem a rendszer fizikai és szabályozástechnikai sajátosságaiból adódó, közel állandó jellegű működési karakterisztika. A gyakorlatban a munkavégzés során a sebesség folyamatosan változik, a táblák geometriai adottságai, a fordulók, valamint az átfedések kezelése kiegyenlítő hatást eredményeznek.

1. táblázat

Permetezési munkamenetek rögzített üzemi adatai [Hajnal Kornél]

Dátum / Időszak	Megtett távolság [m]	Lefedett terület [ha]
2026/04/27 18:10:50 – 2026/04/27 18:37:11	1509	1,52
2026/04/26 00:43:22 – 2026/04/26 00:51:11	670	0,72
2026/04/25 22:35:20 – 2026/04/26 00:01:07	4515	7,48
2026/04/25 21:06:12 – 2026/04/25 21:50:05	6078	9,81

Az 1. táblázatban látható rögzített mérési adatok alapján a rendszer a négy különböző munkamenet során összesen 12 772 m utat tett meg, 18 m-s munkaszélességgel, ami 22,98 ha lefedettséget jelent. A valósan kezelt terület 19,53 ha, ami azt eredményezi, hogy az átfedettség aránya a valósan kezelt területhez viszonyítva 17,7%. Az alkalmazott technológiai sebesség optimálisan 13 km/h, ez a rendszer üzemi munkapontjaként értelmezhető, és ehhez történt a hidraulikai, valamint a kijuttatási paraméterek illesztése. Ezzel szemben a teljes műveletre meghatározott átlagsebesség 4,7 km/h értéket ad, azonban a két érték eltérő jelentéstartalmú, így közvetlen összehasonlításuk nem indokolt. A munkasebesség a kijuttatás szempontjából releváns üzemállapotot jellemzi, amikor a gép a beállított dózis tartására optimalizált állapotban van. Az átlagsebesség a teljes munkafolyamatra vonatkozó mutató, amely magában foglalja a fordulókat, a pályakorrekciókat, az átfedésekből adódó többletmozgásokat, valamint a nem produktív haladási szakaszokat is. Megállapítható, hogy az átlagsebesség csökkenése nem a kijuttatási folyamat hatékonyságának romlását jelzi, hanem a tábla geometriájából, az üzemeltetési sajátosságokból, valamint a precíziós kijuttatás érdekében alkalmazott szakaszolásból következik. Ennek megfelelően a munkasebesség és az átlagsebesség együttes értelmezése ad valós képet a rendszer működéséről, ahol az előbbi a technológia, míg az utóbbi a teljes munkafolyamat gyakorlati hatékonyságát írja le.

3. Multikopteres permetező

3.1. Adatgyűjtés során alkalmazott konfiguráció

Az adatgyűjtés során a [31] irodalomban bemutatott és elkészített agráripari permetező drónt alkalmaztuk, valamint a kijuttatási dózis 10 l/ha [19], [25], amely a rendszer működésének alapvető célparamétereként szolgált [22]. A kijuttatás megvalósítását két darab, egyenként 4 l/min névleges térfogatáramú szivattyú biztosítja [19], amelyek redundáns kialakításban működnek [22], biztosítva a rendszer üzembiztosságát. A hidraulikai rendszer üzemi nyomása előzetes mérések alapján 8 bar [18], [19], amely a kis dózisú kijuttatás mellett szükséges megfelelő porlasztási viszonyok biztosításához [11], [21], [27].



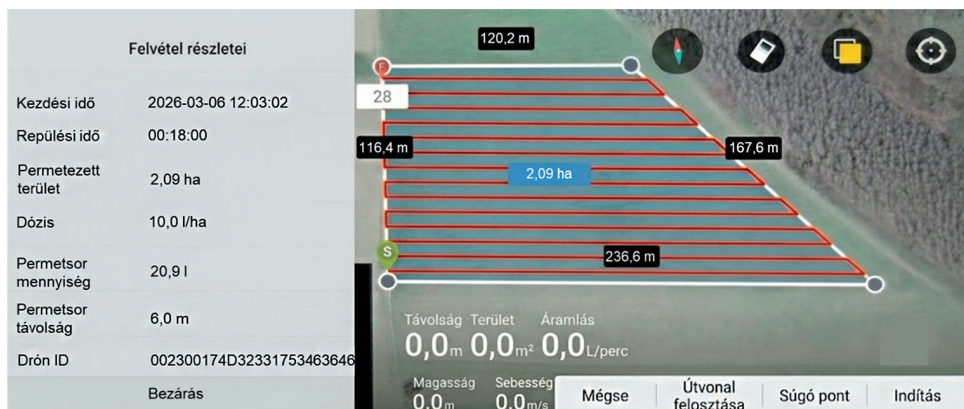
3. ábra

Multikopteres permetező drón tesztüzemeltetése [Hajnal Kornél]

A méretezési számítások, valamint az ezt megerősítő sikeres tesztüzemeltetés alapján az adatgyűjtés során alkalmazott szórófejrendszert szabványos, lila színkódú, 0,25-ös méretű fúvókákkal alakítottuk ki [17]. Ezek a fúvókák az adott nyomástartományban képesek biztosítani az alacsony térfogatáram melletti egyenletes és finom porlasztást [24], [26]. A fúvókákhoz tartozó szűrők 80 mesh finomságúak [18], amelyek feladata a rendszerbe kerülő szennyeződések visszatartása [22], ezáltal a fúvókák eltömődésének megelőzése és az egyenletes működés fenntartása [18], [19], [23]. A kijuttatási rendszer működése során a térfogatáram és a nyomás együttesen határozza meg a tényleges kijuttatási intenzitást, amelyhez a fúvókák karakterisztikája illeszkedik [28]. Megállapítható, hogy a beállított paraméterek olyan üzemállapotot eredményeznek, amelyben a rendszer képes a kis dózisú kijuttatás stabil és reprodukálható biztosítására [25], [29].

3.2. Adatgyűjtés kiértékelése

A rögzített mérési adatok alapján megállapítható, hogy a rendszer az adott munkamenet során 18 min repülési idő alatt összesen 2,09 ha területet kezel, amelyhez 10 l/ha kijuttatási dózis mellett 20,90 l permetlé felhasználása tartozik. A kijuttatott mennyiség és a kezelt terület aránya alapján megállapítható, hogy a rendszer a beállított dózisértéket elfogadható hibahatáron belül tartotta. A munkavégzés során alkalmazott szórásszélesség 6 m, míg a technológiai munkasebesség 8 m/s volt. A teljes műveletre vonatkozó értékeléshez figyelembe kell venni, hogy a kezelt 2,09 ha terület és a szórásszélesség alapján az effektív permetezési úthossz megközelítőleg 3483 m. Ezt a teljes, 18 min-es repülési időre vetítve a rendszer tényleges átlagsebessége 3,23 m/s értékre adódik.



4. ábra

Permetezési munkamenet rögzített üzemi adatai [Békési Bertold]

A két sebességértéknek eltérő a jelentéstartalma, így közvetlen összehasonlításuk nem indokolt. A 8 m/s érték a kijuttatás szempontjából releváns üzemi állapotot jellemzi, amikor a rendszer aktív szórás mellett, stabil paraméterekkel működik. Ezzel szemben a 3,23 m/s átlagsebesség magában foglalja a fordulókat, a pályakorrekciókat, valamint az egyéb nem produktív repülési szakaszokat is. A repülési magasság az állomány felett megközelítőleg 3 m volt, amely a kijuttatás során meghatározó szerepet játszik a fedettség kialakulásában. A választott sebesség és magasság együttesen olyan üzemi állapotot eredményezett, amely mellett a rendszer képes a beállított dózis stabil tartására. Összességében megállapítható, hogy a drónos kijuttatási rendszer a vizsgált üzemi körülmények között képes a kijuttatási dózis pontos és reprodukálható biztosítására. A technológiai munkasebesség és a teljes műveletre jellemző átlagsebesség együttes értelmezése ad valós képet a rendszer működéséről, amely így közvetlenül összevethető a földi kijuttatási rendszer hasonló módon értelmezett paramétereivel.

4. Összefoglalás

A két vizsgált kijuttatási technológia összehasonlítása alapján megállapítható, hogy működési elveikből adódóan jelentős különbségek mutatkoznak a dózismennyiség, a sebességszámok, valamint az ezekből számított hektárteljesítmény tekintetében [2], [3], [30]. A földi rendszer a beállított 100 l/ha dózist 98–102 l/ha tartományban tartja, amely a szabályozás dinamikájából adódó, de hibahatáron belül elhelyezkedő, elfogadható eltérés [15], [25]. Ezzel szemben a légi rendszer 10 l/ha dózisa gyakorlatilag pontosan tartható, ugyanakkor nagyságrenddel kisebb kijuttatott mennyiséget jelent [2], [9], [21]. Sebesség tekintetében a földi rendszer optimális munkasebessége 13 km/h, átlagsebessége 4,7 km/h, míg a légi rendszer esetében ezek rendre 8 m/s (28,8 km/h) és 3,23 m/s (11,6 km/h). Mindkét esetben megfigyelhető, hogy az átlagsebesség jelentősen elmarad a munkasebességtől, ami a fordulókban, pályakorrekciókból és egyéb nem produktív mozgásokból adódik [29], [30], ugyanakkor a légi rendszer mindkét mutatóban kedvezőbb értékeket mutat [2], [3]. Az effektív hektárteljesítmény a földi rendszer esetében ~5,9 ha/h, míg a légi rendszer esetében ~7 ha/h. A drón tehát kisebb munkaszélesség mellett is nagyobb teljesítményt ér el. Az eredmények ugyanakkor egyértelműen mutatják, hogy a teljesítmény az alkalmazási környezettől függ. A földi rendszer hatékonyságát a kis méretű, amorf alakzatú táblák, valamint a gyakori fordulók és átfedések jelentősen csökkentik, így a nagy munkaszélességből adódó előnyei a vizsgált környezetben hátrányként jelentkeznek. Ezzel szemben a légi rendszer kevésbé érzékeny a tábla geometriájára, ezért ilyen körülmények között kedvezőbb teljesítményt biztosít. Nagy, egybefüggő területeken ugyanakkor a földi permetezőrendszer válik előnyössé, ahol az egyenletes haladás és a nagy munkaszélesség kedvezőnek bizonyul, ezért hatékonyan kihasználható.

Összességében megállapítható, hogy a kisebb méretű, szabálytalan alakzatú táblák, valamint a foltkezelési feladatok esetében a légi kijuttatás alkalmazása előnyösebb, míg nagyobb, homogén területeken a földi permetezőrendszer biztosít kedvezőbb teljesítményt. A két technológia hatékony alkalmazása nem csupán gazdasági szinten, hanem akár egyazon táblán belül is értelmezhető, ahol az eltérő adottságú területrészekhez igazodva célszerű a kijuttatási mód megválasztása. Ennek megfelelően a rendszerek célzott, helyspecifikus kombinációja biztosítja a legkedvezőbb működést, lehetővé téve, hogy minden környezetben az adott feltételekhez leginkább illeszkedő technológiát alkalmazzák, ezáltal maximalizálva a kijuttatás hatékonyságát és gazdaságosságát [15], [30].

Felhasznált irodalom

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Guidelines on Minimum Requirements for Agricultural Pesticide Application Equipment. Volume Two: Vehicle Mounted and Trailed Sprayers*. Rome, FAO, 2001. (fejezet: pp. 1–34). Online: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/be381943-507c-425e-bc2d-2073ef6ab8a7/content>
- [2] J. Kim et al., „Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications,” *IEEE Access*, 7. sz. pp. 105100–105115. 2019. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>

- [3] D. C. Tsouros, S. Bibi, P. G. Sarigiannidis, „A Review on UAV Based Applications for Precision Agriculture”, *Information*, 10. évf. 11. sz. 2019. Online: <https://doi.org/10.3390/info10110349>
- [4] H. Aasen et al., „Quantitative Remote Sensing at Ultra High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows”, *Remote Sensing*, 10. évf. 7. sz. 2018. Online: <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- [5] B. Békési, J. Seres, „Drónok alkalmazásának lehetőségei”, *Repüléstudományi Közlemények*, 32. évf. 3. sz. pp. 5–19. 2020. Online: <https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.1>
- [6] B. Békési, I. Papp, P. Szegedi, „UAV-k légi és földi üzemeltetése”, *Economica*, 6. évf. 2. sz. pp. 99–117. 2013. Online: <https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2013/6/2/4422>
- [7] „Soil Compaction AND Sprayers”. ET Sprayers Technical White Paper. Online: <https://www.etsprayers.com/wp-content/uploads/2015/11/Soil-Compaction-and-Sprayers-white-paper.pdf>
- [8] M. C. Hunter, „Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification”, *BioScience*, 67. évf. 4. sz. pp. 386–391. 2017. Online: <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- [9] A. Talaeizadeh et al. „Agricultural Spraying Drones: A Comprehensive Review”, *Smart Agricultural Technology*, 12. évf. 2025. Online: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101519>
- [10] R. Guebsi, S. Mami, K. Chokmami, „Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review”, *Drones*, 8. évf. 11. sz. 2024. Online: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- [11] ASABE S-572.1: *Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- [12] „TeeJet Technologies: Spray Application and Sprayer Calibration Manual”, *TeeJet Catalog 51A International Edition*. Wheaton, Illinois. Online: https://www.teejet.com/-/media/dam/agricultural/usa/sales-material/catalog/cat51a_metric.pdf
- [13] *ISO 10625: Equipment for Crop Protection – Sprayer Nozzles – Colour Coding for Identification*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005.
- [14] *ISO 19732: Equipment for Crop Protection – Mounted and Trailed Sprayers – Measurement of Volume of Residual Liquid*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2007.
- [15] P. Balsari et al., „Spray Application Techniques in Precision Agriculture”, *Aspects of Applied Biology*, 84. sz. pp. 331–338. 2007.
- [16] United States Environmental Protection Agency (EPA), *National Pesticide Applicator Certification Core Manual*. National Association of State Departments of Agriculture Research Foundation, 2014. pp. 157–162. Online: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-09/national-pesticide-applicator-cert-core-manual-2014.pdf>
- [17] *ISO 10625: Equipment for Crop Protection – Sprayer Nozzles – Colour Coding for Identification*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005.
- [18] *ISO 5682-1: Equipment for Crop Protection – Spraying Equipment – Part 1: Test Methods for Sprayer Nozzles*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2017.
- [19] *ISO 5682-2: Equipment for Crop Protection – Spraying Equipment – Part 2: Test Methods for Hydraulic Sprayers*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2017.

- [20] ASABE EP367.3: *Procedure for Measuring Distribution Uniformity and Calibrating Granular Broadcast Spreaders*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [21] ISO 22866: *Equipment for Crop Protection – Methods for Field Measurement of Spray Drift*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2005.
- [22] ISO 16122-1: *Agricultural and Forestry Machinery – Inspection of Sprayers in Use – Part 1: General*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2015.
- [23] ISO 16122-2: *Agricultural and Forestry Machinery – Inspection of Sprayers in Use – Part 2: Horizontal Boom Sprayers*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2015.
- [24] ASABE S561.1: *Procedure for Measuring Drift Deposits from Ground, Orchard, and Aerial Sprayers*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [25] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Guidelines on Good Practice for Aerial Application of Pesticides*. Rome, FAO, 2001.
- [26] ASTM E1260: *Standard Test Method for Determining Liquid Drop Size Characteristics in Agricultural Sprays*. West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM International.
- [27] ISO 25358: *Crop Protection Equipment – Droplet Size Classification of Spraying Equipment*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization, 2018.
- [28] A Herbst, J. Bonds, Z. Wang, „Agricultural UAV Spraying Quality and Drift Characteristics," *Aspects of Applied Biology*, 132. évf. pp. 45–52.
- [29] C. Zhang, J. M. Kovacs, „The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review," *Precision Agriculture*, 13. pp. 693–712. 2012. Online: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- [30] ASABE EP496.3: *Agricultural Machinery Management Data*. St. Joseph, Michigan, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.
- [31] K. Hajnal, *Multikopteres drón tervezése és fejlesztése agráripari felhasználásra*. Szakdolgozat, Budapest, Óbudai Egyetem, 2024.
- [32] K. Hajnal, *Szántóföldi permetezőgép precíziós kijuttató rendszerének tervezése és kivitelezése*. Diplomamunka, Budapest, Óbudai Egyetem, 2026.

System-Level Comparative Analysis of Aerial and Ground-Based Implementations of Precision Crop Protection Application Systems

The development of precision crop protection is increasingly moving toward a platform-independent technological approach, where aerial and ground-based application systems are built upon the same operational principles while exhibiting different physical and operational characteristics. The performance of aerial systems is primarily influenced by aerodynamic and flight-dynamic factors affecting droplet distribution and spray drift, whereas ground-based systems rely on stable hydraulic and mechanical conditions to ensure uniform application. The aim of the study is to conduct a comparative analysis of a multirotor drone and a tractor-trailed field sprayer under identical agronomic conditions using ULV technology. The research evaluates the operational characteristics, performance, time requirements, and efficiency of both platforms, followed

by an assessment of application quality and operational applicability under standardised test conditions. The results highlight that the coordinated use of aerial and ground-based systems may provide significant advantages in precision crop protection.

Keywords: *precision crop protection, multirotor drone, trailed sprayer, ULV technology, application efficiency*

Hajnal Kornél MSc-hallgató Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar kishajnalmed@gmail.com orcid.org/0009-0007-1191-5096	Kornél Hajnal MSc Student Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering kishajnalmed@gmail.com orcid.org/0009-0007-1191-5096
Dr. Békési Bertold alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X	Bertold Békési, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor Ludovika University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Institute of Military Aviation Department of Aircraft Onboard Systems bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X

Balajti István

Miért és hogyan válhatunk hatékony és sikeres mérnökké?

„Agykarbantartás” koncepció és „Nobel-sörök” motiváció a radartechnológiák oktatásában

A Debreceni Egyetem Műszaki Karán kifejlesztett „Agykarbantartás” és „Nobel-sörök” oktatási koncepció radartechnológia-példákon keresztül erősíti a mérnöki alapkészségeket. A módszer válasz az ipar 4.0 által kibontakozó gyors technológiai változásokra és az ipar 5.0, a mesterséges intelligencia (MI) az élet minden területét érintő integrálására, kiemelve az általánosan elvárható alapkészségek folyamatos fejlesztését, ami a hazai hadmérnökképzés újrakezdését is elősegítheti.

Kulcsszavak: mérnökpedagógia, mesterséges intelligencia, radartechnológiák, agykarbantartás, Nobel-sörök, tanulásmotiváció, oktatási innováció

1. Bevezető

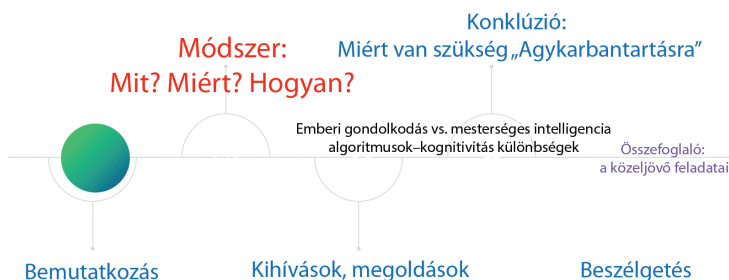
„Kétfajta embertípus létezik: a MÉRNÖKÖK és mindenki más. Minden rendben van a »mindenki más« típussal, szeretjük őket, de ők nem mérnökök!” (Tanár első találkozása a hallgatókkal, Debreceni Egyetem Műszaki Kar [DE MK])

2023 közepére elkészült a *Stratégiai kérdések 2023 – Debreceni Egyetem Műszaki Kar* című dokumentum, amely az elkövetkező 10 évre rögzíti a DE MK főbb célkitűzéseit a „Misszió”, „Értékrendek”, „Jövőkép – személyi feltételek, oktatás, kutatás, oktatási és kutatási kompetenciák”, valamint ezek „Fenntarthatósága” területein. Az elvégzendő munka következő lépése ezen elvek és elvárások gyakorlati megvalósításával kapcsolatos kérdésköreinek összegyűjtése, értékelése és szükség szerinti kiegészítése [1]. Egyértelmű, hogy a mérnöki tudományok egyre gyorsuló fejlődése, a mesterséges intelligenciát (MI) alkalmazó, az *Internet of Things-szel*¹ (IoT) kapcsolatos, a világűrben is széleskörűen alkalmazható megoldások tanítására hagyományos módszerekkel nincs elég idő és a gyakorlatban hatékonyan alkalmazható oktatási képességcsomag [9], [19]. Az egyetemeken jelenleg elterjedt Képzési és Kimeneti Követelmények (KKK), Programtantervek (PTT) folyamatosan megújulnak, lásd például a kompetenciaalapú Elvárt Tanulási Eredmény (ETE) eddig közzétett dokumentumait. A tématerület fejlesztésével foglalkozó szakemberek szerint: „A mérnökpedagógia a felsőoktatás-pedagógia területén végzett empirikus pedagógiai és pszichológiai kutatásokat foglalja magában. A műszaki,

¹ Dolgok internete – interneten keresztül kapcsolódó eszközök, pl. érzékelők.

az informatikai és az információbiztonsággal kapcsolatos tudományok határterületein folytatott kutatások a gyakorlati mérnöktanárképzés kérdéseit tárgyalják, különös tekintettel a pedagógiai és szakmai kompetenciák fejlesztésére." A tanulmány [13] javaslatokat fogalmaz meg a képzés hatékonyságának növelésére a magyar felsőoktatási kontextusban. Az általunk alkalmazott módszer lényegét az 1. ábra mutatja. Ennek legfontosabb eleme a korunk műszaki kihívásai, a hatékony mérnökpedagógia és a mérnöki gondolkozásmód közötti kapcsolat.

Természetesen az egyetemről kikerülő mérnökök képzési színvonala nem csökkenhetett, és továbbra is megfelelt olyan általános mérnöki elvárásoknak, mint például a megbízhatóság, strukturált gondolkozásmód, hatékony és következetes konklúzióalkotás, bármilyen szakmaspecifikus témakörben, valamint önmaguk elismertetése a mérnöki társadalomban stb. Az elvárt képességek, a rendelkezésre álló időkeretek függvényében, csak elméleti és gyakorlati mérnökpedagógiai megoldásokkal, „szabványos” ismeretekkel, szakmaspecifikus eljárásrendek alkalmazásával, lehetőleg költséghatékonyan, mesterséges intelligencia széles körű, egyre terjedő alkalmazásaival, adaptálhatók az új kihívásokhoz. Ezért a hatékony mérnökképzés pedagógiája és az ehhez kapcsolódó kutatások kiemelkedően fontosak. A Debreceni Egyetem Műszaki Karán folyó hasonló vizsgálatok ettől az elvárástól némileg eltérő mérnöki képességekre, szakirányokra fókuszálnak. Mivel a szerző több mint 40 év alatt a Radartechnológiák területén ért el mérnöki és tudományos eredményeket, sikereket, szerinte minden olyan tantárgy, érvelési megközelítés és képesség, amelyek szükségesek a korszerű radartechnológiák hatékony elsajátításához és alkalmazásához, ebbe a témakörbe tartozik. Az [22] oktatási célú weboldal részletes információkat nyújt a radar működési elveiről és történelmi mérföldköveiről.



1. ábra

Napjaink mérnökpedagógiai folyamatainak órai kezelése a DE MK-n [a szerző]

A főbb képességekre és az oktatási kihívásokra irányítja a figyelmet a 2. ábra. Az előtérben a központ vezetői láthatók, míg mögöttük a radarindikátor-kezelők (ember-gép kapcsolat), a radar különböző részeinél a mérnökök és technikusok teszik a feladatukat. A DE MK-n 2024 végéig közel 500 diák a következő tantárgyakban ismerhette meg a radartechnológia főbb performancijellemzőit: Kiberfizikai rendszerek (Ipar 4.0); Cyber-Physical Systems (CPS) [18] (angol nyelven); Mechatronikai eszközök (érzékelők beavatkozók, motorok); Mérés és adatgyűjtés; Méréstechnika; Measurement Technology (angol nyelven); Cyber Security (angol nyelven) – BSc-szinten; míg a villamosmérnöki (MSc-) tantárgyak: Digitális jelfeldolgozás, Méréselmélet; Szűrők elmélete és gyakorlata; Elektromágneses kompatibilitás (EMC) és interferencia (EMI) tantárgyak. A hallgatók az elméleti radar-alapismereteken túl gyakorlati tapasztalatokat is szerezhetnek. A fejezetek elején megjelenő figyelemfelkeltő megfogalmazások

célja a „mérnökpalánták” jövőbeli feladataihoz való adaptálási idő lerövidítése. Ide tartoznak az órákon túlmutató radarhelyszín-látogatások és mérések. A cikk a Debreceni Egyetem Műszaki Karán a radartechnológiákkal kapcsolatos tématerületeken folyó és az alcímben jelzett munka főbb jellemzőit, sajátosságait és tapasztalatait foglalja össze.



2. ábra
Integrált radartechnológia-képességek [22]

A 3. ábrán a DE MK hallgatói *in situ*² antennamérésekkel összekötött látogatáson vesznek részt a HungaroControl püspökladányi radarantenna-rendszerénél.



3. ábra
In situ antennamérésekkel összekötött látogatás a HungaroControl püspökladányi radarnál [a szerző felvétele]

² *In situ*: helyszínen, természetes környezetben végrehajtott mérés.

A bemutatott oktatási megközelítés a „Mit?“, „Miért?“ és „Hogyan?“ kérdések mentén foglalható össze. Célja a mérnöki alapismeretek, a strukturált problémamegoldás, valamint a kommunikációs és együttműködési készségek együttes fejlesztése. Ezt a technológiai környezet gyors változása és a mesterséges intelligencia terjedése indokolja, amely mellett továbbra is szükség van az önálló mérnöki gondolkodásra és a kapott eredmények kritikus értékelésére. A megvalósítást az „Agykarbantartás” feladatai, a „Nobel-sörök” motivációs rendszere, az egyéni műszaki jelentések és a csoportos feladatok szolgálják. A radartechnológiai példák ezekhez közös alkalmazási keretet biztosítanak, összekapcsolva az elméleti ismereteket a gyakorlati mérnöki problémákkal.

1.1. Korunk mérnökpedagógiai kihívásai

„Amikor megszülettünk, senki sem garantálta, hogy az élet igazságos, környezetünk tisztességes lesz velünk.” – DE MK, szemeszter eleje.

Napjainkban a legfontosabb mérnökpedagógiai feladat az alapismeretek megszerzésén túl a hagyományos mérnöki elvárásoknak és viselkedésformáknak való megfelelés [7], javaslatok megfogalmazása a kommunikációs, és problémamegoldó készségek, valamint a csapatmunka műszaki tantervekbe való hatékonyabb integrálására. Ebben a tekintetben az adott tantárgy anyagának tanítása „csak” másodlagos elvárás. Különösen, mivel az utóbbi évek tapasztalatai szerint a végzős mérnökök 50–60%-a nem szakirányú munkakörben helyezkedik el. Ezért a mérnöki pályafutással kapcsolatos tapasztalatok szerinti elvárások rangsorában a legfontosabb a megbízható és strukturált mérnöki gondolkozásmód kialakítása. Ennek elve a mit, miért és hogyan szempontok szerinti elvárásokra és a cikkben értékelt oktatási struktúrára épül. Módszerünkben hangsúlyt kaptak a mérnöki élettapasztalatokon alapuló meglátások és a napjainkban az oktatás 4.0 és oktatás 5.0 szintjén megjelenő mérnökpedagógiai alkalmazások. Ezek egy része, például a legújabb technológiai kihívások a (szak)oktatásban,³ a projektalapú tanulás,⁴ a laboratóriumi munka sajátos didaktikája⁵ megtalálhatók a [6], [27] hivatkozásokban. A 4. ábrán a radartechnológiák iránt érdeklődő hallgatók és munkatársak láthatók.



4. ábra

Látogatás a Magyar Honvédség bánykúti Gerinc Radar századánál [a szerző felvétele]

³ Recent Technological Challenges in (Vocational) Education.

⁴ Project Based Learning.

⁵ Specific Didactics of Laboratory Work.

2. Radartechnológiákat alkalmazó élenjáró mérnöki elvárások

2.1. A mesterséges intelligencia és az „Agykarbantartás” kihívásai

„Legyőzheti-e az emberiséget a mesterséges intelligencia? Érzelmi válasz: »Soha, lehetetlen, az emberek nagyságrendekkel kreatívabbak, alkalmazkodóbbak! Ez csak egy eszköz!« Pragmatikus válasz: »Semmi esélyünk, ha nem tartjuk karban az agyunkat!«” (DE MK)

A növekvő számítási teljesítmény, a nagy méretű adatok könnyű hozzáférése és a folyamatosan fejlődő mesterséges intelligencia algoritmusok és alkalmazások új hullámának megszületéséhez vezetett. Ezek megváltoztatják életünket, gyártási technológiáinkat, az Ipar 4.0/5.0-t, behatárolják a haditechnikai eszközeinket és üzleti tevékenységünket [10]. A média és a mérnöki társadalom figyelme az MI és annak legismertebb változatai, a ChatGPT és a Copilot lehetséges hatásaira, politikai vonatkozásaira, valamint ezek etikai következményeire összpontosul. Számunkra különösen az oktatással kapcsolatos összefüggések fontosak [14]. A ChatGPT és a hasonló nagy nyelvi modellek mérnöki oktatásra gyakorolt hatását vizsgálja a [21]. Az MI szerepét az online oktatásban és az MI-alkalmazások fő területeit, beleértve a személyre szabott tanulást, az automatikus értékelést és az intelligens oktatási platformokat, elemzi a [24]. Az elosztott MI-összetevőknek nagy sáv szélességű, valós idejű működést biztosító, elhanyagolható késleltetésű, a tanulási és döntéshozatali feladatokat támogató kapcsolatra van szükségük, amellyel biztosítják a nagy mérési pontosságot és az energiahatékonyságot [8]. A gépi tanulás (ML⁶) és a mély tanulás (DL⁷) kulcsszerepet tölt be számos iparág, köztük az oktatás átalakulásában. Innovatív technikáival és alkalmazásaival megváltoztatja a hagyományos tanulási módszereket. E-learning-alkalmazások segítségével a tanárok egyénenként követhetik nyomon az egyes tanulók fejlődését, figyelmet fordítva a hallgató „problémás” munkaterületeire [11]. A cikk elemzi az AI-eszközök által kínált lehetőségeket és kihívásokat, valamint javaslatokat fogalmaz meg a tantervi és pedagógiai adaptációra. Ugyanakkor az MI-alkalmazásokkal kapcsolatban gyakran felmerül a mérnökképzés legfontosabb kérdése: Mitől lesz egy rendszer intelligens? A válasz tömören összefoglalva:⁸

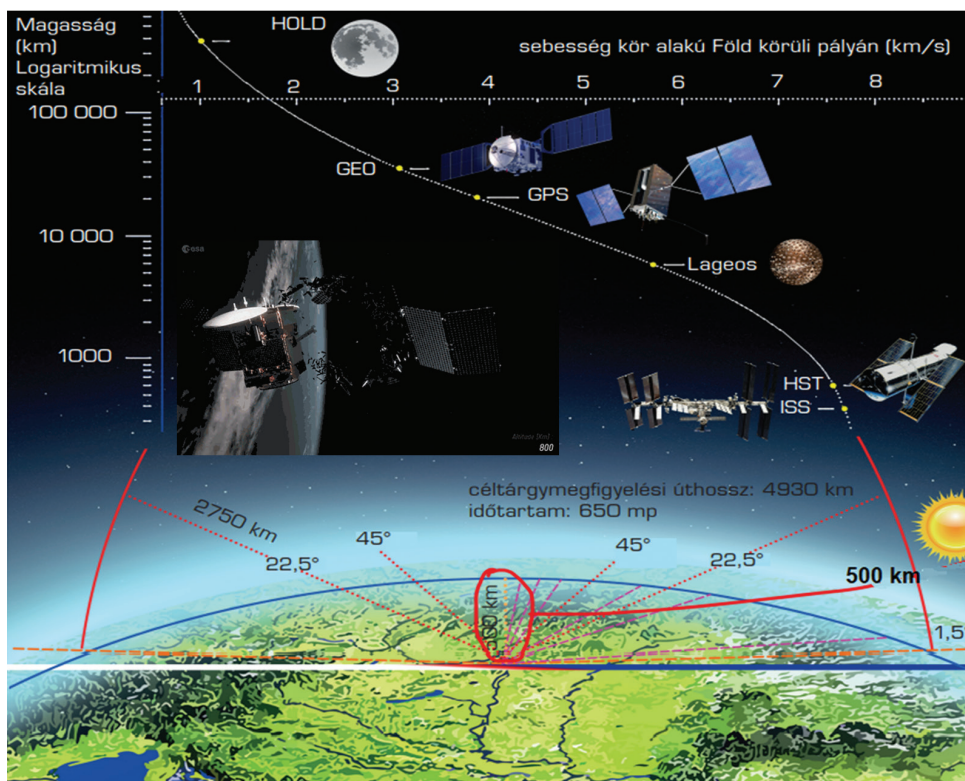
1. A környezetből érkező bemenetekre több differenciált választ képes adni.
2. Az alábbi alrendszerrel rendelkezik:
 - a) érzékelők: a külvilágból érkező információ detektálására és szabványos továbbítására;
 - b) aktuátorok: amelyek a külvilágra, a környezetre hatnak;
 - c) döntéshozók: adott szempontok szerint meghatározzák a külvilágból érkező információra, ingerre adott reakciók nagyságát és irányát.
3. Ezeket az alrendszereket rendszerré kell szervezni, és beépíteni gyakran a már korábban használt eszközbe, gépbe, termékbe, amelyeket intelligensebbé akarunk tenni.

Megjegyzés: Agykarbantartás alatt mindazon mérnöki alapképességeket, viselkedésformát, tudásszintet értünk, amelyek elengedhetetlenek a 21. századi mérnöki sikerek eléréséhez.

⁶ Machine Learning.

⁷ Deep Learning.

⁸ Prof. Korondi Péter DE MK előadásai nyomán.



5. ábra

A Kárpát-medence feletti világűr mérnöki szempontokból [a szerző]

Napjainkban a radar széles körben elterjedt érzékelő az élet minden területén, így az autonóm vezetésben is. A folyamatosan változó komplex környezeti jellemzők valós idejű kezeléséhez intelligens radarok szükségesek. A radarrendszerek működésében és kezelésében az emberi tényező kritikus szerepet játszik, ezért még a digitális „iker” algoritmusokat alkalmazó, kvázi monostatikus radarok sem képesek a kiberfizikai rendszerekben (CPS⁹) az elvárt kiber, fizikai, társadalmi intelligencia (CPSI¹⁰) elvárásokat teljesíteni. Ennek oka az emberi viselkedés hiányos ismerete és a mérnöki munkában való figyelembevétele [10]. Ezek a kihívások tovább erősödnek a kognitív radartechnológiák fejlődésével, valamint a világűrrel kapcsolatos alkalmazások bővülésével, beleértve például a műholdas rendszereket (GPS, televízió, kommunikáció), valamint az in situ megfigyelési és adatgyűjtési feladatokat. Az 5. ábra áttekintést nyújt a helyzetről.

A világűrrel kapcsolatos mérnöki kutatás-fejlesztési tevékenységek – beleértve a hazai törekvéseket is – elsősorban az alacsony, Föld körüli pályán működő műholdakhoz, illetve a Holdhoz kapcsolódó alkalmazásokra koncentrálnak. A kínai űrszonda Chang'e-5 megállapította,

⁹ Cyber-Physical Systems, CPS.

¹⁰ Cyber-Physical-Social Intelligence.

hogy a Hold felszínén más ritkaföldfémek mellett több millió tonnányi hélium-3 található. Ez a Földön rendkívül ritka elem alapvetően fontos az olyan atomerőművek létesítéséhez, amelyek radioaktív sugárzás és gőzturbinák nélkül közvetlenül állíthatnak elő energiát. Napjainkban a NASA¹¹ közzétette, hogy a Holdon nagyságrendekkel több víz van, mint eddig számolták. Ennek következtében valószínűsíthető, hogy legkésőbb 2035-ig állandó bázisok települnek a Holdra, ami új kihívások elé állítja a hazai mérnökképzést is. A tervek megvalósíthatósága szempontjából a legnagyobb kockázatot az alacsony pályákon található űrszemét jelenti. Ezek megtalálása és feltérképezése kiemelten fontos és összetett mérnöki feladat. A munka komplexitását bizonyítja, hogy egy Budapesthez viszonyítva 500 km magas műhold vagy űrszemét a Kárpát-medencéből csak 650 s-en keresztül figyelhető meg. Az erre a feladatra kifejlesztett radarrendszernek ezalatt az idő alatt több mint 40 000 törmelékkel kell detektálnia, útvonalba fognia és azonosítania. A felsorolt feladatok megoldásában döntően fontos összetevő az MI.

Motiváció – Nobel-sörökkel növelhető a mérnöki hatékonyság

„Azt tartják önökről, hogy azért jöttek az egyetemre, mert kőgazdag mérnökök szeretnének lenni. Mások szerint csak arról van szó, hogy még néhány évet eltölthessenek a Mama Hotelben.” (DE MK szemeszter eleje)

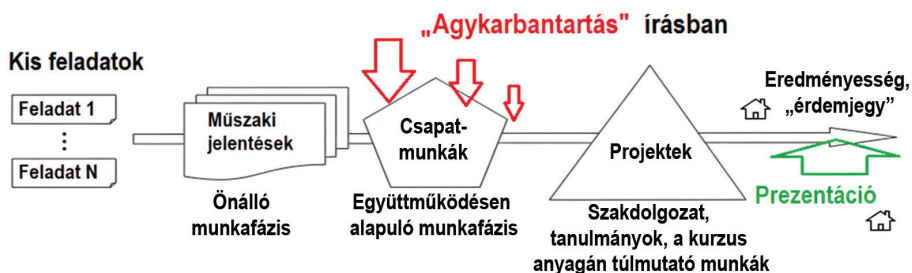
A növekvő felsőoktatási hallgatói létszám, különösen a mérnöki szakokon, megnehezíti a motivált oktatóknak, hogy továbbra is aktív oktatási módszereket alkalmazzanak. A témakör nemzetközi szakirodalmának tanulmányozása szerint a digitális szakértői értékelés bevezetése olyan alkalmazás, amely skálázható visszajelzéseket biztosít az oktatók számára [10]. Az oktatók tájékozódhatnak a nekik megfelelő módszer alkalmazásához szükséges elvárások, eszközök adaptálásáról és/vagy fejlesztéséről. Más megoldások szerint a tanár–hallgató interakciók határfoka tovább javítható kétfordulós Stackelberg-játékelmélet alkalmazásával [4]. Ennek lényege, hogy első körben a hallgatók eldöntik, melyik tanulási feladatforma felel meg nekik a legjobban, majd a második körben a képzési paramétereket és azok alkalmazhatóságának hasznosságát optimalizálják. A DE MK mérnökpedagógiai elvei és elvárásai még nem tartanak ezen a szinten, bár az általunk alkalmazott aktív oktatási módszerek hatékonyak ígérkeznek. Például [16] azonosítja azokat a kompetenciákat és tudásterületeket, amelyeket a mérnöki képzésben elsődlegesen szükséges fejleszteni a CPS-technológiák hatékony oktatásához. A Műszaki Karon alkalmazott módszerek legfontosabb jellemzői az alábbiakban:

- Egyénileg – hogyan legyünk hatékonyak? Saját tulajdonságaink megismerése, feltérképezése:
 - emberi viselkedésformák, személyiségtípusok,
 - hatékony műszaki jelentésírási készség,
 - hatékony előadókészség,
 - általános és szakmaspecifikus mérnöki ismeret – „Agykarbantartás”,
 - projektszemlélet.

¹¹ National Aeronautics and Space Administration.

- Csoportmunka jelentősége és elvárásai:
 - érvelés- és tárgyalástechnika,
 - csoportos, oktató által kijelölt 4 fős, laboratóriumi munkák,¹² műszaki jelentések írása.

A módszer főbb lépéseit a 6. ábra foglalja össze.



6. ábra

Az „Agykarbantartás” koncepció mérnökképesség-fejlesztés lépései [a szerző]

2.3. Hogyan legyünk hatékonyak, Soft Skills¹³ témakörök

Egy hallgató késéssel rohan az órára, rajta „Just do it”¹⁴ feliratú póló. Tanár: „Állj, rossz tanterem felé fut, itt mérnököket képeznek, maga messziről hirdeti, hogy nem lesz az. Make Things Happen & Let's Make It Together. Mi mérnökök megcsináljuk (make) a dolgainkat, míg mások „csak” elméleteket (do) gyártanak arra, hogyan lehetne jobb a világ.” (DE MK, év közben)

A személyes készségek fejlesztése túlmutat a szakmaspecifikus tantárgyak keretein, és magába foglalja a mérnöki viselkedés elvárásait, a környezetünk által felkínált lehetőségek felismerését és kihasználását. Az itt jelzett térmaterületeket külön tantárgyak részletesen tárgyalják, és azok a kreditrendszer részei. Ugyanakkor minden mérnöki tantárgy oktatásánál szükséges erősíteni a fejlődésüket, miközben felkeltjük a hallgatók érdeklődését.

2.3.1. Műszaki jelentések, tantárgyspecifikus feladatok és értékelésük

„Műszaki jelentés írása a FŐNÖKnek, aki mindig elfoglalt, siet, és általában semmire sincs ideje. Mielőtt elhamarkodottan ítélkeznenek a FŐNÖKkel kapcsolatban, jusson eszükbe, hogy önök is hasonló FŐNÖKök lesznek 5–10 éven belül. Ha nem tudják hatékonyan megszervezni saját maguk és beosztottaik munkáját, a fizetések legjobb esetben is csak stagnálnak.” (DE MK, év közben)

¹² A csapat összetétele az egyéni műszaki jelentések színvonalához igazodik, a legjobban együtt és így tovább.

¹³ Személyes készségek.

¹⁴ Csak csináld!

A műszaki dokumentumok készítése kritikus szakmai készség a mérnökök számára, de a mérnökhallgatók gyakran kevésbé fontosnak tartják [16]. [28] részletesen elemzi és igazolja, hogy az íráskészség fejlesztése pozitívan hat a műszaki tartalmak megértésére és elsajátítására. A DE MK által alkalmazott eljárásban a feladatmegoldások egyetemi e-learning-felületen¹⁵ történnek.

- Kis feladat: egy félévben legalább 3-4 db – 1,5 oldal, Word 11 pp formátum, tömören/ szabatosan megfogalmazva. Extra Nobel-sőr kapható például MATLAB Onramp MI-feladatsorok megoldásával szerzett *Certifiketek* bemutatásával.

Absztrakt: 5–6 sor; kifejtés: 55–70%, bevezetés/szakirodalmi összefoglaló, a javaslat/jelentés fő mondanivalója „a lényegi összefoglalót megjelenítő” ábrával maximum: 5 x 7 cm; konklúzió: 5–6 sor; irodalomjegyzék: 10-15%.

(A rövidebbre vagy hosszabbra „sikeredett” feladatmegoldások értékei a Gauss-függvény $[3 = 1, m = 0]$ értékével arányosan csökkennek.)

- Csapatmunka: 1–2 feladat, csapat hallgatói számmal szorzott „Kis feladat” elvárások. Ebben a témakörben is vannak extra Nobel-sőr-szerzési lehetőségek, például szakdolgozat, TDK-dolgozat közös kidolgozása.
- Értékelés: eleinte a tanár feladata, majd a hallgatók egymással konzultálnak, kijavítják a hibákat. A tanár később értékeli. 3 db 80 pont feletti munka = 1 Nobel-sőr lásd 10. ábra, ahol 3 Nobel-sőr – jeles osztályzat. MI használata erősen ajánlott.

Az „Agykarbantartó dolgozatot” legalább 2. szinten kell teljesíteni. Ha elégtelen, az azt jelenti, hogy az egész évi munka szorozva van 0-val. A feladatok komplexitásának érzékelésére az alábbi néhány kérdés szolgál: 1. Mi az Euler-féle szám? Alkalmazásával írja le a „sin x” és „cos x” függvényeket és értékelje az eredményt! Mi a Dirac-delta függvény, és miért fontos a mérnöki tevékenységekben? 2. Mik az elektromágneses spektrum legfontosabb fizikai jellemzői? Rádióhullámok alkalmazásával mikor tudunk több információt átvinni, ha 2 GHz-t vagy 8 GHz-t alkalmazunk? Miért? Mit nevezünk transzverzális hullámnak? Mit nevezünk longitudinális hullámnak? Mitől függ egy antenna polarizációja? Mit értünk vízszintes, elliptikus és lineáris polarizáció alatt? 3. Írja fel a RADAR-egyenletet! Értékelje a változókat! Milyen tényezőktől függ az antenna erősítése? Írja fel az egyenletét! Ha a 81 GHz frekvencián üzemelő automobil-radar hatótávolsága 300 m, hogyan változik a hatótávolsága, ha minden más paramétere változatlan marad, de a frekvencia 24 GHz-re csökken? 4. Mi a jel-zaj viszony és mit mutat meg? Írja fel az egyenleteit! Írja fel a vevő zaj teljesítmény egyenletét! Milyen tényezőktől függ a rendszer ekvivalens zajhőmérséklete? 5. Mi az impedancia és mit mutat meg? Mit nevezünk feszültség-állóhullámaránynak (VSWR¹⁶)? Mi az S-paraméter, mire használjuk? Rajzolja fel a Smith-diagramot és jelölje a legfontosabb jellemzőit!

Prezentáció, záróvizsga: tanév végi 10 perces, 12 diás előadás. Tantárgyhoz kapcsolódó, szabadon választott témakörben.

¹⁵ Számítógépes hálózaton elérhető képzési forma.

¹⁶ *Voltage Standing Wave Ratio*.

2.3.2. „KISS(+S) principális”, elvek

A mérnöki munka fejlődése egyértelműen az előző években megszokott sokkal összetettebb kommunikációs útválasztási, vezérlési és számítási algoritmusok alkalmazásához vezet. Ezek szükségesek ahhoz, hogy hatékonyan működhessenek, miközben minden változik az alrendszerek szintjén. Az áttekinthetőség miatt célszerű a KISS-elv ismerete és alkalmazása – a KISS-elv szerint a legtöbb rendszer akkor működik a legjobban, ha egyszerű, nem bonyolult, áttekinthető és strukturált. A KISS rövidítés értelmezése mérnökpedagógiai szempontok szerint:

- KISS – *Keep it Structured and Simple!* – alpmérnöki gondolkodásmód;
- KISS+S – „Legyen strukturált, egyszerű és okos!”¹⁷ – haladó mérnök;
- KISS+SS – „Legyen strukturált, egyszerű, okos és rövid!”¹⁸ – élenjáró;
- *Less is More* – „A kevesebb az több” – mindent visz, de nehéz megvalósítani.

„Tegyen mindent a lehető legegyszerűbbé, de ne egyszerűbbé.”¹⁹ (Albert Einstein)

2.3.3. Az emberi viselkedés sémáival kapcsolatos kihívások

„A maguk generációja semmivel sem jobb, mint az enyém. Pedig volt 20–23 évük, hogy jobbak legyenek. Apuci? Anyuci? Nem hallgattak rájuk? Nagyapó? Nagyanyó? Gondolom, előadják a cuki unoka figurát, és az öregek elérékenyülnek. Remélem, nem gondolják, hogy ez nálam is beválik?” (DE MK, év közben)

Carl Gustav Jung pszichológus szerint az emberek négy alapvető funkció szerint gondolkodnak, illetve cselekednek: érzékelés, intuíció, gondolkodás és érzelem. Viselkedésünk és döntéshozatalunk szempontjából ez tovább bontható önmagunk, környezetünk ismerete, elfogadása és el nem elfogadása jellemzőkkel. Ezek alapján további személyiségtípusokat különböztetünk meg. Minden tulajdonság alapvetően fontos az emberiség fennmaradása szempontjából. Valószínűleg ezek aránya ezért nem változott jelentősen az évmilliók során, ugyanakkor a hatékony mérnökökre általában asszertív²⁰ tulajdonságok jellemzők. Ezért hallgatóink személyiségtípusainak megismerésével, a tématerületre való figyelmük felkeltésével és az oktatási metodikában való alkalmazásával elérhető, megengedhető(?), hogy a félév végén *ne legyen bukás*. Igaz, előfordul, hogy az inaktív hallgatók azzal *tisztelik meg tanáraikat*, hogy még legalább további egy féléven keresztül hallgatják az előadásait!

Az emberi viselkedési sémákkal kapcsolatos problémakör különösen az emberi viselkedés megértése területén fontos, mivel ezeket a megoldásokat a mérnököknek külön kell alkalmazniuk a mindennapi életükben és mérnöki megoldásaikban. Például az ember-számítógép kapcsolatrendszer jelentősen bővült az élet minden területén, beleértve a szociális robotika területeit, a lakossági elvárásoknak megfelelően [3], [20].

¹⁷ *Keep it Structured, Simple, and Smart.*

¹⁸ *Keep it Structured, Simple, Smart, and Short.*

¹⁹ *Make everything as simple as possible, but not simpler.*

²⁰ Határozott, magabiztos személyiséget mutató.

2.3.4. Az érvelés- és tárgyalástechnika kihívásai

„A harag és a félelem rossz tanácsadók; a szerelem vak; a szívnek nem lehet parancsolni; éhes disznó makkról álmodik; aki fél, annak a szél is ellensége.” (DE MK)

A valós mérnöki tevékenységek mindig tartalmaznak bizonyos mennyiségű tárgyalást. A téma fontossága és komplexitása mindenki számára ismert, de a hatékony mérnokok ismerik, felismerik a lehetőségeket. Lásd a részleteket [26]. A legfontosabb kérdés, hogy meggyőzni vagy legyőzni akarjuk lehetséges üzleti partnerünket?

- Cél: megkapni a számunkra lehető legjobb „csomagot”. (Nem a legtöbbet kapni!). Ehhez a másik félnek is jó csomagot kell kapnia! *Mondjuk ki a tárgyalási célt!*
 - Legfontosabb tárgyalóeszköz: a kérdés! (Ha tudjuk, mit tudunk kínálni.) Ilyenkor ismerjük a kérdésre adható válaszokat, és a *válasz alapján határozzuk meg a tárgyaló fél felkészültségét.*
- Tárgyalás előtt határozzuk meg a saját és a másik fél preferenciáit!

A tárgyalás folyamatát tapasztalatokon alapuló elvek szerint célszerű felépíteni:

- nyitás (előkészítés/hangulat/könnyebb napirendi pontok előre);
- szükségletek feltérképezése (egyetértési pontok azonosítása, könnyen megoldható konfliktuspontok előre csoportosítása, alternatív opciók, kreativitás, közös gondolkodás);²¹
- zárás (konklúziók, az elvárások nyomon követése, még akkor is, ha látszatra nem értük el a kitűzött célt);
- *Win-Win* stratégia²² alkalmazásának fontossága (lásd a 7. ábrát a tárgyalási elvárások és a lehetőségeink folyamatos értékelhetősége szempontjából).



7. ábra
Tárgyalási elvárások, lehetőségek [a szerző]

Ugyanakkor gyakran találkozunk érzelmi alapú érveléssel. Ez a meggyőzési technika a hallgatóság érzéseire, vágyaira, félelmeire vagy előítéleteire hat a *tények és a szigorú logika helyett*. Gyakorlati szempontból ez nagyon hatékony meggyőzési forma, bár a mérnokok érvelési hibának tekintik, ha az *érzelmek a bizonyítékokat hivatottak helyettesíteni*. A magyar

²¹ Gyakran használt angol kifejezése: *Brainstorming*.

²² Mindkét fél számára kedvező, győztes, stratégia.

közmondások pontosan leírják azt az emberi sajátosságot, amelyre ez a technika épít. Ahol az *érzelmeink könnyen elnyomják a józan eszünket és a logikát*. Legfontosabb típusaik egy-egy közmondással érzékelhetők. Ennek a hatásnak a csökkentésére napjainkban már különböző érzékelőkből származó adatokat használnak a viselkedési minták azonosítására, például egészségügyi monitorozásban és az ember-gép interakciókban [2].

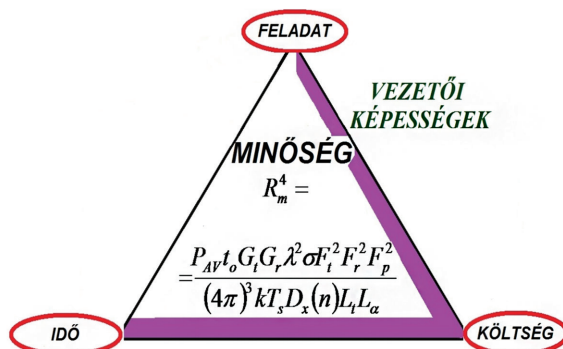
2.3.5. A projektszemlélettel kapcsolatos mérnöki kihívások

A projektszemlélettel kapcsolatos mérnöki kihívások rendkívül kritikus alkalmazások kezelésére szolgálnak, különösen az IoT, az Ipar 4.0 és az okosvárosok megvalósítási folyamataiban. Ezért a mérnököknek ismerniük kell az alapokat. Lásd a részleteket [17], [23]. Röviden:

- A projekt időszaki vállalkozás, amely egyedi „terméket” hoz létre vagy szolgáltatást nyújt.
- A projektmenedzsment folyamatokat, módszertanokat, technikákat és eszközöket alkalmaz a projekt tervezésében, végrehajtásában, követésében és zárásában. (Magyarázata a 8. ábrán a radartechnológiára vonatkozó részletekkel.)

Tulajdonosi elvárások:

- legyen költséghatékonyabb a jelenleginél;
- a tulajdonosi érdekek kiegyensúlyozása:
 - rövid távon > a bevételek maximalizálása: minden elérhető erőforrásnál;
 - hosszabb távon > fenntarthatóság, mértékletesség – üzleten belül maradni;
- előnyök, hátrányok és a kockázat értékelése minden esetben elvárás.



8. ábra
Projektháromszög a radartechnológiai esetekre [a szerző]

2.3.6. A csapatmunkával és a kommunikációval kapcsolatos kihívások

„A hátsó sorokban ülők általában nem túl aktívak az órákon, viszont rendszeresen kiscsoportos »önképzéseken« vesznek részt. Például söröskorsókat emelgetnek, fociznak. Az éltanulók viszont

az egyéni eredményeikre büszkék. Joggal. De Superman és Superwoman csak a mozifilmekben sikeresek, a valódi műszaki eredményeket csapatmunkában hozzuk létre.” (DE MK, előadásokon)

Az átfogó projektcélok elérése érdekében sok csapatnak kell együtt dolgoznia. Minél több csapat van, annál nagyobbak a munkafolyamatok koordinációjával kapcsolatos követelmények. Az MI növekvő népszerűsége ellenére a csapatok közötti koordináció komoly kihívást jelent az elméleti és a gyakorlati megvalósítás, valamint a kutatás-fejlesztés számára. A nagy léptékű célratörő műszaki fejlesztések, testreszabott módszerek és folyamatok a folyamatos képességnövekedés biztosítása érdekében. Lásd a további részleteket [18].

A DE MK hallgatók számára feldolgozandó főbb csapatmunkakészségek:

- kommunikáció,
- konfliktuskezelés,
- hallgatás a társakra,
- megbízhatóság,
- tiszteletudás,
- meggyőzési és befolyásolási, vezetői készségek.

További elvárások: mások elismerése, aktív hallgatás, együttműködés, elkötelezettség, bizalom, bizalomépítés, kreatív gondolkodás, kritikus gondolkodás, problémák meghatározása, ösztönzés, bátorítás, ötletek kibővítése, rugalmasság, logikus gondolkodás, csapatépítés és sok minden más. A lényegét jól kifejezi a 9. ábra, bizonyítva, hogy bár furcsa, de hatékony lehet a katonaságnál gyakran emlegetett módszer: „Ami kerek, azt visszük, ami szögletes, azt gurítjuk, az okát ne kérdezzék! A lényeg, hogy oldják meg a feladatot.”



9. ábra

Csapatmunka, in situ mérésadatgyűjtés belső környezete Ferihegy TAR 1 [a szerző felvétele]

2.3.7. A matek „csak” eszköz, de alapvetően fontos a mérnöki megoldáshoz

„A gravitáció törvényeinek nem ismerete nem véd meg a hasra eséstől.” (DM MK)

A 21. század elején a mérnöki teljesítmény elvárásai a matematikai alkalmazásokkal kapcsolatos új követelmények megjelenéséhez vezettek. A különböző számítási módszerek

mérnöki oktatásban betöltött szerepét, a pedagógiai megközelítéseket, a numerikus és algoritmikus készségek elsajátítását segítő eszközöket értékeli a [17]. Az MI által támogatott matematikai alkalmazások, modellek elengedhetetlenek komoly mérnöki szimulációkhoz, amelyek házi feladatok használatával jól gyakorolhatók [14]. Természetesen a komplex mérnökpedagógiai rendszerek megvalósítása során számos hiba, félreértés merülhet fel, amelyek megghiúsítják a kitűzött célok elérését, egyben jelentős erkölcsi és pénzügyi veszteségeket eredményezhetnek [6]. Ezért célszerű a mérnököktől elvárt tudás összetevőinek keverése. Például a mechatronikai mérnökök legfontosabb kompetenciaterülete a rendszerelemzés, -tervezés, -vezérlés és a rendszermodellezés, amely minden mérnöki tevékenység alapja [9]. Itt megfigyelhető, hogy a mérnöki feladatok megoldásához szükséges matematikai eszközök jelentősen eltolódtak a numerikus módszerek felé [10]. A radartechnológiák területén a gyorsan bővülő kapacitások és számítástechnikai, hálózati rendelkezésre állás legfontosabb összetevői:

- a differenciálegyenletek különféle alkalmazásai;
- a koherens jelfeldolgozással kapcsolatos vektoriális algoritmusok; a Fourier-sorok különböző módszerekkel történő számításainak előnyei vs. hátrányai;
- a sztochasztikus, véletlenszerű folyamatok nemparametrikus algoritmusokkal történő kezelése.

2.4. Az Agykarbantartás eredményeinek összegzése

„Mi a mérnök szó jelentése? Legalább kétszer, háromszor megmérjük, mielőtt megcsináljuk. Így is, első alkalommal, gyakran elcsesszük.” (DM MK)

A 10. ábra az „Agykarbantartás és Nobel-sörök” koncepciót alkalmazó mérnökpedagógiai módszerek alkalmazásának eredményességét szemlélteti egy félévre vonatkoztatva. Minden félév végén hasonló „Agykarbantartás – Nobel-sörök” táblázatok készülnek a radartechnológiákat tanuló évfolyamokon. Ez csak egy példa, amely a kiberfizikai rendszerek tantárgy hallgatóinak részfeladat-eredményeit mutatja.

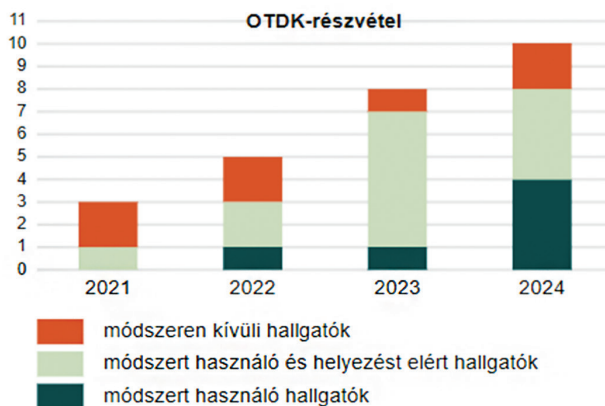
Név	Agykarbantartás	KF1a/b	KF2a/b	KF3a/b	KF4a/b	Teams	CSM1a/b	CSM2a/b	Extra1	Extra2	Előadás	Nobelsörök státusz	Ért.
1	60/72	92/92	85/85	82/82	88/88/817	26	91		Mat_Cert	Conf_Kész	4		5
2	89	89/89	85/85	87/87	85	6, 20, 27	91/91/85	89/89/90			5		5
3	60/83	89/89	87/87	88/88		7, 10, 24	45/92				5		5
4	40/50/68	84/84		84/84		42, 44, 47	85/92	89/	Mat_Cert		5		5
5	66	85	85	85	85/84	3, 20, 27	55/85/95	90/	Matlab??	Conf?	4		4
6	60/78	88/88	85	85/85	88/88	4, 10, 24	86/80/85	85/92	Mat_Cert		47		5
7	60/61/50/70	82	77	81		11, 17, 46	88/85/91			Mat_Cert	57		3
8	45/60/50/68	78/78	79/79	82/82		12, 14, 19	65/85		Matl_Cert	Conf?	2		3
9	64/74	81	88	91	90	4, 7, 24	90/92		Matlab??		3+		4
10	30/50/50/76	83	85	84	80	8, 17, 46	85/	85/	Matlab??	Conf?	4+		4
11	30/72	79/79	79/79	79/79	85/85	9, 14, 19	80/55/785	89/	Mat_Cert	Conf_Kész	3		4
12	82/82	88	85/85		88	25, 28, 36	45/85/90		Mat_Cert		3		4
13	30/75	85	79			9, 12, 19	85/80		Mat_Cert	Conf_kvél	4		3
14	98		86	91		29, 32, 35	45/95		Mat_Cert	Conf?	2++/57	Nyári felmérések - Cikkírás MI területén	37/5
15	56/86	68	78/78	79/79	81	18, 37, 39	85/		Mat_Cert		3		3
16	66	79/79	85/85	79/80	80/80	8, 11, 46	89/89/85		Matl_Cert		3		3
17	66	85/85	77/77	82	90	16, 37, 39	90/		Mat_Cert		3		3
18	64/60/50/68	84	87			9, 12, 14	85/		Mat_Cert		57/3		3
19	76	91/84	85	89/89		3, 6, 27	85/95	90			3		3
20	45/66	79	79/79	82/82	88/82	22, 31, 45	82/82/82		Matlab??	Conf?	3		4
21	35/66	75/75	78		84	21, 31, 45					?		1
22	60/84	95/89	90	91/91	89/89	33, 41, 43	55/89/90		Mat_Cert		57		5
23	60/67	88/88	89/89	91/91		4, 7, 10	45/95			Conf_Readva	57		5
24	52/66	79/79	84		81/81	13, 28, 36	88/75/91				3		3

10. ábra

„Agykarbantartás” és Nobel-sörök feladat teljesítményösszegző ábra [a szerző]

Az Agykarbantartás oszlop az 5. vagy 6. héten írt írásbeli dolgozat eredményét tartalmazza. Elégtelen osztályzat esetén ajánlott újrainni. A KF1a/b, KF2a/b, KF3a/b és KF4a/b „Kis feladatok”, „Jelentések a főnöknek” eredményei. Ezek alapján alakulnak a csapatok, „Teams”, ahol azonos, például a legjobb, kevésbé jó, megfelelő egyéni eredményeket elérők kerülnek egy csoportba. A csapatmunka eredményességét a CSM1a/b és CSM2a/b oszlopok jelzik. Ide jegyezzük be a TDK- (Tudományos Diákköri Konferencia) munkákkal és extra feladatok megoldását vállaló hallgatókkal kapcsolatos megjegyzéseket. A félévet a szóbeli vizsga „Előadás” zárja. Ennél és az „Agykarbantartó dolgozat” esetén mindenfajta segédeszköz, kalkulátor, MI használata tilos; csak a saját kognitív képességeikre támaszkodhatnak a hallgatók. Minden más feladat megoldásánál tanári elvárás az MI használata. Az alkalmazott módszer lényege: a hallgató először oldja meg a feladatot saját kognitív képességeivel, „papíron, ceruzával”, majd pontosítsa MI-használattal, végül az értékelést tanár vagy egy hozzáértő szakember közreműködésével pontosítsa, és a tanulságok levonásával zárja le. Az oktatási módszer sajátossága, hogy a rendkívül szoros és intenzív tevékenységek miatt nincs, vagy elhanyagolható az osztályismétlés. A módszer elterjedése, bevezetése a kihívásalapú hazai hadmérnökképzés alapja lehet, hiszen honvédelmünk csak magyar ipari-oktatási kultúra alapján építhető fel gazdaságosan és hatékonyan [5].

A tudományos tevékenység eredményei keretében vizsgáltuk a hallgatók hazai OTDK- és nemzetközi konferenciákon, folyóiratokban való publikálási eredményességét. A 11. ábra szemlélteti a módszer tudományos tevékenységek területén elért eredményeit. Látható, hogy az új módszerben tanított diákok egyre gyakrabban és sikeresebben vesznek részt ezekben a tevékenységekben. A benyújtott dolgozatok számának növekedése mellett a díjazott hallgatók száma is jelentősen megnőtt. Erre jó példa [15], de további jelentős eredményeket sorol fel és értékel [16].



11. ábra

A DE MK „Agykarbantartás” módszer hatása a tudományos tevékenységre [5]

3. Konklúzió: Merre tovább?

„A debreceni akkumulátorgyár megépítése nagyon veszélyes, különösen a hazai politikai és jogi körülmények között!” „Ha az emberiség nem fedezi fel a tüzet, most nem lenne szükség tűzoltóságra.” Ezért, mérnöki elvárások szerint, csapatmunkában, műszaki jelentést kell írni az akkumulátorgyártásról a jelenleg érvényben lévő magyar és EU-szabványokra, gyártástechnológiai elvárásokra koncentrálva. Indok: „Ha nem tanulják meg a szakmájukat, és komolyabb esemény történik a gyárban, akkor csak a mérnököket lehet lecsukni, mivel egyértelműen bizonyítható a mérnöki kompetencia hiánya. Ráadásul egy üzemi balesetben a gyár környékén élő saját családjuk is sérülhet.” (DM MK)

A cikk összefoglalta a Debreceni Egyetem Műszaki Karán folyó „Agykarbantartás és Nobel-sörök” aktív oktatási módszerének sajátosságait és kihívásait. Napjainkban a hallgatói állomány szociális háttere eltolódott az „érzelmi alapú” internet és az „okostelefon használata” irányába. Ugyanakkor az MI gyors térhódítása további új kihívásokat és megoldásokat kínál. Ebből egyenesen következik a mérnökpedagógiai elvárások jelentős változásának szükségessége.

Az oktatási metodikát a szerző saját és egyetemi kollégái tapasztalatait felhasználva, a DE MK helyi követelményekhez adaptálva kezdte alkalmazni. A módszer legfontosabb elvárásai:

1. Szükség van a mérnöki gondolkozásmód hatékony erősítésére. Ez a feladat reálisan megoldható a mit, miért, hogyan kérdéskörök szisztematikus, hallgatók általi, minden elvégzendő feladatra vonatkozó értékelésével.
2. A mesterséges intelligencia beépül mindennapi alkalmazásainkba, ezért hatékony kezelését ki kell tapasztalni. Ebben a folyamatban a mérnöki *kreativitás* döntő tényező.
3. A hatékony mérnöki megoldásoknál, ezek elfogadtatásánál és alkalmazásánál ki kell használnunk magunk, környezetünk és a pszichológia alapismerete nyújtotta előnyöket.

Minden aktív oktatási módszer sajátossága és talán hátránya, hogy *rendkívül munkaigényes, ezért gyakran túlterheli az oktatókat, és a hallgatók számára is komoly többletmunkát jelent.* Egy átfogó áttekintés és útmutató a hibrid ember – mesterségesintelligencia-rendszerek vonatkozásában: [25]. A szerzők bemutatják, hogyan kombinálható az emberi és a gépi intelligencia a hatékonyabb döntéshozatal és problémamegoldás érdekében. Remélhetőleg a szociális robotika területén elért kutatási és fejlesztési eredményeket mielőbb bevezethetjük az oktatók feladatainak robotasszisztensekkel segítése által.

A csatolt szakirodalmakkal összevetve megállapítható, hogy az „Agykarbantartás” és „Nobel-sörök” koncepciók további kutatásokra alkalmas *State-of-the-Art* mérnökpedagógiai megoldásokat kínálnak.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetet mond a Debreceni Egyetem Műszaki Kara vezetésének, oktatóinak, adminisztratív dolgozóinak, külön a Mechatronikai Tanszék munkatársainak, hogy lehetőséget adtak, támogatták munkámat, majd segítettek élettapasztalataim átadásában a jövő mérnök-nemzedéke számára. A módszer kidolgozásában nagyon lelkiismeretes és alapos munkával

közvetlenül részt vett Dr. Kocsis Imre és Dr. Burján-Mosoni Boglárka, valamint közvetetten a tantárgyakon átívelő feladatkonceptciók terén Dr. Korondi Péter, amelyért valamennyiük hálával tartozom.

Felhasznált irodalom

- [1] P. Abichandani et al., „Internet-of-Things Curriculum, Pedagogy, and Assessment for STEM Education: A Review of Literature,” *IEEE Access*, 10. évf. 1. sz. pp. 31624–31667. 2022. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3164709>
- [2] I. R. Adochiei et al., „Human Behavior Recognition System using Physiological Signals,” in *13th International Symposium Advanced Topics Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, 2023, pp. 1–4. Online: <https://doi.org/10.1109/ATEE58038.2023.10108220>
- [3] T. Alexander et al., „Mobile Communications and Networks,” *IEEE Communications Magazine*, 58. évf. 5. sz. pp. 48–48. 2020. Online: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2020.9112741>
- [4] M. S. Allahham et al., „Motivating Learners in Multiorchestrator Mobile Edge Learning: A Stackelberg Game Approach,” *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 46. évf. 1. sz. pp. 69–76. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/ICJECE.2022.3206393>
- [5] I. Balajti, „Gondolatok az Education 5.0 alapú hadmérnökképzés szükségessége és megvalósításának elvárásai témakörben: Hogyan képezzünk Ipar 5.0 környezetbe integrált Dobó Istvánokat és Bornemissza Gergelyeket?,” in *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből VI.* Padányi J., Gőcze I. szerk. Budapest, Ludovika, 2025, pp. 7–32. Online: https://doi.org/10.36250/01323_01
- [6] M. Berntzen et al., „A Taxonomy of Inter-Team Coordination in Large-Scale Agile,” *IEEE Transactions on Software Engineering*, 49. évf. 2. sz. pp. 699–718. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/TSE.2022.3160873>
- [7] B. Burján-Mosoni, I. Balajti, I. Kocsis, „Expanding Soft Skills Development Across Undergraduate Engineering Education,” *Journal of Integrated Design and Process Science*, 2026, pp. 1–19. Online: <https://doi.org/10.1177/10920617251409518>
- [8] C. Campolo, A. Iera, A. Molinaro, „Network for Distributed Intelligence: A Survey and Future Perspectives,” *IEEE Access*, 11. évf. pp. 52840–52861. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3280411>
- [9] R. Carrasco-Navarro et al., „MEIoT 2D-CACSET: Educational Toolkit for Cartesian System,” *Sensors*, 22. évf. 9. sz. 2022. Online: <https://doi.org/10.3390/s22134802>
- [10] R. Clark, A. Kaw, „Adaptive Learning in Numerical Methods Course,” *Applications in Engineering Education*, 30. évf. 1. sz. pp. 62–79. 2022. Online: <https://doi.org/10.1002/cae.22175>
- [11] N. M. Gyöngyössy et al., „Supervised Learning for Gesture Recognition by Spiking Neural Networks,” in *IEEE Symposium Series Computational Intelligence (SSCI)*. Xiamen, 2019, pp. 2201–2206. Online: <https://doi.org/10.1109/SSCI44817.2019.9002720>
- [12] G. V. Helden et al., „The Use of Digital Peer Assessment in Higher Education – An Umbrella Review of Literature,” *IEEE Access*, 11. évf. pp. 22948–22960. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3252914>

- [13] I. Holik, I. D. Sanda, „Gondolatok a gyakorlati mérnöktanárképzésről,” *Pedagógusképzés*, 20. évf. 2. sz. pp. 112–119. 2021. Online: <https://doi.org/10.37205/TEL-hun.2021.2.07>
- [14] H. Ibrahim et al., „Rethinking Homework in the Age of Artificial Intelligence,” *IEEE Intelligent Systems*, 38. évf. 2. sz. pp. 24–27. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/MIS.2023.3255599>
- [15] K. Á. Kis et al., „Quarter Car Suspension State Space Model and Full State Feedback Control for Real-Time Processing,” in *2023 Signal Processing Symposium (SPSymposium)*. Karpacz, 2023, pp. 73–78. Online: <https://doi.org/10.23919/SPSymposium57300.2023.10302720>
- [16] I. Kocsis, B. Burján-Mosoni, I. Balajti, „A Comprehensive Review of Key Cyber-Physical Systems, and Assessment of Their Education Challenges,” *IEEE Access*, 13. évf. pp. 8898–8911. 2025. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3527714>
- [17] N. Leger, B. Berhane, „Literature Review on Computational Methods in Engineering Education,” in *ASEE Annual Conference & Exposition*. Minneapolis, 2022.
- [18] Y. Liu, et al., „RadarVerses in Metaverses: A CPSI-Based Architecture for 6S Radar Systems in CPSS,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 53. évf. 4. sz. pp. 2128–2137. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3228590>
- [19] F. Montori et al., „An IoT Toolchain Architecture for Condition Monitoring,” *IEEE Access*, 11. évf. pp. 6837–6856. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3237971>
- [20] B. Nagy, P. Korondi, „Deep Learning-Based Recognition and Analysis of Limb-Independent Dog Behavior for Erorobotical Application,” *IEEE Access*, 10. évf. pp. 3825–3834. 2022. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140513>
- [21] J. Qadir, „Engineering Education in Era of ChatGPT,” in *IEEE Global Engineering Education Conf. (EDUCON)*. Kuwait, 2023, pp. 1–8. Online: <https://doi.org/10.1109/EDUCON54358.2023.10125121>
- [22] „Radar History,” Radartutorial.eu. Online: radartutorial.eu
- [23] F. Sanfilippo et al., „Teaching Motion Control Using Elevator Model Framework,” *Machines*, 10. évf. 2. sz. p. 126. 2022. Online: <https://doi.org/10.3390/machines10100945>
- [24] R. Shafique et al., „Role of Artificial Intelligence in Online Education: A Systematic Mapping Study,” *IEEE Access*, 11. évf. pp. 52570–52584. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3278590>
- [25] F. Shi et al., „Survey and Tutorial on Hybrid Human-Artificial Intelligence,” *Tsinghua Science and Technology*, 28. évf. 3. sz. pp. 486–499. 2023. Online: <https://doi.org/10.26599/TST.2022.9010022>
- [26] P. D. Sree et al., „Product Negotiation in E-Commerce using Chatbot,” in *7th International Conference on Computing Methodologies Communication (ICCMC)*, Erode, 2023, pp. 879–883. Online: <https://doi.org/10.1109/ICCMC56507.2023.10083745>
- [27] *Technical and Vocational Education and Training: Issues, Concerns and Prospects*. Springer, 2019.
- [28] M. Wilson-Fetrow et al., „Engineering Students' Writing Perceptions Impact Their Conceptual Learning,” *IEEE Transactions on Professional Communication*, 66. évf. 2. sz. pp. 186–201. 2023. Online: <https://doi.org/10.1109/TPC.2023.3251159>
- [29] MATLAB Help Center – Community – Learning: MATLAB. Online: <https://matlabacademy.mathworks.com/details/matlab-onramp/gettingstarted>

Why and How Can We Become Effective and Successful Engineers?

The "Brain Maintenance" Concept and "Nobel Beers" Motivation in Radar Technology Education

The "Brain Maintenance" and "Nobel Beers" educational concepts, developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen, reinforce fundamental engineering skills through examples of radar technology. This method responds to the rapid technological changes unfolding with Industry 4.0 and the integration of Industry 5.0 and artificial intelligence (AI) into all areas of life, placing particular emphasis on the continuous development of generally expected basic engineering skills, which may also contribute to the revival of domestic military engineering education.

Keywords: *engineering education, artificial intelligence, radar technologies, brain maintenance, Nobel beers, learning motivation, educational innovation*

Balajti István
ny. mk. alezredes
Nemzeti Köszolgálati Egyetem
Katonai Műszaki Doktori Iskola
balajti.istvan@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-3566-2904

István Balajti
ret. Eng. Lt. Col.
Ludovika University of Public Service
Doctoral School of Military Engineering
balajti.istvan@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-3566-2904

Tartalom

POKORÁDI LÁSZLÓ: Hibafaelemzés korrelációs érzékenységvizsgálata	5
BAUER PÉTER: Determinisztikus szenzor mérési hibák kétértelműsége és ennek feloldása GNSS-IMU fúziós állapotbecslő algoritmusok esetén	17
JUHÁSZ OSZVALD: A Magyar Honvédség JAS 39 repülőgépeinek kiszolgálása közúti leszállóhelyen	33
ISTVÁN PAPP, LÁSZLÓ SZILVÁSSY: PL-15(E) Air-to-Air Missile	47
LÁNYI ALADÁR, BALAJTI ISTVÁN: Magyar sikerek az űrkutatásban	63
GÁBOR TERPECZ, GYÖRGY SCHUSTER: Reliability Factors of Unmanned eVTOL Vehicles	83
JEVUCZÓ GÁBOR, BAUER PÉTER: Mágneses szenzorhibák monokamerakép-alapú detektálása pilóta nélküli légi járműveken valós repülési adatok felhasználásával	103
BELLER BALÁZS: A Force Protection repülésbiztonsági szemmel	123
HAJNAL KORNÉL, BÉKÉSI BERTOLD: Precíziós növényvédelmi kijuttatás légi és földi megvalósításának rendszerszintű összehasonlító elemzése	139
BALAJTI ISTVÁN: Miért és hogyan válhatunk hatékony és sikeres mérnökké?	149