REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK

Kiemelt közlemények

Terpecz Gábor:
eVTOL légi járművek biztonsága

Kiss Beatrix, Palik Mátyás:
A drónok katonai alkalmazása modern katonai műveletek során

Szilvássy László:
H-47M2 „Kindzsal” repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta

35. évf. (2023)
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. Óvári Gyula (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)

A szerkesztőbizottság tagjai
Dr. Békési Bertold (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dunai Pál (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Dudás Zoltán (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Károly Krisztián (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Dr. Kavas László (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Makkay Imre (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
Prof. Dr. Pokorádi László (Óbudai Egyetem)
Dr.h.c. doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD, MBA, LL.M (Kassai Műszaki Egyetem, Szlovákia)
Dr. Palik Mátyás (Nemzeti Közszolgálati Egyetem)
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

Paulov Attila: Az Operation Unified Protector a máltai légi navigációs szolgáltató szemszögéből 5

Szilágyi Dávid, Sziroczák Dávid, Fendrik Ármin: Merevszárnyú drónok üzleti alkalmazásai Magyarországon 19

Simon Sándor: Pilóta nélküli légi járművek (típus) megfelelőségértékelésének és a légi járművek folyamatos légi alkalmassága fenntartásának hatása a légi közlekedés biztonságára 35

Ripszám Dóra: A magánszféra védelme a pilóta nélküli légi jármű alkalmazása során . . . 49

Schuster György: A fejlesztésben használt szoftvermodellek alkalmazása és minősítése . . 59

Schuster György: Idősorok alkalmazása szoftvermegbízhatóság előrejelzésére 71

Terpecz Gábor: eVTOL légi járművek biztonsága. 81

Sándor Zsolt, Pusztai Máté: A polgári pilóta nélküli légi járművek EU-s és hazai képzési rendszere 101

Kiss Beatrix, Palik Mátyás: A drónok katonai alkalmazása modern katonai műveletek során 115

Dikácz Csaba: Bombák Berlinre, 1940. június 7–8. 131

Antal Péter, Péni Tamás, Tóth Roland: Autonóm kvadkopterek modellezése, identifikációja és geometriai szabályozása agilis manőverezéshez. 141

Horváth Gábor: A helyszíntől független katonai repülőtéri irányítás optikai rendszerének javasolt verifikációs kerete 161

Dinh-Dung Nguyen, Utku Kale, Muhammed Safa Baş, Munevver Ugur, Tahir Hikmet Karakoc, Dániel Rohács: Fundamental Elements of Drone Management Systems in Air Traffic Planning 169

Varga Béla, Kavas László, Tóth József, Óvári Gyula: Kriogén hajtóanyagok a polgári repülés területén 185

Varga Péter János, Baross Márk Tamás, Wührl Tibor: SDR mint lehetséges drónzavaró eszköz 199

Szilvássy László: H-47M2 „Kindzsal” repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta 211

Csató Péter: A szintetikus tüzelőanyagok alkalmazásának kérdései a repülésben 237

Békési Bertold, Gajdács László, Knapiczius Attila: Drónok meghajtás szerinti lehetséges szerkezeti felépítései. 257

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 5–18. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.1

Paulov Attila

Az Operation Unified Protector[1] a máltai légi navigációs szolgáltató szemszögéből

A háborús konfliktusok minden esetben hatást gyakorolnak a légi navigációs szolgáltatókra közvetlen és közvetett módon egyaránt. Napjainkban különösen aktuális egy szomszédos országban zajló konfliktuson keresztül vizsgálni a légi navigációs szolgáltatás ellátását, felvázolni annak komplexitását, nehézségeit és egyben a polgári-katonai együttműködésben rejlő lehetőségeket. Jelen tanulmányomban a máltai légi navigációs szolgáltató OUP-műveletben való szerepének elemzésére vállalkoztam, bemutatva egyben a szigetország légi közlekedésének rövid történetét, valamint légiforgalmi környezetét.

Kulcsszavak: *légi forgalom, légi művelet, légi navigációs szolgáltatás, repüléstilalmi zóna, repüléstájékoztató körzet, légi jármű*

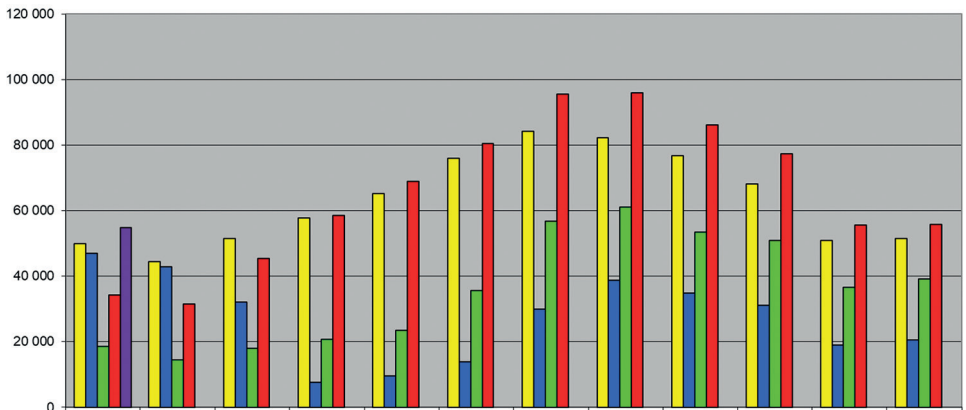
1. Bevezető

2011. március 27-én az ENSZ Biztonsági Tanács 1973-as határozata alapján repüléstilalmi zónát[2] jelöltek ki Líbia felett annak érdekében, hogy megakadályozzák annak a lehetőségét, hogy légi eszközöket vessenek be a polgári lakosság ellen. A nevezett határozat megteremtette a jogi alapját az OUP-műveletnek. Az OUP keretében a NATO légi járművei bevetéseket hajtottak végre líbiai célpontok ellen, továbbá megfigyelést és koordinációt biztosítottak az ország feletti repülési feladatokkal kapcsolatban, továbbá detektálták azokat a légi járműveket, amelyek nem rendelkeztek felhatalmazással az NFZ-ba való berepüléshez. Az OUP, valamint az azt megelőző Operation Odyssey Dawn művelet kezdetekor már egyértelmű volt, hogy a konfliktus jelentős hatást fog gyakorolni a térség légi navigációs szolgáltatóinak mindennapi életében.

Egy háborús konfliktus – legyen az bárhol a világban – minden esetben negatívan befolyásolja az érintett térség polgári légiforgalmát, jellemzően oly módon, hogy a közvetlenül érintett ország feletti légtérben a polgári forgalom közel nullára redukálódik, a szomszédos, a konfliktus lokációjától biztonságos távolságban lévő országokéban pedig többnyire – a repüléstilalom vagy egyéb más korlátozás miatti kerülések okán – növekszik. Ez a tendencia megmutatkozott a közelmúltban történt és az éppen folyamatban lévő háborús konfliktusok során is. Egy hazai példával élve, az orosz–ukrán háború 2022. évi kitörését követően az ukrán légtérben – a kezdeti humanitárius

[1] OUP: Operation Unified Protector.
[2] No Fly Zone, NFZ.

célú repülési feladatok végrehajtása után – a polgári légi forgalom megszűnt, a légitársaságok pedig kerülni kényszerültek, amely során Magyarország légtérfelhasználása növekedett.



	JAN.	FEB.	MÁR.	ÁPR.	MÁJ.	JÚN.	JÚL.	AUG.	SZEPT.	OKT.	NOV.	DEC.
2019	49 991	44 369	51 386	57 678	65 088	75 974	84 135	82 189	76 673	68 080	50 849	51 371
2020	47 013	42 912	32 103	7 567	9 609	13 761	30 012	38 767	34 865	31 119	18 957	20 511
2021	18 519	14 538	17 899	20 810	23 477	35 694	56 729	61 041	53 413	50 800	36 626	39 063
2022	34 250	31 529	45 306	58 506	68 895	80 494	95 627	95 870	86 055	77 366	55 508	55 826
2023	54 727											

1. ábra
BUDAPEST ACC 5 éves forgalmi statisztika [1]

A forgalmi növekmény nagyobb komplexitással is járt, tekintettel arra, hogy a kerülni kényszerülő légi járművek főbb áramlási útvonala éppen azt a keleti országrészt érintette, ahol a katonai műveletek céljára a magyar katonai légügyi hatóság vertikálisan és horizontálisan is nagy kiterjedésű eseti légtereket jelölt ki, amelyeken a polgári légi járműveknek az átrepülés nem volt engedélyezett. Ez a példa is kiválóan szemlélteti a légi járművek irányítását végző légi navigációs szolgáltatók – Magyarországon a HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. – számára azt a nem feltétlenül szerencsés körülményt, hogy egy szomszédos állam légterében zajló háborús konfliktus rövid időn belül jelentősen tudja növelni a légi forgalom komplexitását, egyfajta „háborús" állapotot előidézve az egyébként békeidős tevékenységek során. A forgalom – az 1. ábrán is látható – növekedése azonban nem minden szomszédos országra jellemző, figyelemmel arra, hogy a légitársaságok által kockázatosnak ítélt régiókat és légtereket (például Moldova és közvetetten a Baltikum egésze) a légi járművek üzemeltetői elkerülik, ami alapján elmondható, hogy egy adott konfliktussal kapcsolatban jelen lévő katonai forgalmi növekmény egyben a kockázatot is növeli a polgári szereplők számára.

A fent nevezett komplexitási tényező megmutatkozott az OUP alatt is, ahol a Líbiával szomszédos jelentősebb légi navigációs szolgáltatóknak (Algéria – ENNA,[3] Egyiptom – NANSC,[4] Görögország – HCAA,[5] Málta – MATS,[6] Tunézia – OACA[7]) számottevő többletfeladattal kellett

[3] Établissement National de la Navigation Aérienne.
[4] National Air Navigation Services Company.
[5] Hellenic Civil Aviation Authority.
[6] Malta Air Traffic Services.
[7] Tunisian Civil Aviation and Airport Authority.

megküzdeniük. Tanulmányomban a térség szolgáltatói közül a máltait kívánom elemezni az OUP szempontjából, tekintettel arra, hogy egyrészről földrajzi elhelyezkedése okán a mediterrán térség katonai és közlekedési stratégiai szempontból egyik legmeghatározóbb állama, másrészről – légi navigációs megközelítésből – az Európai Unió legdélibb tagállama, így az észak-afrikai országokkal való koordinációs szerepe jelentős. Munkám során nem részleteztem külön az OUP során a líbiai légtérben végrehajtott légi műveleteket, elsősorban a Málta Repüléstájékoztató Körzetben[8] megvalósult katonai légi forgalomra fókuszálva tanulmányoztam az OUP légi navigációs szolgáltatásra gyakorolt közvetett és közvetlen hatásait. A tapasztalatok felvázolásában nagy segítségemre volt a NATO Légiforgalom-szervezési Bizottság 2011. évi budapesti ülésén elhangzott beszámoló, amely során a máltai léginavigáció-szolgáltató vezérigazgatója felvázolta az OUP alatt szerzett szigetországi tapasztalatokat.

2. A máltai légi közlekedés evolúciója

Málta Európa ötödik legkisebb országa, az Európai Unió legkisebb tagállama, három szigetből (Málta, Gozo, Comino) álló szigetcsoportot alkot. Földrajzi elhelyezkedéséből adódóan a szigetek fölötti uralom megszerzése számos nemzet számára kulcskérdés volt. A 19. század elejéig többször is gazdát cserélt, a föníciai, római, normann, majd francia rövidebb-hosszabb ideig tartó fennhatóság alatt számos alkalommal bebizonyosodott stratégiai jelentősége és jól védhetősége.

Az 1814-es párizsi békével Málta több mint másfél évszázadra brit fennhatóság alá került. A britek fokozatosan ébredtek rá a sziget stratégiai jelentőségére: a krími háborúban, majd a Szuezi-csatorna megnyitása után fontos tengeri bázissá vált (utánpótlás-vételezés, a földközi-tengeri forgalom ellenőrzése, dokkok). 1921-ben Málta részleges autonómiát kapott, majd amikor a brit kormány szükségletei úgy kívánták, jött újra a központosítás, az 1921-es alkotmányt felfüggesztették (1930). 1931 és 1933 között újra életbe léptették, majd – a háborús készülődés jegyében – ismét hatályon kívül helyezték. A második világháborúban a szigetország újra kulcsszerepet kapott: a nyugat-keleti utánpótlási vonalakat kellett biztosítania úgy, hogy közben megakadályozza az Olaszország és Észak-Afrika közötti összeköttetést. Az európai konfliktus kitörése után kilenc hónappal szenvedte el az első német–olasz légitámadást Málta, ezt 1942-ig számtalan további követte [2]. Ezen időszak alatt a tengelyhatalmak a Herkules hadművelet keretében kísérletet tettek volna a szigetcsoport elfoglalására, azonban az észak-afrikai hadszíntéren – a szövetségesek javára – bekövetkezett fordulat miatt erről le kellett mondaniuk. A Husky hadművelet keretében a szövetségesek 1943-ban partra szálltak Szicíliában, amely eseménnyel Málta további részvétele a háborúban lényegében megszűnt. A világháborút követően 1947-ben Málta visszakapta részleges autonómiáját, majd 1964-ben elnyerte teljes függetlenségét.

A szigetország légi közlekedésének gyökerei szintén a brit fennhatósághoz kötődnek. A máltai repülés rövid történetét meglátásom szerint annak egyetlen jelentős repülőterén, a Luqa településhez tartozó Málta Nemzetközi Repülőtéren keresztül célszerű bemutatni. A második világháború kitöréséig a repülés lényegében a Brit Királyi Légierő,[9] továbbá más, elsősorban polgári vállalatok üzemeltetésében lévő hidroplán légi járművekkel történt a Kalafrana

[8] FIR: Flight Information Region.
[9] RAF: Royal Air Force.

repülőbázisról, a „hagyományos" futóműves repülések pedig jellemzően Ta' Qali füves futópályával rendelkező repülőbázisáról működtek. Tekintettel arra, hogy utóbbi repülőbázis nem volt képes minden időjárási körülmény között fogadni a RAF légi járműveit, szükség volt szilárd burkolattal rendelkező repülőteret létesíteni. E követelménynek megfelelően építették ki 1940-ben, valamint kezdetben polgári, majd a RAF nehézbombázó és felderítő légi járművei által műveleti alkalmazásba vették a Luqa település mellett kialakított – a helységgel azonos nevet viselő – repülőteret. A második világháború kitörésével a polgári légi szállítás leállt, és Málta összes repülőterét – beleértve Luqát is – teljes mértékben katonai célokra használták.

A második világháború végén újra megindult a polgári légi szállítás Luqában, aminek folyományaként az 1950-es években a repülőtér komolyabb beruházásokon ment keresztül, két szilárd burkolatú futópályát létesítettek a napjainkban is alkalmazásban lévő tájolással, továbbá a kor színvonalának megfelelő navigációs eszközökkel, illetve utasforgalmi épületekkel is gazdagodott a légikikötő. Ebben az időszakban Európából a Közel-Keletre és az afrikai kontinens déli szegmensébe, illetve onnan visszafelé tartó légitársaságok gyakran használták a repülőteret köztes javító bázisként, ami az ország – légi közlekedési szempontú – stratégiai jelentőségét is bizonyította, egyben jelentős bevételt is termelt. Az 1960-as években a nagy hatótávolságú légi járművek megjelenésével a repülőtér légijármű-javító portfóliója lényegében megszűnt, azonban a turizmus fellendülésével a légi forgalom további növekedésnek indult. Tekintettel arra, hogy a turizmus szektor a légi közlekedési infrastruktúra mielőbbi bővítését sürgette – a repülőtér pedig még mindig túlnyomóan a katonai követelményeknek felelt meg – jelentős fejlesztésekre volt szükség a polgári repülési szegmens kiszolgálása érdekében, amely az 1970-es években kezdődött meg. Ennek megfelelően az egyik futópályát meghosszabbították, valamint műszeres leszállító rendszert (ILS[10] Cat 2) is telepítettek.

A máltai légi közlekedés egyik legnagyobb mérföldköve 1978-ra tehető, amikor is – egy közel nyolcéves előkészítő folyamat eredményeképpen – a Luqa repülőtér üzemeltetése a RAF-tól máltai üzemeltetésbe került, ami lényegében a szigetország szuverén légi navigációs és repülőtéri üzemeltetési rendszerének a kezdetét, a brit katonai jelenlétnek pedig a végét jelentette. Az 1980-as években tovább nőtt a polgári légi forgalom, amely az utasforgalmi terminál bővítését, valamint a légiforgalmi rendszerek, illetve az ezzel összefüggő infrastruktúra további fejlesztését eredményezte. Az 1990-es években a repülőtér utasforgalmi termináljának üzemeltetését az állami tulajdonban lévő Málta Nemzetközi Repülőtér vállalat vette át (a repülések operatív működését biztosító létesítmények a Polgári Légügyi Hivatalnál maradtak), amelyet követően szintén jelentős fejlesztések történtek a repülőtéren. Ekkor már mindkét futópálya rendelkezett ILS Cat 2 leszállító, továbbá RVR[11] rendszerrel, valamint új közelkörzeti lokátor- és fénytechnikai rendszereket is telepítettek. A jelenlegi repülőtér működési modellje 1998-ban alakult ki, amikor is a Málta Nemzetközi Repülőtér teljes mértékben átvette a Polgári Légügyi Hivataltól a repülések operatív működését kiszolgáló létesítményeket, amivel az utóbbi szervezet a továbbiakban kizárólag jogalkotói és felügyeleti funkciót tölt be [3].

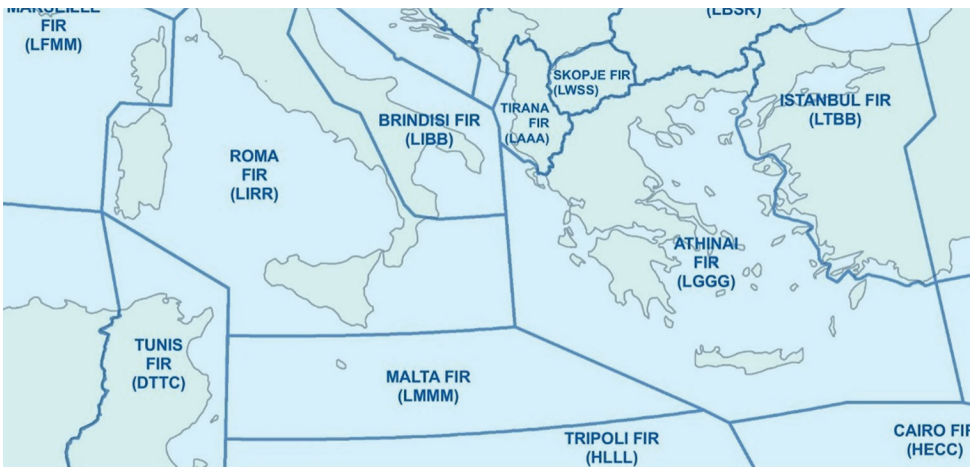
A repülőtéri irányító, közelkörzeti, valamint körzeti irányítói feladatokat 2002 óta a MATS[12] látja el, mint a szigetország egyetlen, teljes mértékben állami tulajdonban álló légi

[10] Instrument Landing System.
[11] Runway Visual Range – futópálya menti látástávolság.
[12] Malta Air Traffic Services.

navigációs szolgáltatója. A nevezett időszakot megelőzően ezt a tevékenységet a Polgári Légügyi Hivatal végezte.

3. A légi navigációs szolgáltatás jellemzői Máltán

Málta 1964-es függetlenné válása óta számos nemzetközi szervezet tagjává vált. A légi közlekedést tekintve tagja az ICAO[13]-nak, az ECAC[14]-nak, az EUROCONTROL-nak, továbbá az Európai Unióhoz való 2004-es csatlakozása okán az EASA[15]-nak is. A MATS 2002 óta egy, a magyarországi FIR-nél közel kétszer nagyobb kiterjedésű FIR-ben lát el légi navigációs szolgáltatást, amely két ECAC (Görögország, Olaszország), és két nem ECAC (Líbia, Tunézia) tagállam légterével határos.



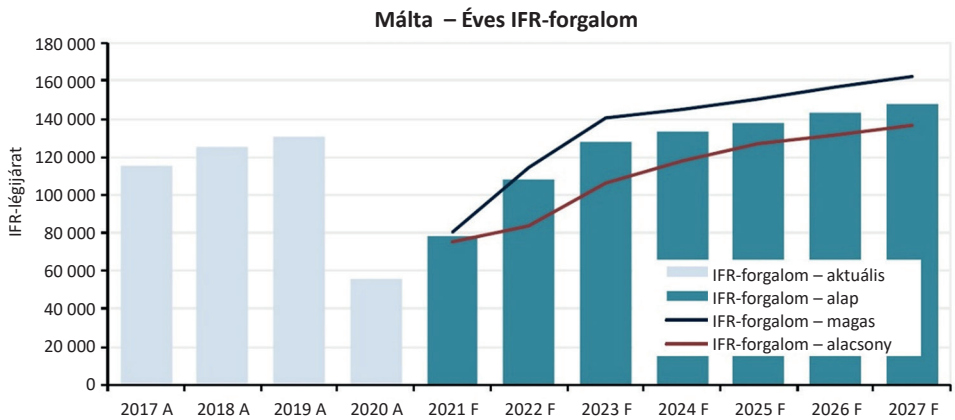
2. ábra
Malta FIR [4]

A MATS a légiforgalmi irányító szolgáltatást az ismert három szegmensben (repülőtéri, közelkörzeti, körzeti) biztosítja a légtérfelhasználók számára a 2. ábrán látható körzetben. A körzeti légiforgalmi irányítás az átrepülő légi forgalom számára összesen két alapszektort tesz elérhetővé, míg Luqa közelkörzeti légterét (TMA[16]) nem osztották fel külön szektorokra. A szabad légtérhasználat (FRA[17]) operatív működését a szigetország két ütemben vezette be, az elsőt Flight Level 305[18] (2016), a másodikat pedig Flight Level 195[19] felett (2022), ezen túlmenően Málta 2024 végéig határon átnyúló FRA-t tervez kialakítani Olaszországgal. Az FRA I–II. ütem bevezetésétől a MATS optimálisabb repülési profil elérhetőségét, ezáltal vonzóbb átrepülési

[13] International civil Aviation Organization, Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet.
[14] European Civil Aviation Conference.
[15] European Aviation Safety Agency.
[16] Terminal Manoeuvring Area.
[17] Free Route Airspace.
[18] 9296 m.
[19] 5943 m.

lehetőséget prognosztizált a légtérfelhasználóknak, különös tekintettel az USA-ból az Öböl menti térségbe repülő légitársaságoknak [5]. Az ACC kiszolgálására a MATS összesen 5 lokátorállomást tart üzemben és/vagy külön szolgáltatói szerződés keretében kap radaradatokat, ebből kettő Máltán (Luqa), egy Olaszországban (Palermo) és kettő Görögországban (Kithira, Lefkas) található.

A légiforgalmi mutatókat tekintve a MATS nem tartozik a nagy európai légi navigációs szolgáltatók közé. A Covid–19 okozta pandémiás időszakot megelőzően a forgalom lassú, de folyamatos növekedésben volt, ami az ismert globális visszaesést követően várhatóan hasonló mértékben kezd majd visszarendeződni.



3. ábra
Málta éves IFR[20]-forgalom kimutatása és előrejelzése [6]

A fenti statisztika és előrejelzés alapján (3. ábra) a MATS nem bonyolít le kiemelkedően nagy átrepülő forgalmat, azonban számos jelentős fejlesztési projektet futtat, eleget téve a vonatkozó európai uniós előírásoknak, valamint biztosítva a szolgáltatás színvonalának folyamatos növekedését. Kiterjedt együttműködést folytat a BLUE MED funkcionális légtérblokk[21] kezdeményezés keretében a vele egy légtérblokkba tartozó ciprusi, görög és olasz légi navigációs szolgáltatókkal, különös tekintettel a szabad légtérhasználat, a határon átnyúló repülési eljárások, a légtérellenőrző rendszerek racionalizálása, az áramlásszervezési eljárások egységesítése, valamint a levegő-föld adatkapcsolat vonatkozásában.

3.1. Málta Nemzetközi Repülőtér

Málta egyetlen – polgári-katonai kettős hasznosítású – nemzetközi repülőtere a luqai Málta Nemzetközi Repülőtér, amelynek tulajdonosi jogkörét – az előző fejezetben foglalt előzmények szerint – az azonos nevű Málta Nemzetközi Repülőtér korlátolt felelősségű társaság gyakorolja.

[20] Instrument Flight Rules.
[21] FAB: Functional Airspace Block.

A repülőtér által szolgáltatott adatok alapján 2021-ben közel 2,5 milliós utasforgalmat bonyolítottak [6], amely azonban alig érte el a Covid–19 előtti érték 40%-át.

1. táblázat
Málta Nemzetközi Repülőtér forgalmi statisztika 2017–2021 (a szerző [7] alapján)

Utasforgalom		Légijármű-műveletek	
Év	Összesen	Év	Összesen
2017	6 014 548	2017	42 987
2018	6 808 177	2018	48 737
2019	7 310 289	2019	51 910
2020	1 748 050	2020	18 982
2021	2 540 335	2021	24 516

Habár jelen tanulmány elkészültéig nem állt rendelkezésre összegzett éves adat a 2022. évi teljes forgalmi mutatókról, a repülőtér által az I. félév végén közzétett információ [8] alapján a nevezett évben 5,4 milliós utasszámot várnak, amely már megközelíti a 2017. és 2018. évi értékeket, de még jelentősen elmarad a 2019. évi kiugró, 7,3 milliós utasszámtól. A nevezett repülőtéren kívül Máltának nincsen jelentős légikikötője, Gozo szigetén található még kettő, egymással 22 m széles aszfaltcsíkkal összekötött heliport, amelyeket elsősorban sürgős egészségügyi esetekben használnak.

3.2. Polgári-katonai együttműködés

A légi közlekedést tekintve a polgári-katonai együttműködés Máltán – az ország nagyságából adódóan is – szoros. Az 1964-ben megalakított – a belügyi tárca alárendeltségében működő – Máltai Fegyveres Erők az ország területi integritásának védelmén kívül jelentős mértékben veszi ki részét a máltai felségvizeken hajózó, az Európai Unió déli tagállamaiba tartó migránsok feltartóztatásában, továbbá a tengeri kutatás-mentéssel kapcsolatos feladatokban is. A szigetország katonairepülő-potenciálja nem számottevő, a haderő légi komponensét néhány tengeri járőrözésre használt merevszárnyas[22] és kutatás-mentésre üzemben tartott forgószárnyas[23] légi jármű alkotja, amelyek a Málta Nemzetközi Repülőtéren települnek.

A légi navigációs szolgáltatást tekintve a fegyveres erőknek sem jogalkotói, sem szolgáltatói tevékenysége nincsen. Mivel a haderő légi komponense kizárólag kutatás-mentési és part menti járőrözési feladatokban vesz részt, külön légiforgalom-szervezési szabályozási környezete sincsen. A műveleti (OAT[24]), továbbá az általános (GAT[25]) légi forgalom szerint működő katonai légi járművek számára a légi navigációs szolgáltatást egyaránt a MATS biztosítja. Málta nem tagja egyik katonai szövetségnek sem, azonban európai uniós tagságából adódóan az Európai Védelmi Ügynökség által a térségben szervezett – elsősorban kutatás-mentéssel kapcsolatos – gyakorlatokon részt vesz, az ENSZ libanoni missziójában szerepet vállal [9], továbbá a NATO partnerállama.

[22] Britten-Norman BN-2 Islander, Beechcraft Super King Air B200.
[23] AW139, SA 316/SA 319 Alouette III.
[24] Operational Air Traffic.
[25] General Air Traffic.

A légtérgazdálkodást tekintve a MATS teljesíti az EU rugalmas légtérfelhasználási elveit, amelyek alkalmazásával – elsősorban a NATO légi járművei számára – időszakosan biztosít elkülönített légtereket, valamint lehetővé teszi az útvonalon történő légi utántöltési feladatok végrehajtását. E feladatokat a 2001–2011 közötti időszakban – a korábbiakhoz képest – jelentős gyakorisággal hajtották végre, elsősorban az afganisztáni és az iraki hadszínterekre való repülések kapcsán. A légi utántöltési feladatok gyakoriságára tekintettel Málta együttműködési megállapodást kötött az USA légierejével az EUCARF[26]-on keresztül, ami alapján az FL150–280[27] között 10 NM[28] (18,52 km) széles folyosókat aktiváltak időszakonként a MATS légiforgalmi irányító szolgálatán keresztül. A légi navigációs szolgáltató által közölt adatok alapján 2008–2011 között több mint 400 esetben volt szükség légi utántöltési feladatra ilyen folyosót aktiválni [10].

A szigetország légi navigációs szolgáltatásának rövid jellemzése során elmondható, hogy annak ellenére, hogy az Európai Unió egyik legkisebb tagállamáról beszélünk, önálló légi navigációs szolgáltatóval, illetve egy, a méretéhez képest nagy kiterjedésű FIR-rel rendelkezik, amelyben – annak elhelyezkedéséből adódóan – jelentős átrepülő forgalmat bonyolít le. A repülőtéri és közelkörzeti irányító szegmensben szintén számottevő forgalmi mutatókkal rendelkezik, ami jellemzően a turizmusban leginkább érintett tavaszi és nyári időszakban van a csúcson. Mivel a szigetországnak nincsenek az ország légterének védelméhez szükséges repülőeszközei, nem tagja katonai szövetségnek, valamint nem vesz részt olyan nagyszabású katonai gyakorlatokon, illetve műveletekben, ahol légtérgazdálkodással kapcsolatos és más, a légi műveleteket kiszolgáló katonai feladatokat kellene ellátnia, ilyen irányú tapasztalatokkal sem rendelkezik, amely körülmény az OUP során – légi navigációs szolgáltatási szempontból – különleges helyzeteket teremtett.

4. Az OUP hatása a MATS tevékenységére

Az OUP beavatkozás jogi alapjait az ENSZ Biztonsági Tanács 2011. február 26-án és március 17-én elfogadott 1970. és 1973. számú határozatai teremtették meg. E határozatok szankciókat vezettek be a Kadhafi-rendszer főbb tisztségviselői ellen, elrendelték a fegyverszállítási embargót és a repülésmentes övezetet, valamint felhatalmazást adtak a civil lakosság megvédése érdekében szükséges lépések megtételére. A hadművelet 2011. március 23-án indult meg, és a következő hetekben mind több és több katonai elemmel bővült, ahogy a NATO és a hozzájáruló országok megjelentek a hadszíntéren. Maga az OUP haditengerészeti embargóval vette kezdetét, míg a repüléstilalmi övezettel kapcsolatos tevékenység továbbra is a Franciaország, Egyesült Királyság és Amerikai Egyesült Államok alkotta koalícióra hárult, köszönhetően a NATO-konszenzus kezdeti hiányának. Március 24-én döntötte el a NATO, hogy átveszi a műveletek irányítását, ami a gyakorlatban 2011. március 31-én történt meg teljes vertikumában. Ekkor ért véget az OP Odyssey Dawn [11, pp. 143–144]. A szigetország földrajzi helyzetéből adódóan nem tudta magát teljes mértékben függetleníteni a konfliktustól, és az OUP-t megelőzően kifejezte azon álláspontját, amely szerint, habár nem kívánják

[26] European Central Altitude Reservation Facility.
[27] 4572–8534 m.
[28] Nautical Mile – tengeri mérföld.

a Szövetség számára hasznosításra átadni a Málta Nemzetközi Repülőteret vagy más katonai infrastruktúrát, az ország légterén való áthaladást azonban biztosítani fogják a NATO légi járművei számára annak érdekében, hogy a repüléstilalmat betartassák [12].

A műveletek megindítását megelőzően a MATS számára teljesen egyértelmű volt, hogy elhelyezkedéséből adódóan a Málta FIR-nek jelentős érintettsége lesz, amelyet bizonyított az az előzmény is, hogy a nevezett év február és március hónapjaiban a szolgáltatót már bevonták a Líbiából kimenekített külföldi állampolgárok evakuálásával összefüggő feladatokba, ami előrevetítette a konfliktussal összefüggő további várható szerepvállalásokat. Málta az OUP-t megelőzően a humanitárius segítségnyújtással összefüggő feladatokban is aktív támogató szerepet vállalt, többek között a Katar és a szigetország között megkötött együttműködési megállapodás alapján [13, p. 378, 394]. Ebben az időszakban a MATS szoros koordinációt látott el az EUROCONTROL központi áramlásszervező részlegével (CFMU[29]), amely során napi szinten, több alkalommal szolgáltattak adatot a Málta és Tripoli FIR-ek aktuális státuszáról. A szolgáltató azonnali reagáló képességét mutatta az a következő eset is, amikor a Líbia keleti országrészéért felelős Bengházi Körzeti Irányító Központot (ACC[30]) értesítették a repülések beszüntetéséről, a MATS – mint szomszédos légi navigációs szolgáltató – azonnali hatállyal kényszerhelyzeti útvonalakat jelölt ki az evakuációs repülési feladatok végrehajtásának mielőbbi elősegítésére.

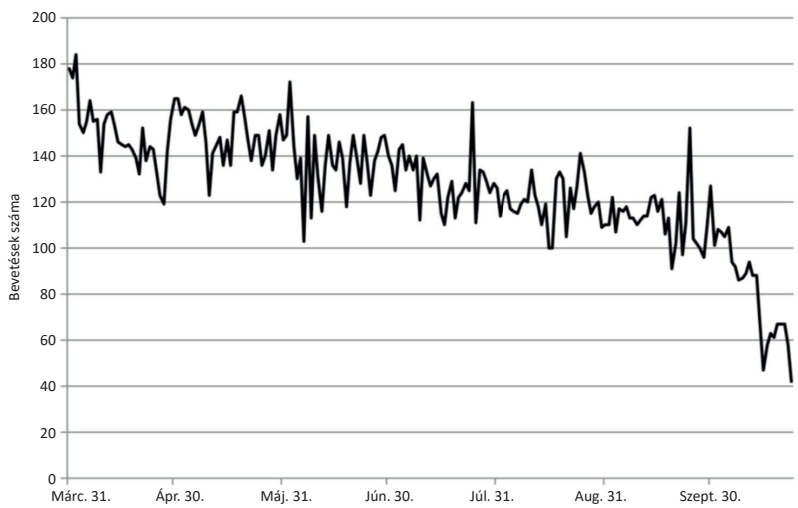
Az NFZ kijelölésével összefüggésben a MATS számára más elsődleges feladat nem merült fel, minthogy egyrészről biztosítsa Málta légterén az átrepülést a polgári légi járművek számára, másrészről pedig szavatolja a Málta Nemzetközi Repülőtérről induló és oda érkező légi forgalom folyamatosságát. A szolgáltató alaprendeltetéséből eredő feladatainak kontinuitása azonban nem tartott sokáig, tekintettel arra, hogy az OUP megindítását követően rögtön annak műveleti területévé vált. A légi műveletek jelentős kiterjedésű légterek elkülönítését, továbbá – a Líbiába tartó és onnan visszaérkező katonai légi járművek számára – tranzitútvonalak kijelölését követelték meg a máltai fél részéről, amelyeket a már meglévő légiforgalmi környezetet kiszolgáló légtér- és útvonalhálózati struktúrára kellett ráültetni. Az így elkülönített – a Szövetség műveleti légtérgazdálkodási előírásai szerint kialakított – légterekben és útvonalakon a katonai forgalom jelentős volt, amelyekben a légi utántöltési feladatokon túlmenően pilóta nélküli légi járművekkel, továbbá hírszerzési, megfigyelési és felderítési feladatokat ellátó repülőeszközökkel hajtottak végre repülési feladatokat. Ezen túlmenően a MATS-re szintén jelentős feladat hárult a Líbia felett műszaki meghibásodást szenvedett és/vagy vészhelyzetet jelentett légi járművek Máltára irányításával kapcsolatban, a szolgáltató tájékoztatása alapján a műveletek során 45 ilyen légi jármű szállt le a Málta Nemzetközi Repülőtéren [10].

A MATS számára a NATO légi járművei által az OUP alatt alkalmazott eljárások mérőben eltérőek voltak az azt megelőző időszakban tapasztaltakétól. Mivel Málta nem vett részt közvetlenül a konfliktusban, így párhuzamot csak a korábban kezelt katonai légi forgalommal tudott vonni, amelyek között – a kialakult konfliktus okán – nem voltak jelentős hasonlóságok. A Szövetség által végrehajtott légi műveletek ennek megfelelően új feladatokat is maguk után vontak, amelyek az alábbiak szerint sorolhatók fel, a teljesség igénye nélkül:

[29] Central Flow Management Unit.
[30] Area Control Centre.

- előzetes kérelmek alapján „blanket" átrepülési engedélyek kiadása a műveletben részt vevő légi járművek számára;
- közvetlen koordináció az USA légierejével és a NATO-val az operatív feladatok ellátása során;
- nagyszámú légtérszegmens kijelölése légi utántöltési feladatokra, röviddel azok aktiválása előtt;
- katonai légi útvonalak létrehozása az NFZ-ba és onnan ki;
- MATS légtérgazdálkodó csoport közvetlen koordinációja a CAOC[31] 5-val az igényelt katonai légterek hadműveleti követelményeit illetően;
- az ICAO által Málta részére delegált légiforgalmi tájékoztató szolgáltatás biztosítása Tripoli FIR nyílt tengerrész feletti légterére;
- összekötőként az érintett nemzeti hatóságok képviselete a NATO által szervezett telekonferenciákon;
- a légiforgalmi irányítók megszokott rotációjának átszervezése;
- szektorkonfigurációk gyakoribb változtatása a jelentős katonai forgalom miatt;
- a szabad útvonalhasználat bevezetését megelőzően több direkt útvonal engedélyezése a katonai forgalom számára (ki- és belépőpontok közötti közvetlen útvonalak) [10].

A fenti felsorolásból is egyértelműen látszik, hogy a MATS jelentős támogató szerepkört töltött be az OUP során, amely egyrészről – a 4. ábrán látható napi bevetési arány alapján – nagy fokú leterheltséget jelentett, másrészről pedig veszélyeztette az alaprendeltetésből eredő feladatok ellátásának hatékonyságát, ezáltal a repülés biztonságának szavatolását a máltai légtér polgári felhasználói számára.



4. ábra
OUP napi bevetési arány [12]

[31] Combined Air Operation Centre, CAOC5 Poggio Renatico, Olaszország.

A katonai légi forgalom kezeléséből eredő új munkatechnológiai eljárások alkalmazása során számos kihívással kellett a MATS-nak megküzdenie, amelyek az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- az NFZ kapcsán nem álltak rendelkezésre előre kidolgozott vészhelyzeti eljárások;
- az EUCARF-fal kötött együttműködési megállapodásban foglalt eljárásokat nem sztenderdizáltan alkalmazták a légi utántöltések koordinációja során;
- teljes szektorkapacitás biztosítása mellett jelentős bevételkiesés az útvonalhasználati díjak terén (–50%);
- a repülés biztonságának szavatolása a polgári forgalom számára korlátozottabban elérhető ellenőrzött légtérben, a műveletekben nem részt vevő polgári, és az abban közvetlenül érintett katonai légi forgalom egy időben való kezelésével;
- a következő napi szektorkonfigurációhoz szükséges irányítói létszám meghatározásának a lehetetlensége az előre nem ismert katonai repülési számok miatt;
- repülési tervek benyújtásának időszakos hiánya;
- az ellenőrzött polgári légtér légiforgalmi irányítói engedély nélküli keresztezése;
- transzponder kódok előzetes figyelmeztetés nélküli cseréje, a kódok duplikációja;
- TCAS[32]-figyelmeztetések gyakorisága [10].

Látható, hogy a Málta FIR-ben végrehajtott katonai repülési feladatok komoly nehézségek elé állították a MATS-ot, amelyek különböző – a felsorolt anomáliák alapján következtetett – okokra vezethetők vissza. A műveleti területre be- és onnan kilépő katonai légi forgalom kezelése sem a polgári, sem pedig a katonai fél számára nem volt zökkenőmentes. A légi műveletekben közvetlenül részt vevő repülő-hajózók polgári légiforgalmi eljárásokra való átállása az NFZ-ből kilépést követően sok esetben nehézségeket okozott, figyelemmel arra, hogy a polgári és a katonai légiforgalmi eljárások alkalmazása között dinamikusan kellett váltani, közvetlenül egy éles műveletet követően. Ez normál, békeidős környezetben (például nemzetközi gyakorlatok során) sem működik minden esetben megfelelően, a harctéri pszichikai terhelő körülmények csak fokozták a polgári féllel való együttműködésben megjelenő hibákat, tévesztéseket, szabálysértéseket. A polgári-katonai koordinációból eredő problémák gyakran abból adódnak, hogy a jellemzően elkülönített légterekben működő harcászati légi járművek vezetői csak felületesen ismerik a polgári légiforgalmi irányítás szabályait, ami természetesen fordítva is igaz, a polgári légiforgalmi irányítók sem rendelkeznek a katonai eljárások szükséges mértékű ismeretével. Ezen túlmenően a Szövetség műveleteiben részt vevő nemzetek száma széles skálán mozgott, és mivel a partnerállamok katonai légi járművei is jelen voltak a térségben, a többnemzeti polgári-katonai koordináció minősége is hektikusan alakult.

A kihívások jelentős része tehát közvetlen hatást gyakorolt a repülés biztonságára, az ország gazdaságának húzóágazataként funkcionáló turizmus pedig beláthatatlan károkat szenvedett volna, ha ennek okán tragédia következett volna be. Világos volt tehát, hogy Málta – és azon belül a MATS – kiemelt érdeke az volt, hogy mielőbb sikerüljön elérni a líbiai légtér normalizációját, amely egyben az ország a konfliktusban való ilyen irányú szerepvállalását is lezárta volna. A líbiai légtér – a polgári légi forgalom számára való – újranyitásával kapcsolatban már 2011 nyarán megkezdődtek az előzetes egyeztetések, amelyeket több hivatalos multilaterális egyeztetés is követett. Az első ilyet 2011. szeptember 27-én Kairóban, a másodikat pedig 2011. október 13-án Máltán rendezték meg, ahol az ICAO, a NATO, valamint a líbiai Polgári Légiközlekedési

[32] Traffic Collision Avoidance System, légijármű-összeütközést elhárító rendszert.

Hatóság már szándéknyilatkozatot írtak alá a légi navigációs szolgáltatás ellátásáról a líbiai légtér egy szűk szegmensében. A nevezett egyeztetéseken a felek meghatározták az NFZ visszavonását követő – a polgári légi forgalom teljes visszaállítását célul kitűző – átmeneti intézkedéseket, amelyek a légi navigációs infrastruktúra állapotának felmérésétől, egészen a „békeidős" teljes operatív működésig terjedtek [14]. A normalizációban segítséget nyújtott az a tény, hogy Líbia a konfliktus előtt rendelkezett ICAO-szabványnak megfelelő légi közlekedési infrastruktúrával, így annak üzemeltetésében és hatósági felügyeletében is volt tapasztalata, ami meggyorsította a folyamatokat. A 222 napig tartó OUP 2011. október 31-én ért véget, azonban az észak-afrikai ország polgári légi közlekedésének újraindítása még csak ekkor kezdődött, amely folyamatot egy külön tanulmányban érdemes vizsgálni a jövőben.

5. Következtetések

A szigetország mindig is stratégiai szerepet játszott a mediterrán térségben, amely a két kontinens közötti szerencsés elhelyezkedésének is volt köszönhető. Málta légi közlekedési infrastruktúrája az ország függetlenné válása óta folyamatos fejlődésen megy keresztül, és míg kezdetben a katonai, az utóbbi évtizedekben – elsősorban a turizmusnak köszönhetően – már a polgári fél az elsődleges repülőtér- és légtérfelhasználója az országnak. A számottevő katonai repülőeszközzel nem rendelkező állam a katonai légiforgalom-szervezés terén 2011-ig csak korlátozott tapasztalatokkal rendelkezett, elsősorban a légi utántöltés és a kötelékrepülések biztosítása terén. Ebben a felkészültségi állapotban érte a líbiai konfliktus, amelynek kezdetén – még az OUP előtt – a MATS kezdte elsajátítani a polgári-katonai együttműködés és eljárások sajátosságait, amelyeket az OUP megindítását követően már napi szinten alkalmazott.

Az OUP 222 napja alatt a MATS jelentős támogató szerepkört töltött be a Szövetség által végrehajtott légi műveletekben. Felelősségi körzetében a polgári mellett egy időben a katonai légi járművek számára is biztosított légi navigációs szolgáltatást, a repülés biztonságának maximális szavatolásával. Málta deklaráltan nem biztosított infrastrukturális hátteret az OUP támogatásához, ez alól a légtér, valamint egyetlen nemzetközi repülőtere jelentett kivételt, ami azt jelentette, hogy a MATS a művelet időtartama alatt – a katonai légtérfelhasználók okán – maximális szektorkapacitással működött. A szolgáltató által közzétett tapasztalatok alapján – habár jelentős anomáliák merültek fel a polgári-katonai koordináció terén – sikerült a Málta FIR-en átrepülő, illetve abban feladatot végrehajtó katonai légi járművek mozgását jelentősebb esemény nélkül biztosítani, ami egyértelműen hozzájárult az OUP sikeréhez. A szigetország szerepe a műveletekben, habár katonai értelemben nem volt jelentős, a NATO-val való operatív együttműködést illetően gyümölcsöző volt mindkét fél számára, és jelentős mennyiségű tapasztalatot szolgáltatott a katonai légiforgalom-szervezés terén.

Felhasznált irodalom

[1] HungaroControl Magyar Légiforgalmi szolgálat Zrt., 5 éves forgalmi statisztika (ACC)
[2] Győri, E., „A megosztottság nem akadálya a sikerességnek – Málta EU-csatlakozása," *Külügyi Szemle,* 2–3. évf. 3–4. sz. pp. 41–79. 2004. Online: https://kki.hu/assets/upload/KULUGY_KulugyiSzemle_2004_3-4__gyri.pdf

[3] Transport Malta, *Brief History of Luqa Airport.* [é. n.]. Online: www.transport.gov.mt/aviation/civil-aviation-directorate/history-654
[4] EUROCONTROL, *FIR/UIR in the Upper Airspace (EUROCONTROL Member States).* [é. n.]. Online: www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-04/eurocontrol-firuir-upper-airspace-ectl-2022.pdf
[5] Malta Air Traffic Services, *Another Phase in the Free Route Airspace Implementation.* 2022. Online: https://maltats.com/2022/01/24/11159/
[6] EUROCONTROL, *Local Single Sky Implementation Plan 2021 – Malta.* 2021. Online: www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-05/eurocontrol-lssip-2021-malta.pdf
[7] Malta International Airport, *2021 Statistics.* [é. n.]. Online: www.maltairport.com/wp-content/uploads/2022/01/Annual-Summary-Report_2021.pdf
[8] Malta International Airport, *Malta International Airport Eyeing 5.4 Million Passengers for 2022.* 2022. Online: www.maltairport.com/malta-international-airport-eyeing-5-4-million-passengers-for-2022/
[9] Armed Forces of Malta, *United Nations Interim Force in Lebanon (UNIFIL).* [é. n.]. Online: https://afm.gov.mt/en/operationsanddeployments/overseas/Pages/UN-Operations.aspx
[10] Malta Air Traffic Services, *A NATO Légiforgalom-szervezési Bizottság 2011. évi tavaszi ülésén a tagok számára zárt körben terjesztett nyílt minősítésű munkaanyag.* 2011.
[11] Balogh P., „Tapasztalatok a NATO-hadműveletekben – OPERATION UNIFIED PROTECTOR (Líbia 2011)," *Felderítő Szemle,* 13. évf. 1. sz. pp. 142–191. 2014. Online: www.knbsz.gov.hu/hu/letoltes/fsz/2014-1.pdf
[12] C. Peregin, „Priority is safety of Malta– Gonzi," *Times of Malta,* 2011. Online: https://timesofmalta.com/articles/view/priority-is-safety-of-malta-gonzi.355449
[13] K. P. Mueller, *Precision and Purpose – AirPower in the Libyan Civil War.* RAND Corporation, 2015. Online: www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR676/RAND_RR676.pdf
[14] BLUE-MED FAB Newsletter, *The Role of the Malta Air Traffic Services during the Libya Crisis.* 2012. Online: www.bluemed.aero/public/report/BLUE_MED_Newsletter_issue_4.pdf

Operation Unified Protector from the Perspective of the Maltese Air Navigation Service Provider

War conflicts always have effect on air navigation service providers directly and indirectly. Nowadays, it is particularly relevant to examine the provision of air navigation services through a conflict in a neighbouring country, to outline its complexity and difficulties, and at the same time the potential opportunities in civil-military cooperation. In my study I analyse the role of the Maltese Air Navigation Service Provider during the Operation Unified Protector, presenting a brief history of the air traffic in Malta, as well as the air traffic environment.

Keywords: *air traffic, air operation, air navigation service, no-fly zone, flight information region, aircraft*

Paulov Attila
osztályvezető
HM Állami Légügyi Főosztály
Légiforgalmi Felügyeleti Osztály
paulov.attila@hm.gov.hu
orcid.org/0000-0002-8831-4527

Attila Paulov, MA
Head of Division
MoD State Aviation Department
ATM Supervisory Division
paulov.attila@hm.gov.hu
orcid.org/0000-0002-8831-4527

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 19–33. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.2

Szilágyi Dávid, Sziroczák Dávid, Fendrik Ármin

Merevszárnyú drónok üzleti alkalmazásai Magyarországon

A drónok vagy pilóta nélküli légi járművek alkalmazása számos területen új fejezetet nyitott a szakmákban vagy iparágakban. A leggyakoribb dróntípus, amelyet a legtöbb feladatra alkalmaznak, a forgószárnyas drón. A merevszárnyú drónok energiahatékonysága azonban néhány alkalmazás esetén előnyösebb lehet, a csökkent manőverezhetőség mellett is. A cikkben egy hazai fejlesztésű merevszárnyú drónplatform magyar viszonylatban való üzleti alkalmazási lehetőségeit tekintjük át. A világszerte különböző repülőeszközökkel végrehajtott feladatok összegyűjtése és analízise alapján a platform magyar viszonylatban a lineáris struktúrák ellenőrzésére lehet legalkalmasabb. Ezek közül az elektromos távvezetékek, illetve olaj- és gázvezetékek ellenőrzése a leginkább célravezető. Legtöbbször ugyanis az egyetlen lehetőség a légi, helikopteres ellenőrzés lehet a nehéz bejárhatóság miatt, amely sokkal költségesebb és kevésbé biztonságos. A helikopterek megvásárlása erre a célra rendkívül költséges, így legtöbbször bérlik erre a feladatra, azonban a drónok beszerzése minden felszereléssel együtt csak ennek töredéke, akár a helikopter beszerzési értékének 10%-a alatt is lehet. A feladat szempontjából a drónos megoldás is a megfelelő szenzorokkal felszerelve ekvivalens adatokkal szolgál. A növényzet benövését, szakadást, szivárgást, törést és hasonló üzemi hibákat ugyanúgy képesek azonosítani.

Kulcsszavak: *drón, UAV, merevszárnyú, üzlet, vezeték, ellenőrzés*

1. Bevezetés

A pilóta nélküli robotrepülőgépek és rendszerek[1] vagy drónok alkalmazása napjainkban egyre jellemzőbb számos területen. Katonai célokra fejlesztett eszközök mellett megjelentek a civil alkalmazásban használható drónok is, sok esetben gyökeresen megváltoztatva az adott területet vagy iparágat. A bennük rejlő potenciált, értéket nagyobb részben nem a repülési jellemzőik, hanem az általuk elvégezhetővé vált feladatok jelentik. Ez többnyire valamilyen hasznos teher, például kamera vagy egyéb szenzor hordozásával érhető el. A drónokkal a kisrepülőgépekhez viszonyítva jóval alacsonyabb tömegük és kisebb méretük miatt gazdaságilag sokkal kifizetődőbb végezni olyan feladatokat, amelyeket korábban csak pilótás repülőgéppel lehetett. A tanulmány célja, hogy az NKFIH[2] által finanszírozott „Innovatív és újszerű megoldásokra

[1] UAV/UAS: Unmanned Aerial Vehicle/Unmanned Aircraft System.
[2] Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal.

épülő többcélú merevszárnyú drón és a fejlesztéséhez szükséges kompetenciák létrehozása" projekt keretén belül fejlesztett merevszárnyú drón platform piaci alkalmazási lehetőségeit áttekintse, és a lehetséges alkalmazásra javaslatot formáljon. Ehhez áttekintjük a merevszárnyú drónok piacát, a potenciális alkalmazásokat és a leginkább hozzáillő felhasználások megvalósítási módjait és költségvonzatait.

2. Piac

A hazai valós piaci igények felmérésére nincs a jelenlegi környezetben jól alkalmazható eljárás, előzetes információ, adat vagy átfogó elemzés, amelynek segítségével meg lehetne határozni a jelenlegi viszonyokat. A nemzetközi piacról is inkább becsült előrejelzések vannak. A nemzetközileg eléggé ismert PwC[3] cég azonban nyitott egy olyan drónos szolgáltatással foglalkozó egységet (1. ábra), amely Magyarországról is elérhető.

1. ábra
A PwC drónos szolgáltatási tevékenységei [1]

Az általuk kínált szolgáltatásokkal ernyőszervezetként kívánják a drónokkal kapcsolatos üzleteket az ötlettől a bevezetésig támogatni. Becslésük szerint a globális piac méretét az 1. táblázat értékei jellemzik.

1. táblázat
A PwC globális drónpiaci becslése [2]

Terület	Tevékenység	Érték (milliárd USD)
Infrastruktúra, beruházások és üzemeltetés	videók, 3D modellek készítése, kivitelezés helyzetének értékelése	45,2
Energia és közmű	hatékonyabb műszaki ellenőrzés, karbantartás, hőkamerás ellenőrzés	36,5
Agrárium	növény- és állatállomány ellenőrzése, növényvédelem	32,4
Szállítás	csomagszolgáltatás	13,0

[3] PricewaterhouseCoopers.

Terület	Tevékenység	Érték (milliárd USD)
Védelem, felügyelet	védelmi (security) feladatok ellátása, terület-, létesítményfelügyelet	10,5
Média	megközelíthetetlen helyek filmezése, rendezvények közvetítése	8,8
Biztosítás és kárfelmérés	kockázatértékelés, beruházások ellenőrzése, információgyűjtés	6,8
Telekommunikáció	adótornyok ellenőrzése, kivitelezés, felmérés	6,3
Mining	területek, ásványi anyagok felderítése	4,3
Drónrepülés irányítása	drónrepülések programozása, repülések irányítása szolgáltatásként	18,7
Adatforgalom	drónok alkalmazása az adattovábbításban, információ és kommunikációs forgalomban	3,5
Adattárolás	drónok alkalmazása adatok (ideiglenes) tárolásában	1,0
Összesen		**187,0**

A merevszárnyú drónok eladására Magyarországon és általában a térségben (Kelet-Közép Európa) azonban nincs sok lehetőség. Jelentős nehézséget jelent, hogy a nagyobb (főleg a civil drónpiacon vezető szereppel rendelkező kínai) gyártóknak nagy a befolyása és jelentős árelőnyt képesek elérni. Ennek megfelelően a kutatás eredményei alapján körülbelül évente 330–420 merevszárnyú gépet lehet eladni a térségben, a hazai piacon ennek nagyjából 10%-át. Ebből következik, hogy még nagy részesedés esetén is viszonylag kevés légi jármű adható el, tehát érdemes inkább a drónokkal való szolgáltatások, tevékenységek fejlesztésére és értékesítésére koncentrálni.

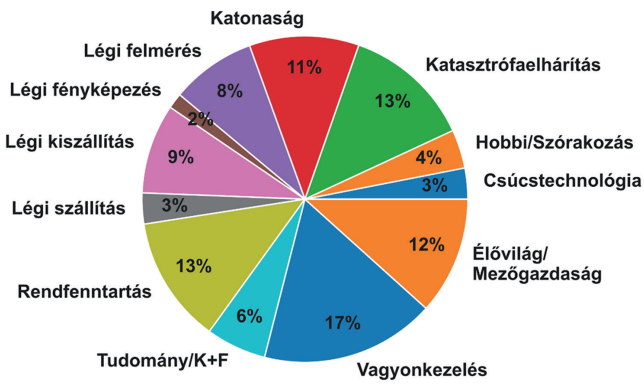
3. Felhasználások

3.1. Tevékenységek

Az UAV-kal végezhető tevékenységek széles skálán helyezkednek el. A különböző felhasználásokat tudományos folyóiratok, hírportálok és gyártói honlapok alapján összegyűjtve és kategorizálva képet kaphatunk a jelenlegi tevékenységmegoszlásról [3], [4], [5], [6], [7]. A gyűjtés során 652 féle alkalmazást azonosítottunk, kizárólag olyan eszközöket tekintve, amelyek mellett meghatározott felhasználás is szerepel. Az összegyűjtött felhasználásokat a következő kategóriákba soroltuk:

- katasztrófaelhárítás, mentés: a különböző katasztrófaesemények, például erdőtűz, árvíz, földrengés során felmerülő mentési, illetve helyreállítási tevékenységekhez kapcsolódó felhasználások;
- hobbi, szórakozás: a felhasználók gazdasági hasznot nem termelő, szórakoztató szabadidős tevékenységek, például akadálypálya, drónverseny;
- csúcstechnológia: nagyon speciális felhasználás, amely különleges felszerelést igényel, kereskedelmi céllal;
- élővilág/mezőgazdaság: növényzet és állatok megfigyelése, haszonnövények termőföldön monitorozása, öntözési szükséglet/kártevők/betegségek felmérése;
- vagyonkezelés: telephelyek, vagyontárgyak, eszközök megfigyelése különböző szenzorokkal, az épség megóvása érdekében;
- tudomány/K+F: fejlesztő-kutató céllal (hajtás, szerkezet, rendszerek tesztelése, adatgyűjtés);

- rendfenntartás: rendőrség, határőrség, partiőrség, egyéb szervek rendfenntartó feladatainak támogatása céljából;
- légi szállítás: teher- és áruszállítás, elsősorban nem végfelhasználó számára;
- légi kiszállítás: csomag házhoz szállítása, ételkiszállítás közvetlenül a fogyasztónak;
- légi fényképezés: a tevékenység fő célja a fénykép, videó létrehozása művészi vagy szórakozás jelleggel;
- légi felmérés: levegőből való adatgyűjtés későbbi feldolgozásra, fénykép, videók, egyéb szenzorok által szolgáltatott adatokból;
- katonaság: a katonaság és védelmi erők által hadi, védelmi, egyéb katonai, specifikus alkalmazások.

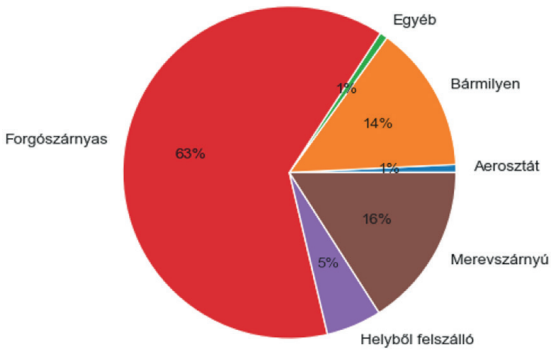


2. ábra
Az UAV-k felhasználásának százalékos megoszlása [a szerzők]

A százalékos megoszlást az egyes kategóriákon belül a 2. ábra szemlélteti. Látható, hogy a felhasználások több mint felét 4 nagy kategória, a vagyonkezelés, a katasztrófaelhárítás, a rendfenntartás és az élővilággal/mezőgazdasággal kapcsolatos alkalmazás teszi ki. Az egyes feladatokhoz használt UAV típusainak megoszlását a 3. ábra mutatja. A légi eszközöket a következő kategóriákba sorolhatjuk [8] , [13], [14], [15]:

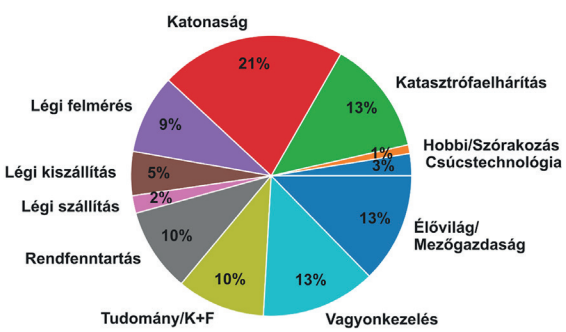
- forgószárnyas: helikopter, illetve multikopter kialakításúak, tehát egy nagy légcsavar helyett sok kisebb légcsavar biztosítja a felhajtóerőt. Fő kitétel, hogy a felhajtóerőt kizárólag a forgószárny szolgáltatja, aerodinamikai felhajtóerőt termelő fix felület nincs;
- helyből felszálló: merevszárnyú repülőgép, amely képes helyből függőleges fel- és leszállásra, általában további emelő légcsavarral vagy forgószárnnyal, vektorálható tolóerővel, illetve elfordulással, például a „tailsitter" konfigurációjú gépek. A tailsitter egy olyan függőlegesen fel- és leszállni képes (VTOL) repülőgép, amely felszállás előtt és leszálláskor a farokrészére támaszkodva áll a földön, és a függőleges fel- és leszállási szakasz után vízszintesen repül;
- merevszárnyú: felhajtóerőt kizárólag merevszárny segítségével, aerodinamikai alapokon termel, a klasszikus repülőgépforma;
- aerosztát: léggömb, léghajó, illetve egyéb, statikus felhajtóerő termelésére képes jármű;
- bármilyen: a feladat végrehajtásához nincs kizárólagos repülőgéptípus meghatározva, bármelyik típussal elvégezhető;

- egyéb: egzotikusabb megoldások, például rakéta, 3 éltű vagy fanwing. E megoldások száma és jelentősége is alacsony. A fanwing egy olyan repülőgép-koncepció, amelyben egy vízszintes tengelyű keresztirányú ventilátort alkalmaznak szorosan együtt egy merev szárnnyal. A ventilátor az áramlást a fix felületre kényszeríti, hogy mind a felhajtóerőt, mind a tolóerőt biztosítsa.



3. ábra
A felhasználások UAV-típusok szerinti lebontása [a szerzők]

Látható, hogy a csak forgószárnyas drónnal végzett tevékenységek képezik a döntő többséget, a teljes felhasználások közel kétharmadát (63%-át) teszik ki. A merevszárnyú drónnal is elvégezhető tevékenységek a merevszárnyú és a bármilyen kategória együttese, ez 30%-ot tesz ki, a többi kategória elenyészően kicsi. A merevszárnyú drónok leginkább az olyan típusú felhasználásra alkalmasak, ahol hosszabb távon, viszonylag kevés manőverezéssel, leginkább egyenes vonalban kell repülni, és az energiahatékonyság fontos szerepet játszik. A merev szárny általi felhajtóerő-termelés legtöbb esetben hatékonyabb, mint a forgószárnyas, azonban a forgószárnyas, leginkább négyrotoros drónok egyszerűsége és a manőverezhetőség, valamint a lebegés képessége sokszor előnyösebb. Ha csak a merevszárnyú drónokkal végezhető felhasználásokat tekintjük, akkor összesen 197 alkalmazás marad, ezeket tevékenységi kategóriákba sorolva a megoszlás a 4. ábra szerint alakul.



4. ábra
A merevszárnyú drónnal végezhető tevékenységek megoszlása [a szerzők]

Látható, hogy a merevszárnyú drónok legnagyobb hányadát (21%) katonai, illetve védelmi célokra alkalmazzák. A második legnagyobb a katasztrófaelhárítás, az élővilág/mezőgazdasági célok és a vagyonkezelés 13%-kal, amit a tudományos és rendfenntartási alkalmazás, valamint légi felméréses követ 10–10, illetve 9%-kal, a többi kategória ezekhez képest ritkább előfordulású.

3.2. Felszerelés

A legtöbb alkalmazás esetén a drón által hordozott felszerelés, illetve a rajta lévő felszereléssel végzett tevékenység az, ami a legfontosabb az értékteremtés szempontjából. Ezek merevszárnyú drón esetén, a fejlesztett platform sajátosságait is figyelembe véve az alábbiak lehetnek:

- kamera;
- sztereókamera;
- termokamera (infrakamera);
- rövid hullámhosszú infravörös kamera;
- hiper-/multispektrális kamera;
- gázszenzor;
- mezőgazdasági kamera;
- koronakisülés-detektor;
- geológiai radar;
- ultrahangos légmozgásmérő;
- LIDAR (lézer alapú távérzékelés);[4]
- magnetométer;
- RADAR;[5]
- nyomásmérő, páratartalom-, hőmérsékletmérő;
- sugárzásmérő;
- tűzgyújtó/-oltó;
- fedélzeti fegyver, elektronikai hadviselés;
- részecskekoncentráció-mérő;
- belső tárolók;
- külső teherrögzítő;
- permetezők, szórók.

A legtöbb felszerelés tömege 3 kg alatti, és néhány speciálistól eltekintve belefér a fejlesztett UAV hasznosteher-korlátjába. A platformra vonatkozóan a vizsgált lehetséges alkalmazások során az itt felsorolt felszerelések használatával elvégezhető feladatokat tekintettük át. A leggyakoribb alkalmazott felszerelések a különböző fajta kamerák, ezek teszik ki a teljes alkalmazáshalmaz felszereléseinek nagy részét.

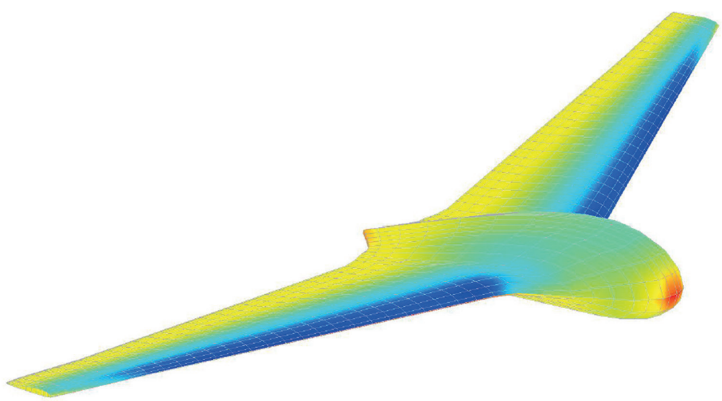
[4] Light Detection and Ranging.
[5] Radio Detecting And Ranging.

4. A fejlesztett UAV alkalmazásai

4.1. A prototípus rövid bemutatása

A fejlesztett UAV egy merevszárnyú, tolólégcsavaros, csupaszárny elrendezésű pilóta nélküli légi jármű, az aerodinamikai számolásokhoz alkalmazott modelljét az 5. ábra illusztrálja, kormánylapok és vezérsíkok nélkül. A prototípus kettős ferde, kormánylapok nélküli vezérsíkkal felszerelt, és a szárny kilépőélein 2 kormánylap található. Futóművel nem rendelkezik, indítása katapult segítségével történik. A sárkányszerkezet szénszálas és kevlár kompozitból készült, az alkalmazott profilok egyedi tervezésűek. Főbb jellemzői a következők:

- szárnyfesztávolság: 3,3 m;
- hosszúság: 1,1 m;
- magasság: 0,32 m;
- maximum felszállótömeg: 20 kg;
- hasznos teher: 6 kg;
- két hajtásrendszerrel szerelhető: elektromos, 1,9 kW-os elektromos és belsőégésű 3 kW-os motorral;
- maximális repülési idő: 6 óra;
- maximális hatótávolság: 500 km;
- maximális repülési sebesség: 39 m/s;
- utazósebesség: 25 m/s.



5. ábra
A fejlesztett prototípus modellje XFLR5 alkalmazásban [9]

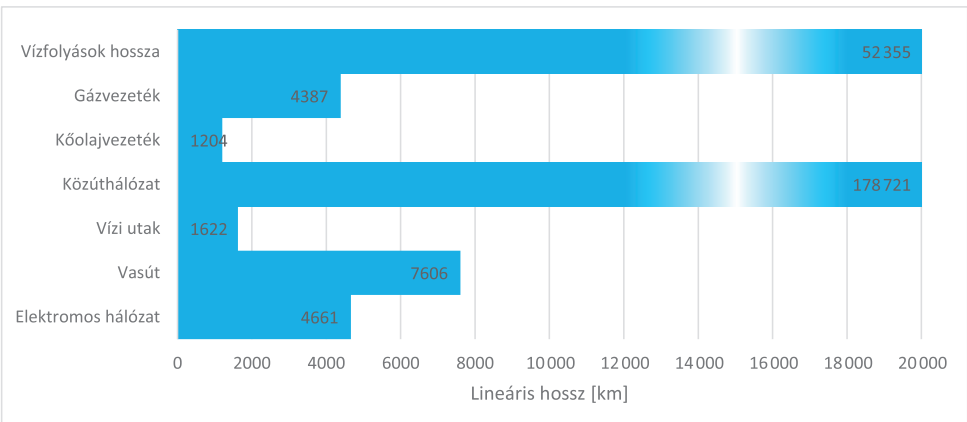
A prototípus kiemelkedően jó hatótávval rendelkezik és a repülési ideje is átlagon felüli. A prototípus repült is, de nem minden paramétere lett validálva, az itt felsorolt adatok a szimulációk és aerodinamikai számítások alapján feltételezett értékek. A továbbiakban specifikusan ennek a platformnak a potenciális alkalmazásait tárgyaljuk.

4.2. A prototípus alkalmazásai

A potenciális alkalmazásokat az összegyűjtött hasonló UAV-k által végzett tevékenységek alapján mérlegeltük. Sok tevékenység esetében a már piacon lévő megoldásokkal való versenyzés, a kis méret vagy a kevés várható profit miatt nem érdemes a piacra lépés mellett dönteni. Az egyes tevékenységek mérlegelése és pontozása során mindezt figyelembe vették, a technológia komplexitása és a szükséges beruházás nagysága, valamint az emberi tényezők mellett.

Az analízis alapján a prototípus számára legmegfelelőbb választás a piacra lépés szempontjából a nagy kiterjedésű lineáris infrastruktúra vizsgálata és megfigyelése, valamint a területek felmérése lehet. A hosszú repülési idővel és nagy hatótávolsággal rendelkező prototípus drón ebben a kategóriában jelentős előnnyel rendelkezik. Az egyes lineáris infrastruktúra hosszait a 6. ábra összegzi. Magyarország területét vizsgálva, a 2018-as adatokat figyelembe véve ezek az alábbiak:

- elektromostávvezeték-hálózat: a villamos energia elosztó hálózata (750 kv–132 kv), hossza 4861 km [12];
- vasútvonal: 7606 km, 2889 km villamosított [11];
- vízi utak: 1622 km [11];
- teljes vízfolyás hossza: 52 355 km (9800 vízfolyás) [10];
- kőolajvezetékek: 1204 km [11];
- gázvezetékek: 4387 km [11];
- közúthálózatok: 178 721 km [11].



6. ábra
Lineáris infrastruktúrák hossza Magyarországon [a szerzők]

Ezek közül a vízi útvonalak, a vasút és a közút vizsgálata lehetséges magát az útvonalat használva is, így versenyezni kell ezekkel a megoldásokkal. A rajtuk lévő forgalom miatt szintén van visszacsatolás a felhasználók részéről is, valamint a felmérésük többnyire viszonylag egyszerűen és biztonságosan végrehajtható földi vagy vízi járművekkel. Természetesen ettől még lehetséges ezek ellenőrzésére is UAV-t használni, azonban figyelembe kell venni

a többi megoldás hatékonyságát költségszempontból, és nehezebb versenyképes megoldást létrehozni. Az úthálózat nagysága miatt azonban megtérülhet az alkalmazás. Jelenleg folyamatban is van egy török–magyar U-SOAR projekt a BME és az ESTU[6] közötti együttműködés keretében ebben a témában, ipari partnerekkel, mint a Mould Tech Systems és az ESRI Türkiye részvételével. A projekt célja útfelület vizsgálatára alkalmas pilóta nélküli légi jármű fejlesztése és alkalmazhatóságának vizsgálata. A repülőeszköz fejlesztése mellett a működési koncepció, valamint az üzleti modell kidolgozása egy szolgáltatás indításához is részét képezi a projektnek. Gáz- és olajvezetékek és az elektromos hálózat esetén azonban sokkal több érv hozható fel az alkalmazás oldalán. A biztonság mellett fontos tényező, hogy ezek a feladatok sokszor csak helikopterrel vagy más légi járművel végezhetők el megfelelően, így méretük miatt az UAV-k jelentősen magasabb energiahatékonysággal és ezzel együtt alacsonyabb költséggel tudják ugyanazt teljesíteni.

4.2.1. Olaj- és gázvezetékek ellenőrzése

Az olaj- és gázvezetékek rendszeres ellenőrzése a szállított anyagok veszélyessége miatt kiemelt fontosságú. Ha egy vezetéken keresztül akár csak a szállított mennyiség 1%-a kiszivárog sérülés, korrózió vagy repedés miatt, az évente 450 000 hordónyi veszteséghez is vezethet, amellett, hogy visszafordíthatatlanul károsítja a környezetet egy akár 10 km^2-nyi területen [16]. Az USA-ban például minden évben átlagosan 17 haláleset és 68 komoly sérülés történik gázszivárgás miatt, és a teljes hálózaton szállított mennyiség majdnem 2%-a elszivárog [18]. Becslések szerint az iparág 50 billió USD-t költ csak a megfigyelésre. Az UAV-k alkalmazása ezen a területen nemcsak a gázvezetékek, hanem a környezet megfigyelését is lehetővé teszi. Számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos megfigyelési módszerekhez képest: nagy táv mentén képesek adatot gyűjteni rövid idő alatt, nehezen elérhető helyeken is. Mindemellett gazdaságosabb, biztonságosabb és kevésbé környezetszennyező alternatívát jelentenek. Egy tipikus drón a szükséges felszerelésekkel együtt nagyjából 5000 USD-ba kerülhet, és ezt több vizsgálatra is fel lehet használni, a drón újratöltésének minimális extra költségével. Ezzel szemben a hagyományos helikopteres vizsgálat akár 1250–3000 USD-ba is kerülhet [16], [19] alkalmanként. Földi járművekkel sokszor nagyon körülményes lenne a végrehajtás, mivel úthálózat nem mindenhol elérhető, és az energiaköltségek ennél a megoldásnál is magasak.

A vizsgálat kivitelezéséhez megfelelő engedély beszerzése szükséges az illetékes légiügyi hatóságtól, illetve pilótás üzem esetén jogosítvány a pilótának, valamint biztosítás a káresetek fedezésére. Ha hosszú szakaszt szeretnénk vizsgálni, szükség van a látóhatáron túli[7] kategóriás működtetési engedélyre is. Ehhez a pilóta és a cég vagy szervezet felelőssége mellett szüksége van a repülési magasság és légtér, valamint a műveleti terület és kockázati pufferzóna meghatározására is, a biztonság garantálása érdekében. A vezetékek esetén ez minimálisan a vezeték mentén egy meghatározott méretű környezetből álló folyosó, ebben végigrepülve végzi az adatgyűjtést a drón (lásd 7. ábra). A különböző sérülések, illetve korrózió detektálásához nagy felbontású kamerával rögzítenek felvételt a csőszakaszról, és a felvétel ember általi

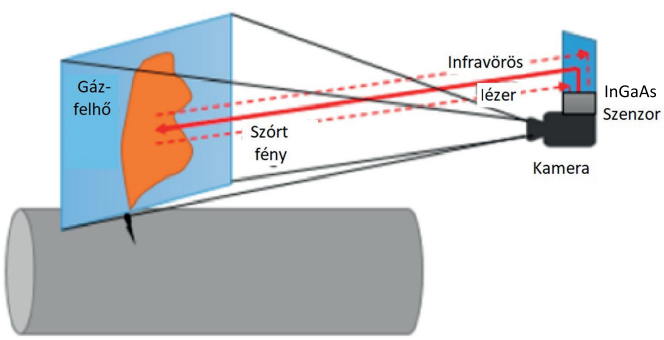
[6] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és az Eskişehiri Műszaki Egyetem.
[7] BVLOS, Beyond Visual Line of Sight.

vizsgálása mellett képfeldolgozás és gépi tanulás segítségével azonosíthatják az egyes hibákat. Ezek lehetnek szigeteléssérülések, horpadások, repedések, szakadás vagy lyuk és törés helyei.

7. ábra
Gázvezeték megfigyelése merevszárnyas drónnal [20]

Szintén lehetséges gázszivárgás detektálása, amihez többféle szenzor használható. Ezek közül néhány alkalmazható megoldás:

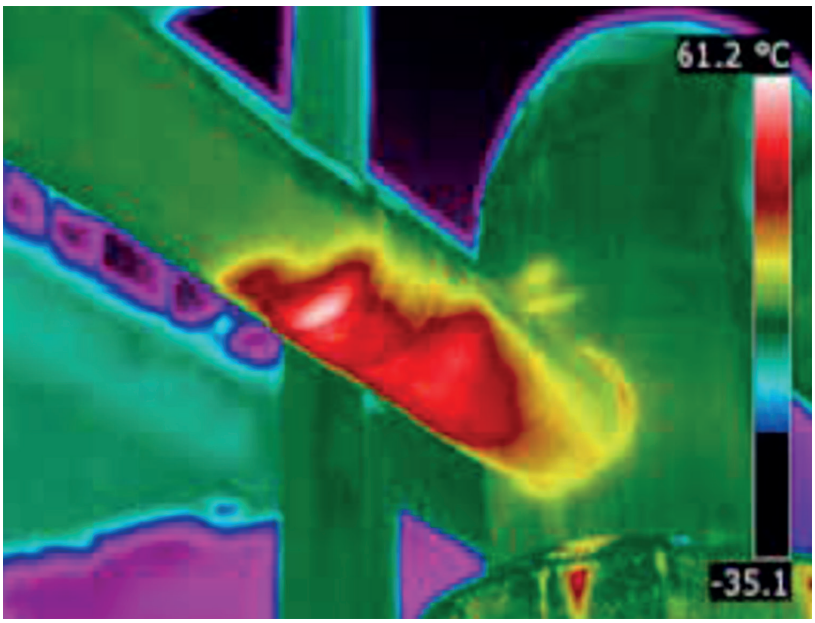
- gázszenzor alkalmazása, amely a kiszivárgott gáz koncentrációját méri a levegőben;
- hiperspektrális vagy infrakamerával a háttérsugárzás elnyelődését több hullámhosszon mérve, és Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia[8] segítségével azonosítani a szivárgást;
- visszaszórásos abszorpciós gáz képalkotás,[9] amely lézerrel világít meg egy területet a csővezeték felett, és a gáz lézert erősen szóró tulajdonságát kihasználva alkot képet a szivárgásról (lásd 8. ábra);



8. ábra
A gázvezeték szivárgásának detektálása BAGI-módszerrel [16]

[8] FTIR, Fourier-transform Infrared Spectroscopy.
[9] BAGI, Backscatter Gas Absorption Imaging.

- hőkamerás felvétellel szintén azonosítható a szivárgás egy egyedi spektrális szűrő segítségével.



9. ábra
Egy csővezeték termikus profilja [16]

Az összegyűjtött adatot vagy a fedélzeten feldolgozva, nagyobb kapacitást igénylő feldolgozás esetén a számítógépre másolva lehet azonosítani a szivárgást. A légi jármű GPS-e segítségével helyzeti információt is csatolhat a felvételhez, így könnyen azonosítható a javításra szoruló szakasz.

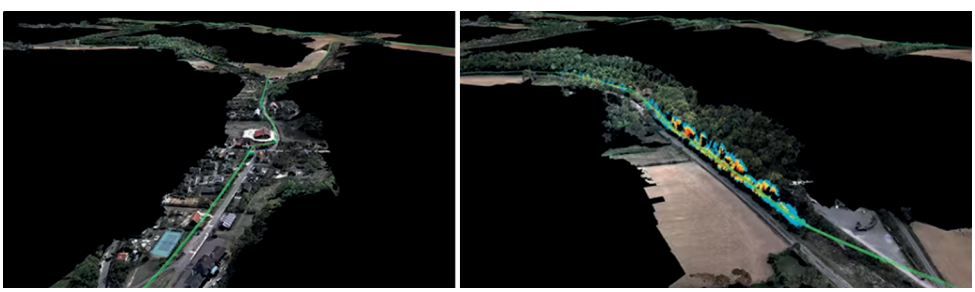
4.2.2. Elektromos távvezetékek vizsgálata

A távvezetékek vizsgálata költséges, időigényes munka, amelyet rendszeresen szükséges elvégezni a szolgáltatás folyamatos biztosítása érdekében. Előírásoktól függően 1-2 évente vizuális ellenőrzést, 3-5 évente pedig részletes ellenőrzést kell végrehajtani a hálózaton. A működtetéshez az olaj- és gázvezetékekhez hasonlóan itt is szükségesek a légügyi hatóság engedélyei, beleértve hosszabb távon a BVLOS-műveletekhez szükséges engedélyt hosszabb repülések esetén. Autonóm megoldásokat is fejlesztenek [24], azonban a pilótás üzem még gyakoribb. Lakott területen belül, kiépített utak környékén lehetséges a vezetékek és a tartóik földi járműről való ellenőrzése, azonban a hosszú távon, magas feszültségen elektromosságot szállító hálózat jó része olyan területen fekszik, ahol a terep kedvezőtlen, és a vizsgálat lefolytatása csak lassan lehetséges. Költségeket tekintve a helikopterek, amelyek többnyire az egyetlen teljes körű versenytársai a drónoknak, több mint 4000 USD/nap költséggel bérelhetők, és ha a cég vagy szervezet úgy dönt, hogy saját helikoptert szeretne felszereléssel, ennek költsége meghaladhatja

a 2 millió USD-t [22]. Drónok esetén a hasonló kapacitásokkal rendelkező légi jármű elérheti akár a 250 000 USD-t is, azonban ez még mindig csak 1/8 része a helikopteres költségeknek, de jó esetben akár a helikopter árának csupán 1/20-a is lehet [22], és a drón energiaköltsége is sokkal alacsonyabb. Biztonság szempontjából itt sokkal szemléletesebb a különbség, ugyanis itt emberélet nincs veszélyben a műveletek során a magas feszültség miatt.

A vizsgálathoz a következő szenzorokat használják [23]:

- nagy felbontású kamerák: általában többet használnak a pontosabb rekonstrukció érdekében, 1,5–4 mm felbontással;
- LIDAR: adatrögzítés pontfelhő formában több száz pont per négyzetméter sűrűségű felbontással a szállító hálózat és a környezete pontos felmérése érdekében. A környező növényzet és egyéb objektumok vezetéktől való távolságát lehet meghatározni vele (lásd 10. ábra);
- hőkamerák: a különböző komponensek hőprofiljának rögzítésére. A túlmelegedett elemek gyakran sérült, megnyúlt vagy deformálódott állapotuk okozta többletterhelés miatt melegszenek fel;
- UV-kamerák: a koronakisülést 50 Hz frekvencián az UV-érzékeny kamerák képesek rögzíteni;
- a rögzített adatokat GPS+INS[10] navigációs rendszer segítségével helyadatokkal látják el, a könnyű azonosítás érdekében.



10. ábra
A vezetékvizsgálat útvonala (balra) és a detektált növényzetbenövés (jobbra) [21]

5. Összefoglalás

Összességében a magyar piacról elmondható, hogy merevszárnyú drónból viszonylag keveset lehet eladni, így érdemes szolgáltatás nyújtásában gondolkodni. Az elvégzett adatgyűjtés alapján a merevszárnyú drónok legtöbb felhasználása a katonai alkalmazások mellett a katasztrófaelhárítás, vagyonkezelés, valamint az élővilág és mezőgazdaság terén történik, amelyet a tudományos, a rendfenntartó és légi felmérő alkalmazások követnek. Az értékteremtésben leginkább a drónok által szállított kamerák, szenzorok és egyéb felszerelés játssza a főszerepet, a platform teljesítménye és képességei kevésbé fontosak. Az elvégzett analízis alapján a fejlesztett merevszárnyú UAV-t a nagy hatótávja és a hosszú repülési ideje leginkább hosszú lineáris

[10] Inertial Navigation System – inerciális navigációs rendszer.

infrastruktúrák vizsgálatára teszi alkalmassá, ezek az elektromostávvezeték-hálózat, vasút, közút és vízi útvonalak, valamint a kőolaj- és földgázvezetékek. Ezek közül az elektromostávvezeték-hálózat és a gáz- és kőolajvezetékek vizsgálatában van nagyobb potenciál, mivel esetükben leginkább csak a hagyományos, helikopterrel végzett ellenőrzéssel kell versenyezni, más járművekkel nem, vagy nagyon nehezen kivitelezhető a feladat. Magyarországon ezen infrastruktúrák hossza gáz- és kőolajvezeték esetén 4387 km és 1204 km, elektromos vezeték esetén 4861 km. Mindkét esetben szükséges a légügyi hatóságoktól a megfelelő engedélyek beszerzése, beleértve a BVLOS-műveletekhez való engedélyt is, és a használt légtér és a kockázati pufferzóna megadása. A gázvezetékek ellenőrzése helikopterrel 1250–3000 USD-ba is kerülhet óránként, míg egy UAV a szükséges felszerelésekkel együtt is 5000 USD-ból kijöhet. Több ellenőrzésre használva, viszonylag alacsony energiaköltséggel töltve sokkal gazdaságosabban dolgozhatunk vele. Elektromos vezetékek vizsgálata esetén fontos, hogy olyan műszerekkel legyen ellátva a drón, amelyek ellenállók a vezeték elektromágneses zavarásaival szemben. Erre a célra vásárolt műszerezettségű helikopter akár 2 millió USD is lehet, míg hasonló képességekkel rendelkező drónokból 8–20 darab is kijöhet ebből az árból, és az üzemanyagköltségeik is sokkal alacsonyabbak.

Felhasznált irodalom

[1] PricewaterhouseCoopers, *Dróntechnológiai szolgáltatások*. Online: www.pwc.com/hu/hu/szolgaltatasok/technologiai_tanacsadas/drontechnologia.html

[2] PwC Communications Review, *Welcome to the Era of Drone-powered Solutions: A Valuable Source of New Revenue Streams for Telecoms Operators*. July, 2017. Online: www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf

[3] Békési B., Major G., „A drónok konfigurációi, alkalmazásai területei," in *Műszaki tudomány az északkelet-magyarországi régióban 2022*. Páy G. szerk., Nyíregyháza, Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézet, Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Debreceni Területi Bizottság (DAB) Műszaki Szakbizottsága, Acta Academiae Nyíregyhaziensis 7., 2022. pp. 301–307.

[4] Békési B., Seres J., „Drónok alkalmazásának lehetőségei," *Repüléstudományi Közlemények,* 32. évf. 3. sz. pp. 5–19. 2020. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.1

[5] Major G., „Etikus-e a drónok használata?" *Honvédségi Szemle,* 144. évf. 2. pp. 100–106. 2016.

[6] Gajdács L., Major G., „Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva," in *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III*. Földi L. szerk., Budapest, Ludovika, 2022. pp. 101–120.

[7] Ujjady A., Major G., „A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl," *Repüléstudományi Közlemények,* 33. évf. 2. sz. pp. 167–180. 2021. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2021.2.12

[8] Békési B., „Pilóta nélküli légijárművek jellemzése, osztályozásuk," in *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Palik M. szerk., Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. pp. 65–109.

[9] Rohács J. et al., *A Mould Tech UAV üzleti lehetőségeinek elemzése, üzleti modell fejlesztése*. KFI Mould Tech Drón Projekt kutatási jelentés, 2020.

[10] Wikipédia, *Magyarország vízrajza*. Online: https://hu.wikipedia.org/wiki/Magyarorsz%C3%A1g_v%C3%ADzrajza

[11] Wikipédia, *Magyarország közlekedése.* Online: https://hu.wikipedia.org/wiki/Magyarorsz%C3%A1g_k%C3%B6zleked%C3%A9se
[12] Magyar Energetikai és Közmű-Szabályozási Hivatal, *A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2018. évi adatai.* Online: https://mekh.hu/download/6/de/b0000/a_magyar_villamosenergia_rendszer_2018_evi_adatai.pdf
[13] Békési L., Békési B., „Forgószárnyas pilóta nélküli légijárművek," *Economica,* 6. évf. 2. sz. pp. 88–98. 2013. Online: https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2013/6/2/4421
[14] Békési L., Békési B., „Merevszárnyú pilóta nélküli légijárművek (UAV-k)," *Szolnoki Tudományos Közlemények,* 17. évf. pp. 7–34. 2013.
[15] Békési B., „Pilóta nélküli légijármű típusok sárkányszerkezeti megoldásai," in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban.* Pokorádi L. szerk., Debrecen, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, 2013. pp. 122–132.
[16] Wipro, *Inspecting Pipelines using Unmanned Aerial Vehicles.* Online: www.wipro.com/engineering/inspecting-pipelines-using-unmanned-aerial-vehicles/
[17] T. R. Bretschneider, K. Shetti, „UAV-based gas pipeline leak detection," in *35th Asian Conference on Remote Sensing 2014, ACRS 2014: Sensing for Reintegration of Societies.* 2014.
[18] T. R. Bretschneider, K. Shetti. „UAV-based gas pipeline leak detection," in Proceedings of the ARCS, Porto, Portugal, 24–27 March, 2015.
[19] North American Energy Pipelines, *Taking to the Skies: Launching an Oil and Gas Drone Inspection Program.* 2019. augusztus 2. Online: www.napipelines.com/taking-to-the-skies-launching-an-oil-and-gas-drone-inspection-program/
[20] M. Bernos, Canadian Company Proposes to Cut Pipeline Monitoring Costs with Automated Drones. *ENR,* 2017. április 19. Online: www.enr.com/articles/41865-canadian-company-proposes-to-cut-pipeline-monitoring-costs-with-automated-drones
[21] C. Ryan, Drone vs. Helicopters – Utility Inspections. *Constellation,* [é. n.]. Online: https://constellationclearsight.com/blog/drone-vs-helicopters-utility-inspections/
[22] I. Bruns, Drones for Power Line Inspections. *Utility Products,* 2019. január 1. Online: www.utilityproducts.com/line-construction-maintenance/article/16003823/drones-for-power-line-inspections
[23] PhaseOne, *Revolutionizing Powerline Inspection with Multi-Sensor Systems and Artificial Intelligence.* [é. n.]. Online: https://geospatial.phaseone.com/case-studies/ggs-sieaero-powerline-inspection/
[24] O. B. Schofield, N. Iversen, E. Ebeid, „Autonomous Power Line Detection and Tracking System using UAVs," *Microprocessors and Microsystems,* 94. évf. p. 104609. 2022. Online: https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104609

Business Applications of Fixed-Wing Drones in Hungary

The application of drones or unmanned aerial vehicles has opened a new chapter in many professions or industries. However, the energy efficiency of fixed-wing drones may be more beneficial in some applications, even with reduced manoeuvrability. In the article, the business application possibilities of a developed fixed-wing drone platform in the Hungarian market are reviewed. According to the analysis carried out by collecting the tasks performed with different aircraft around the world, in Hungary, the platform may be the most suitable for linear structure

inspecting applications. Of these, the inspection of electric transmission lines and oil and gas pipelines is the most appropriate, since most of the time the only alternative is helicopter inspection due to the difficult access, which is much more expensive and less safe. The purchase of helicopters for this purpose is extremely expensive, so they are mostly rented, while drones with all the equipment can be bought for a fraction of the cost, sometimes less than 10% of the price of helicopters. From a value creation perspective, if the appropriate sensors are installed, this method also provides equivalent data and is suitable for identifying vegetation encroachment, tearing, leakage, breakage, and similar operational errors.

Keywords: *drone, UAV, fixed-wing, business, powerline, pipeline, inspection*

Dr. Sziroczák Dávid adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Repüléstudományi és Hajózási Tanszék sziroczak.david@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0002-0949-8912	Dávid Sziroczák, PhD Associate Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Aeronautics and Naval Architecture sziroczak.david@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0002-0949-8912
Fendrik Ármin fejlesztőmérnök Mould Tech Systems armin.fendrik@mouldtech.hu orcid.org/0000-0001-6510-444X	Ármin Fendrik R&D Engineer Mould Tech Systems armin.fendrik@mouldtech.hu orcid.org/0000-0001-6510-444X
Szilágyi Dávid doktori hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Repüléstudományi és Hajózási Tanszék dszilagyimail@gmail.com orcid.org/0000-0001-9789-9195	Dávid Szilágyi PhD student Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Aeronautics and Naval Architecture dszilagyimail@gmail.com orcid.org/0000-0001-9789-9195

Köszönetnyilvánítás

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) finanszírozta. Projekt címe: „Innovatív és újszerű megoldásokra épülő többcélú merevszárnyú drón és a fejlesztéséhez szükséges kompetenciák létrehozása". A pályázat azonosítószáma: 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139. A szerzők ezúton is köszönik a pénzügyi támogatást.

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 35–47. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.3

Simon Sándor

Pilóta nélküli légi járművek (típus) megfelelőségértékelésének és a légi járművek folyamatos légi alkalmassága fenntartásának hatása a légi közlekedés biztonságára

A pilóta nélküli légijármű-rendszerekre[1] vonatkozó üzembentartási követelményeket az Európai Unió (EU) az UAS műszaki-technikai tartalma, illetve annak alkalmazási módja szerint különíti el. Az UAS műszaki tartalma és alkalmazási módja szerint három üzembentartási kategória létezik: nyílt, speciális és tanúsított (fordítási hiba miatt engedélykötelesnek hívott).

Amennyiben az UAS-művelet átlépi a nyílt és a speciális kategóriájú műveletre meghatározott műveleti korlátokat, például az UAS maximális felszálló tömege (MTOM)[2] meghaladja a 25 kg-ot, a művelet repülési magassága 120 m feletti, vagy látótávolságon kívül (BVLOS)[3] hajtjuk végre azt, illetve amennyiben a művelet biztonságos végrehajthatósága kapcsán elvégzett SORA-alapú[4] kockázatértékelés alapján az adott művelet biztonságosan nem hajtható végre és/vagy az illetékes légi közlekedési hatóság úgy ítéli meg, hogy csak légijármű-tanúsítási eljárás lefolytatását követően lehet észszerűen csökkenteni a műveleti kockázatokat, akkor tanúsított kategóriájú UAS-műveletekről beszélünk.

Jelen cikkemben az UAS-kategóriák és a légi járművek tanúsítási rendjének ismertetése mellett, a tanúsított kategóriájú UAS-műveletek biztonságos végrehajtásának lehetőségét és a folyamatos légi alkalmasságot irányító szervezetek (CAMO)[5] ebben látható jövőbeni jelentőségét kívánom bemutatni.

Kulcsszavak: *pilóta nélküli légijármű-rendszer (UAS), maximális felszálló tömeg (MTOM), típusmegfelelőség-értékelés, bejelentett szervezet (NOBO),[6] látótávolságon kívüli repülés (BVLOS), SORA-alapú kockázatértékelés, légi alkalmasság, folyamatos légi alkalmasságot irányító szervezetek (CAMO)*

[1] Unmanned Aircraft System, UAS.
[2] Maximum Take-Off Mass – maximális felszálló tömeg.
[3] Beyond Visual Line of Sight.
[4] Specific Operations Risk Assessment – speciális műveletekre vonatkozó kockázatértékelés.
[5] Continuing Airworthiness Management Organisation.
[6] Notified Body.

1. Bevezetés

A pilóta nélküli légi járművek története szorosan összekapcsolódik a hagyományos légi járművek fejlődéstörténetével. Az első légi járművek múlt század eleji megjelenését követően, rövidesen megjelentek a pilóta nélküli légi járművek is, ám elterjedésük – elsősorban az elektronika és ennek köszönhetően az autonóm rendszerek lassabb fejlődése miatt – kevésbé volt dinamikus.

1.1. Történeti áttekintés

Pilóta nélküli légi járműveket kezdetben a katonai repülésben alkalmaztak, első megjelenésük nagyjából az 1930-as évek közepére datálható, amikor is az Egyesült Államok hadseregében a légvédelmi gépágyúval felszerelt alakulatok kiképzése céljából rádió-távirányítású célrepülőgépeket (1. ábra) kezdtek el alkalmazni, ily módon biztosítva azt, hogy a légvédelem valós repülő és manőverező légi eszköz megsemmisítését gyakorolhassa. Ekkor terjedt el az angol eredetű *drón*[7] elnevezése is ezeknek a légi járműveknek, amelyek még közvetlen földi irányítás mellett működtek, autonóm repülésre nem voltak képesek. Az autonóm, vagyis a teljesen önálló drónrepülés technikai feltételei csak évtizedekkel később, a múlt század utolsó évtizedeiben álltak rendelkezésre, amikor a hagyományos légi járművek robotpilóta-rendszereihez hasonló funkciókkal (repülési magasság, irány- és sebességtartás) rendelkező berendezéseket képesek voltak olyan kis méretben létrehozni, hogy azok egy, a hagyományos légi járművektől jellemzően kisebb fizikai mérettel rendelkező pilóta nélküli légi jármű fedélzetére beépíthetővé váltak. Továbbá a szoftver- és műholdas navigációs technológia fejlődésének köszönhetően ezek a berendezések programozhatóvá váltak, és a fedélzeti *globális helyzetmeghatározó rendszer* (GPS[8]) segítségével folyamatos helyzetmeghatározás mellett a légi jármű képessé vált egy előre beprogramozott útvonal lerepülésére.

1. ábra
OQ-2A típusú rádió-távirányítású drón [1]

[7] Jelentése magyarul: zümmögő.
[8] Global Positioning System.

Ebben az időszakban indult meg a drónok tömeges fejlesztése és alkalmazása főként azon országokban, ahol jelentős összegeket fordítottak a hadiiparra és a fegyverfejlesztésekre (USA, Szovjetunió, Franciaország, Törökország, Izrael és Kína). A fejlesztés fő irányává a hadászati alkalmazásoknál elsődlegesen a felderítő céllal kifejlesztett drónok váltak. A gépeket fedélzeti fényképezőgéppel, nappali-éjszakai kamerákkal felszerelve jelentős hadműveleti információkat lehetett szerezni az „élőerő" kockáztatása nélkül. A katonai drónok fejlődésének egy másik fontos irányvonalává később a harcászati drónok (2. ábra) váltak. A mai fogalmaink szerint az UAV harctéri körülmények közötti első bemutatkozása a vietnámi háborúban volt 1975-ben [2, p. 37]. Ezek azok a légi járművek, amelyek fedélzetükön légi fegyvereket, jellemzően irányítható légiharc-rakétákat vagy bombákat képesek hordozni, és távirányítással vagy előre programozott útvonalat követve e fedélzeti fegyverekkel képesek légitámadást végrehajtani ellenséges célok ellen.

2. ábra
MQ-9 Reaper típusú harcászati drón [3]

A katonai drónok elterjedése mellett a 2000-es évek második felében, mivel a megfelelő fejlettségű technológia ezt lehetővé tette, megindult a polgári drónok elterjedése is. Ezek eleinte főleg játék- vagy hobbicélú eszközök voltak, amelyek csupán pár percig voltak képesek a levegőben maradni és csupán pár méterre távolodtak el a kezelőiktől. A későbbiekben, a 2010-es évek második felére már egyre nagyobb szerepet kapott a drónok professzionális alkalmazása, amely alapvetően ipari, mezőgazdasági vagy más speciális, például rendvédelmi alkalmazásokat jelent.

A fejlődés üteme napjainkra sem lassult, jelenleg már a polgári életben sem csak kamerás drónok alkalmazása zajlik. A mezőgazdaságban fontos növényvédelmi (légi-permetezési) feladatokat végeznek drónokkal, életmentő felszereléseket juttatnak el nehezen megközelíthető területekre, vagy árukiszállítást végeznek. A közeljövőben nagy valószínűséggel megjelennek majd az úgynevezett pilóta nélküli légi taxik (3. ábra), amelyek a nagyvárosokra jellemző közúti dugók elkerülésére kínálhatnak alternatívát.

3 . ábra
Airbus városi UAS légitaxi-koncepció [4]

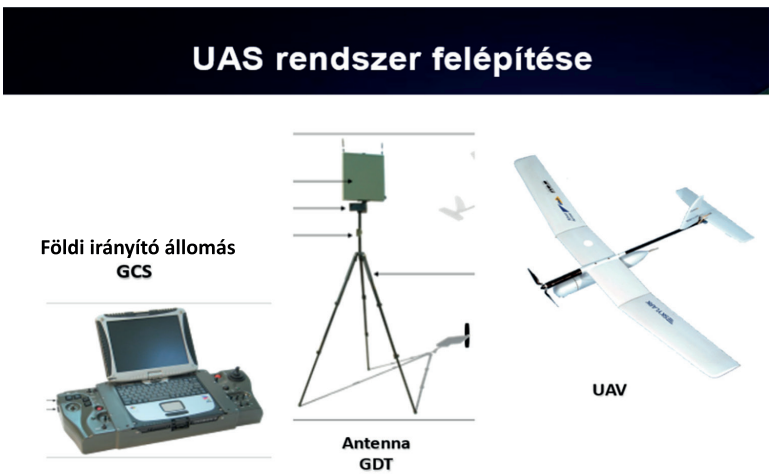
1.2. Pilóta nélküli légi járművek és pilóta nélküli légijármű-rendszerek

A pilóta nélküli légi járműveknek alapvetően azokat a légi járműveket tekintjük, amelyek fedélzetén nem tartózkodik pilóta vagy egyéb a légi jármű irányításáért felelős személy. A légi jármű a repülési feladatát a földön tartózkodó távpilóta irányítása és felügyelete mellett, alapvetően autonóm módon hajtja végre [5].

A *pilóta nélküli légi jármű* (UAV[9]), azaz maga a légi jármű önmagában nem képes a levegőben közlekedni. Repüléséhez egy rendszert (4. ábra) kell működtetni, amely rendszernek a légi jármű „csupán" egy, de természetesen a leglényegesebb eleme. A rendszer további eleme a *földi irányító állomás* (GCS[10]), amely egy munkaállomás a kezelő számára, ahol megtörténik a légi jármű repülési útvonalának tervezése, repülés közbeni irányítása és nyomon követése, illetve amelyen a repülés közbeni esetleges, a biztonság érdekében történő beavatkozáshoz szükséges funkciógombok – például azonnali leszállás, *visszatérés a felszállási (home) pontra* (RTH[11]) – vannak elhelyezve. A rendszer harmadik fő eleme a légi jármű és a földi irányító

[9] Unmanned Aerial Vehicle.
[10] Ground Control Station.
[11] Return to Home.

állomás közötti folyamatos adatkapcsolatot biztosító *antennaberendezés és adatkapcsolati háló* (GDT[12]), amely segítségével rádióelektronikai úton repülési utasításokat lehet közölni a légi járművel, illetve rádió- és videójelek segítségével megtörténik az információ továbbítása a légi jármű fedélzetéről az irányítóállomáshoz. Ezen antennák jellemzően nagy polarizáltságú irányított antennák, amelyek rálátását a légi jármű irányába folyamatosan biztosítani szükséges. Az antennát különösen kisebb méretű drónok esetén a földi irányítóállomásra integráltan helyezik el, megjegyzendő azonban, hogy a nagy teljesítményű harcászati drónok irányítása és a fedélzeti kommunikáció viszont műholdas adatkapcsolat segítségével zajlik. A három fő rendszerelem, azaz a légi jármű, a földi irányítóállomás és az antennarendszer együttesét tekintjük egységesen *pilóta nélküli légijármű-rendszernek* (UAS[13]).



4. ábra
Skylark-I LE pilóta nélküli légijármű-rendszer [6]

2. Légi járművek típus- és légi alkalmassági tanúsítása

Egy légi jármű típusalkalmassága azt jelenti, hogy az adott légijármű-típus megfeleltethető egy valamilyen előre meghatározott, az adott légijármű-kategóriára elfogadott *tanúsítási specifikációnak* [7, p. 15]. Az ilyen specifikációkat nevezzük Certification Specification-nek (jelölése: CS) és ezek azok, amelyek részletesen meghatározzák, hogy az adott kategóriájú légi járművet, illetve annak fő darabjait milyen műszakilag elfogadott elvek mentén, milyen módszerekkel és például milyen biztonsági tényezőkkel kell megtervezni, illetve méretezni. Az EU-n belül az Unió repülésbiztonsági szervezete, az EASA[14] bocsátja ki ezeket a specifikációkat. Az úgynevezett *nagy kategóriájú légi járművekre,* amelyek *maximális felszálló tömege*

[12] Ground Data Terminal.
[13] Unmanned Aircraft System.
[14] European Aviation Safety Agency – Európai Repülésbiztonsági Ügynökség.

5670 kg (12 500 lb) feletti (MTOM[15] > 5670 kg) például az EASA CS-25 specifikáció vonatkozik. A normál kategóriájú légi járművekre (MTOM < 5670 kg) az EASA CS-23, a könnyű kategóriájú légi járművekre (MTOM < 750 kg) az EASA CS-VLA vonatkozik [8].

Drónokra jelenleg még nem áll rendelkezésre az EASA által kiadott tanúsítási specifikáció, azonban immár több mint egy évtizede működik egy szakértőcsoport, mégpedig azzal a céllal, hogy megalkossák a pilóta nélküli légi járművek tanúsításához szükséges tanúsítási specifikációkat. Ez a csoport a JARUS,[16] amelybe jelenleg a világ 63 országa delegált légi alkalmassági szakembereket, illetve az EASA és az EUROCONTROL[17] képviselői is részt vesznek a közös munkában. A JARUS ez idáig már több kiadványt is kibocsátott a különböző kategóriájú UAS-ok tanúsításának elősegítéséhez, így többek között a könnyű forgószárnyas (CS-LURS) és a könnyű merevszárnyas (CS-LUAS) pilóta nélküli légijármű-rendszerek hatósági tanúsításának elősegítésére, de ezen anyagok alkalmazása – tekintettel a JARUS „nem hatósági" státuszára – továbbra is csupán javasolt, kötelező érvényűvé kizárólag az EASA által való bevezetést követően tehető az EU-ban [9].

Katonai drónok tanúsítása vonatkozásában meg kell említenünk a *NATO szabványügyi szervezete* (NSO[18]) által kibocsátott szabványokat, amelyek közül a NATO STANAG 4671-es számú anyag foglalkozik a katonai célra fejlesztett könnyű UAS-ok hatósági tanúsításával. Ez alapvetően az EASA CS-23, CS-VLA és a JARUS CS-LURS és -LUAS előírásait követi.

A légi alkalmasság és a légi alkalmassági vizsgálatok már az adott egyedi, egy bizonyos típushoz tartozó légi járműre vonatkoznak. A légi alkalmassági vizsgálat célja megállapítani, hogy az adott légi jármű aktuális műszaki-technikai állapotát tekintve alkalmas-e a biztonságos légi közlekedésre, illetve karbantartása a gyártó által kiadott és az illetékes légügyi hatóság által jóváhagyott karbantartási utasítások szerint zajlik-e [7, p. 16].

Mind a típus-, mind pedig a légi alkalmassági vizsgálatokat általában az adott országban illetékességgel rendelkező polgári légügyi hatóságok, katonai légi járművek esetében pedig a katonai légügyi hatóságok hajtják végre, saját eljárásrendjüknek, illetve jogszabályi előírásaiknak megfelelően. A típusalkalmassági vizsgálatot, tekintettel az eljárás bonyolultságára, általában vagy egy egységesen kompetensnek elismert hatóság (az EU-n belül például EASA) vagy pedig egy bizonyos tagállam, rendszerint az adott típusú légi jármű gyártója szerinti légügyi hatóság hajtja végre. A légi alkalmassági vizsgálatokat, amelyeket időszakosan is végrehajtanak egy légi jármű üzemeltetése során, vagy az adott légi járművet lajstromozó hatóság, vagy pedig a hatóság által erre felhatalmazott szervezetek, az úgynevezett *folyamatos légi alkalmasság fenntartásáért felelős szervezetek* (CAMO[19]) hajtják végre.

[15] Maximum Take-Off Mass – maximális felszálló tömeg.
[16] Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems – Közös Hatóságok a Pilóta Nélküli Rendszerek Szabályozásáért.
[17] EUROCONTROL – Európai Szervezet a Légiközlekedés Biztonságáért.
[18] NATO Standardization Organization – NATO Szabványügyi Szervezet.
[19] Continuing Airworthiness Management Organisation – Folyamatos Légialkalmasság-irányító Szervezet.

3. Termék- (típus) megfelelőségi értékelési eljárás és a bejelentett szervezet

Pilóta nélküli légi járművek típusalkalmassági vizsgálatát az Európai Unión belül az EU 2019/945 számú rendelete [5] írja elő, amely a pilóta nélküli légijármű-rendszerek osztályozásáról, típusmegfelelőségéről, illetve típustanúsításáról rendelkezik.

A rendelet a pilóta nélküli légi járműveket maximális felszálló tömegük (MTOM) és egyéb műszaki-technikai jellemzőik (például maximális repülési magasság: H_{repmax}, maximális repülési sebesség: v_{repmax}) szerint kategóriákra, egészen pontosan osztályokra bontja.

Ennek megfelelően az 1. táblázat szerinti UAS-osztályokat különböztethetjük meg.

1. táblázat
UAS-osztályok és főbb specifikumaik [10]

Osztály	MTOM	VLOS/BVLOS[20]	Egyéb
C0	≤ 0,250 kg	VLOS	$H_{repmax} \leq 120$ m, $v_{repmax} \leq 19$ m/s
C1	≤ 0,9 kg	VLOS	$H_{repmax} \leq 120$ m, vagy a pilóta által korlátozható értékű, $v_{repmax} \leq$ 19 m/s, rendelkeznie kell földrajzi helymeghatározó funkcióval (Geo-awareness)
C2	≤ 4 kg	VLOS	$H_{repmax} \leq 120$ m vagy a pilóta által korlátozható értékű, rendelkeznie kell földrajzi helymeghatározó funkcióval (Geo-awareness)
C3	≤ 25 kg	VLOS	az UAS jellemző fizikai mérete max. 3 m, $H_{repmax} \leq 120$ m vagy a pilóta által korlátozható értékű, rendelkeznie kell földrajzi helymeghatározó funkcióval (Geo-awareness)
C4	≤ 25 kg	VLOS	az UAS nem rendelkezhet automatikus vezérlési üzemmódokkal

A 2019/945 rendelet későbbi kiegészítése meghatároz még a fentieken túli C5 és C6 kategóriákat, amelyekre a C3 kategóriában felsorolt fizikai specifikumok mellett főként alkalmazási körülményekre vonatkozó korlátok és lehetőségek (például C6 esetében BVLOS lehetőség) szerepelnek.

Ugyanakkor az EU külön rendeletben határozza meg a pilóta nélküli légi járművekkel végrehajtható műveleti kategóriákat, illetve az egyes műveleti kategóriákhoz tartozó hatósági tanúsítási követelményeket. E szerint megkülönböztet úgynevezett *nyílt, speciális* és *engedélyköteles* műveleti kategóriákat [11].

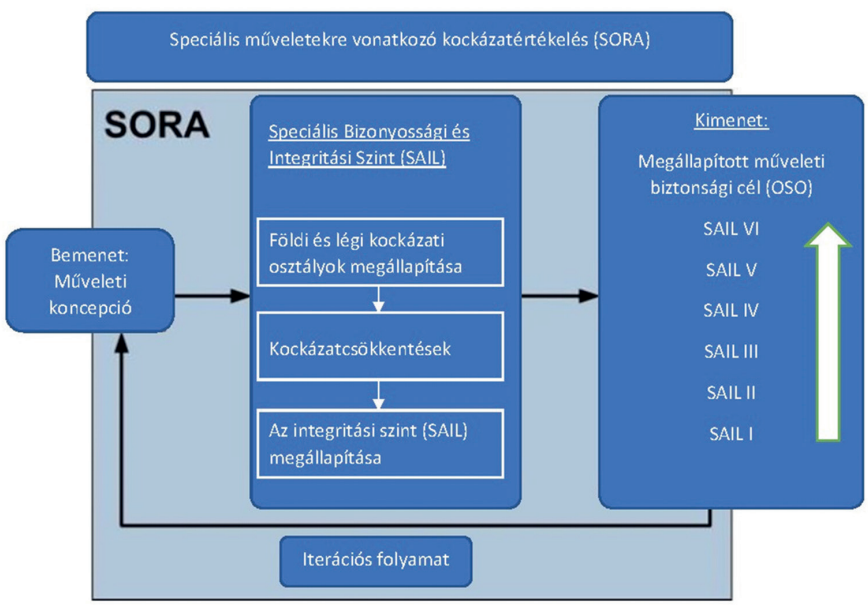
Amennyiben az UAS-t *nyílt* vagy *speciális* kategóriájú műveletekben kívánjuk alkalmazni (például nem repülünk embertömeg felé, nem szállítunk az UAS fedélzetén veszélyes árut és azt nem szórjuk le, nem repülünk látótávolságon kívül stb.), abban az esetben úgynevezett *termékmegfelelőség-értékelési* eljárást kell lefolytatnunk az UAS biztonságos légi közlekedésre való alkalmasságának megállapítása céljából. Ezt az eljárást csak az arra felhatalmazással rendelkező szervezetek, az úgynevezett *bejelentett szervezetek* (NOBO[21]) végezhetik majd az EU-n belül. A NOBO-k olyan EU-n belüli termékmegfelelőségi vizsgálatokra szakosodott és jogosított szervezetek, amelyek az EU-n belül nyilvántartási számmal rendelkeznek, és az EU illetékes szervezetéhez „be vannak jelentve". A EU-nyilvántartásba kerülés feltétele az, hogy az adott tagállami illetékességgel rendelkező piacfelügyeleti hatóság a szervezetet bevizsgálja a vizsgált termék megfelelőségére vonatkozóan, illetve az úgynevezett bejelentő

[20] VLOS/BVLOS: Visual Line of Sight/Beyond Visual Line of Sight – Látva repülés/Látva repülésen túli.
[21] Notified Body.

hatóság a sikeres vizsgálatról készült jelentés alapján a szervezetet bejelentse az EU felé [12]. Hazánkban a drónok termékmegfelelőség-értékelésére vonatkozóan szervezeti vizsgálatra Budapest Főváros Kormányhivatala rendelkezik illetékességgel, bejelentő hatóságnak pedig a légi közlekedési hatóságot (jelenleg Építésügyi és Közlekedési Minisztérium Légügyi Felügyeleti Hatósági Főosztály) jelölték ki.

A tanúsításhoz szükséges tanúsítási specifikációt a közeljövőben kiadni tervezett prEN 4709[22] jelű szabványsorozat fogja biztosítani a NOBO-k számára. A NOBO-k a szabvány előírásainak megfelelően, a gyártók megbízásából el fogják végezni az adott típusú drón szabványnak való megfelelőségértékelését, majd a sikeres vizsgálatot követően a gyártó elláthatja termékét az EU-ban való forgalmazáshoz szükséges, a termékmegfelelőséget igazoló CE jelöléssel, illetve a 2019/945 rendelet szerinti osztályazonosító címkével.

Az *engedélyköteles* kategóriájú UAS-ok típustanúsítását – a hagyományos légi járművekre vonatkozó jogszabályokhoz hasonlóan – az EASA által drónokra vonatkozóan kiadott, korábban említett tanúsítási specifikációknak, CS-eknek megfelelően, az EASA-nak vagy az adott állam illetékes (polgári) légi közlekedési hatóságának kell lefolytatnia. Tekintettel azonban arra, hogy jelenleg még sem az említett szabvány, sem pedig engedélyköteles drónok tanúsításokhoz szükséges, EASA által kiadott tanúsítási specifikáció nem áll rendelkezésre, az Unió 2024. január 1-jéig mentességet ad egyrészt az UAS-gyártók számára a NOBO-k bevonását illetően, másrészt a hatóságok számára a típustanúsítási eljárás lefolytatását illetően.



5. ábra
SORA-alapú kockázatértékelés [13]

[22] prEN 4709 Aerospace series – Unmanned Aircraft Systems – 4709-01 Product requirements and verification for the Open category; 4709-02 Direct Remote identification; 4709-03 Geo-awareness requirements; 4709-04 Lighting requirements.

E dátumig a speciális drónműveletek biztonsági kockázata kezelésének érdekében az UAS üzemben tartóknak el kell készíteni az adott *speciális műveletre vonatkozó* SORA[23]-kockázatértékelést (5. ábra), amelynek felülvizsgálatakor a hatóság a *műveleti biztonsági célok* (OSO[24]) megfelelő meghatározását és megalapozottsági szintjének, azaz a *speciális bizonyossági és integritási szint* (SAIL[25]) elérését ellenőrzi, illetve a kockázatcsökkentésre tett intézkedések megfelelőségét vizsgálja az adott műveletre vonatkozóan, így biztosítva azt, hogy ellenőrzött körülmények között tudjon megvalósulni a művelet végrehajtása. Az operatív biztonsági célok kihatnak a tervezéstől a gyártáson át, egészen a karbantartásig minden releváns részletre, amelyre az UAS üzemben tartójának figyelemmel kell lennie. Az UAS-gyártók pedig önállóan, a rendelkezésre álló egyéb (értsd nem drónspecifikus) szabványoknak való megfeleltetési eljárások lefolytatása útján tudják igazolni termékeik megbízhatóságát, az EU-n belüli forgalmazhatóság érdekében.

4. Légi járművek folyamatos légi alkalmasságának fenntartása és a repülésbiztonság

Általánosan, valamely légi jármű folyamatos légi alkalmasságának, azaz a légi jármű folyamatosan repülésre alkalmas állapotban tartásának gyakorlati módja, hogy a légi jármű egy, a karbantartótól és az üzemeltetőtől szervezetileg elkülönülő CAMO által felügyelt és irányított karbantartási környezetben üzemeljen (6. ábra). Egy légi jármű alkalmassági állapota kihat a repülésbiztonságra, hiszen az a légi jármű biztonságos légi közlekedésre való alkalmasságának fokmérője. Hogyan biztosítja ezt a CAMO? Legkönnyebben a szervezet feladatainak áttekintése útján elemezhetjük.

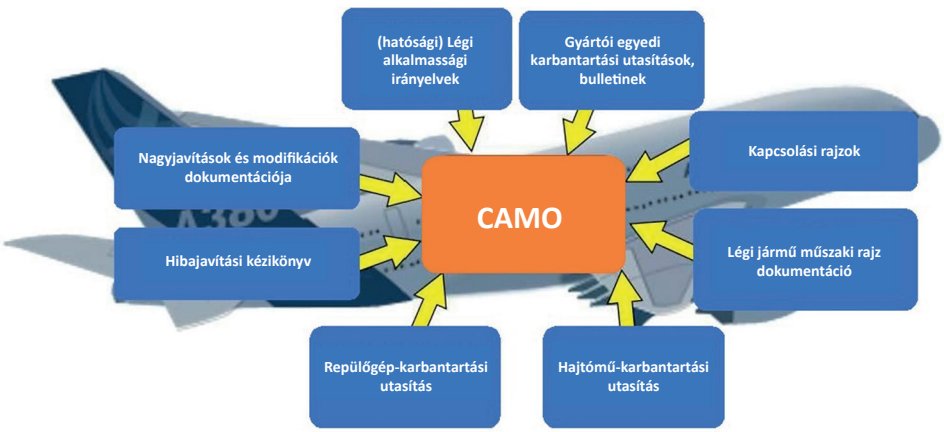
A főbb CAMO-feladatok az uniós előírás alapján [14]:

- a légi jármű karbantartási programjának elkészítése és szükség szerinti módosítása, az elkészült vagy módosított program jóváhagyásának megszerzése, illetve a program hatékonyságának ellenőrzése;
- a program alapján szükséges karbantartási feladatok kiadása a légijármű-karbantartó szervezet számára, a karbantartási program végrehajtásának felügyelete;
- a felügyelt légi jármű üzemeltetési és karbantartási körülményeinek ismerete, az adott légi jármű szerkezeti és karbantartási állapotának, a feltárt meghibásodásainak és azok kijavítási módjának ismerete;
- a légijármű-karbantartási program hatékonyságának ellenőrzése, így a repülőgép és rendszereinek megbízhatóságát, a jelentkező meghibásodások gyakoriságát figyelő és elemző úgynevezett megbízhatósági program működtetéséről is gondoskodnia kell;
- a légialkalmasság-felülvizsgálati bizonyítvány érvényességének fenntartása, amihez szükséges a rendszeres felülvizsgálat elvégzése;
- tisztában kell lennie a szabályzási környezet változásaival, a hatósági, gyártói és beszállítói előírások, követelmények mindenkori helyzetével;
- meg kell szerveznie a légi jármű bármilyen módosításának jóváhagyását annak végrehajtása előtt;

[23] Specific Operations Risk Assessment.
[24] Operational Safety Objectives.
[25] Specific Assurance and Integrity Level.

A CAMO szervezet (lehetséges) privilégiumai:

- *időszakos légi alkalmassági* felülvizsgálatok végrehajtása és a felülvizsgálati bizonyítvány kiadásának és érvényessége meghosszabbításának joga;
- különleges esetekben a repülőgép egyszeri átrepülése engedélyezésének joga.



6. ábra
A folyamatos légi alkalmasság irányításának rendszere [15]

A CAMO-feladatok, illetve lehetséges privilégiumai között szereplő *időszakos légi alkalmassági felülvizsgálatoknak* van talán a legnagyobb jelentősége, ennek van ugyanis közvetlen hatása a repülésbiztonságra, hiszen ebben az eljárásban minősítik az adott légi jármű alkalmas állapotát. A felülvizsgálat során a CAMO szakemberei áttekintik a légi jármű karbantartási dokumentációját, megvizsgálják annak teljességét, azt, hogy minden a gyártó által előírt karbantartási formát végrehajtottak-e az adott légi járművön, illetve azt megfelelően rögzítették-e a légi jármű vonatkozó dokumentumaiban, elektronikus karbantartás-nyilvántartó rendszerében. Emellett a CAMO szakemberei szemrevételezik az adott légi jármű általános műszaki állapotát, annak minőségét is, szükség esetén ellenőrző felülvizsgálati repülést hajthatnak végre. Manapság viszont ez utóbbira, tekintettel a légi járművek és a karbantartási rendszer fejlettségi szintjére egyre kevésbé vagy egyáltalán nincs szükség, mivel a légi jármű alkalmasságának állapota pusztán a szintén a CAMO által, a gyártói utasítások alapján összeállított és az illetékes légügyi hatóság által jóváhagyott légijármű-karbantartási program betartottságának felülvizsgálatával, nagy biztonsággal megállapítható.

5. Összefoglalás

A pilóta nélküli légi járművek alkalmazásának igénye a közeljövőben egyre inkább terjedni fog a nyílt és a speciális műveleteken túlra, azaz a tanúsított kategóriában is. Ez elsődlegesen megköveteli majd az UAS-ok hagyományos légi járművekkel közös légtérhasználata feltételeinek megteremtését is. A nagyvárosok megnövekedett földfelszíni és földfelszín alatti, jellemzően kötöttpályás túlzsúfolt forgalma a városok feletti légtér kihasználására ösztönzi

már napjainkban is a városfejlesztőket. A városok feletti légi közlekedés jövőbeni koncepciója szerint ilyen fajta légtérhasználat elsősorban autonóm rendszerek, UAS-ok segítségével valósítható majd meg a legbiztonságosabban. Ennek érdekében ki kell dolgozni egyrészt az úgynevezett *rugalmas légtérfelhasználás* technikai és jogi szabályozási rendszerét, ami lehetőséget teremt majd az UAS-ok hagyományos légi járművekkel közös légtérhasználatára. Ehhez viszont a megfelelő műszaki-technikai színvonalú típustanúsított UAS-ok mellett létre kell hozni a biztonságos üzembentartási környezetet is számukra azért, hogy ez a biztonságos légi üzem folyamatosan biztosítható legyen.

Meglátásom szerint a hagyományos légi járművek üzembentartási környezetéből ismert folyamatos légialkalmasság-irányítási rendszer, illetve az azt biztosító CAMO szervezet pilóta nélküli légi járművek üzembentartására való alkalmazásának kötelezővé tétele útján biztosítható csupán a speciális kategórián túli, például személyszállításra is alkalmas UAS-ok hagyományos légi járművekkel közös és biztonságos légtérhasználata.

Az UAS-ok jelenleg karbantartás szempontjából nem vagy nem teljeskörűen szabályozott üzembentartási környezetben működnek, a légi alkalmassági állapotuk pedig nehezen lenne meghatározható, arra csupán a gyártó által kiadott használati útmutatóban, illetve a műveleti engedélyek megszerzéséhez szükséges, nagyvonalakban megfogalmazott karbantartási koncepciók alapján lehet következtetni. A hagyományos légi járművek üzembentartását ellenőrző nemzeti légi közlekedési hatóságok pedig megfelelő szabályozók híján jelenleg nem gyakorolnak felügyeletet az UAS-ok légi alkalmasságát illetően. CAMO szervezetek alkalmazására pedig még nagyobb méretű és darabszámú drónok esetén sem kerül sor.

Véleményem szerint az UAS-üzemeltetők, üzemben tartók még nem ismerték fel az analógiát a hagyományos légijármű-üzemeltetés és a drónok rendszeres üzemeltetése között, illetve nem tudatosult bennük a drónok nem előre meghatározott karbantartási program szerinti üzemeltetésének káros hatása az UAS légi alkalmasságára, illetve annak valós és közvetlen veszélye a repülés biztonságára. Ez sok esetben annak is köszönhető, hogy a drónüzemeltetők nem ismerik a hagyományos légi járművek üzemeltetési rendszerét és a CAMO szervezetek működésének lényegét.

Jelenlegi koncepcióm szerint egyrészt jogszabályok által meg kell követelni e kategóriában a hagyományos légi járművekhez hasonló légialkalmasság-irányítási rendszer kiépítését UAS-ok vonatkozásában is, és az UAS üzemben tartó szervezetek számára megfelelő képzéseket kell szervezni, amelyek során az üzemben tartók ismereteket szerezhetnek a légi járművek folyamatos légi alkalmassága fenntartásának fontosságáról és a biztonságos légi közlekedés ezirányú feltételeiről.

Felhasznált irodalom

[1] www.skytamer.com/Radioplane_OQ-2A.html
[2] Palik M. szerk., *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013.
[3] https://dronewarsuk.files.wordpress.com/2010/06/predator-firing-missile4.jpg
[4] CityAirbus Passenger Drone Takes a Step towards 2018 Flight. *Unmanned Airspace,* 2017. december 19. Online: www.unmannedairspace.info/uncategorized/cityairbus-passenger-drone-takes-step-towards-2018-flight/

[5] A Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) a pilóta nélküli légijármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légijármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról
[6] A szerző saját szerkesztésű ábrája a Skylark I-LE – Elbit Systems típus ismertetője alapján. Online: https://elbitsystems.com/
[7] Gaál S., *Airworthiness – Kezdeti és folyamatos légialkalmasság*. Lufthansa Technik AG, 2021.
[8] https://www.easa.europa.eu/en/search?keys=EASA%20CS-VLA&f[0]=origin:EASA+Pro
[9] http://jarus-rpas.org/who-we-are
[10] A szerző saját szerkesztésű ábrája a Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete alapján
[11] A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról
[12] https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/ce-marking/index_hu.htm
[13] Bottyán Zs., „Rutinszerű légköri vertikális profilmérések végrehajtására alkalmas drón mérőhálózat kialakítása," *Közlekedéstudományi Intézet Műhelytanulmányok*, pp. 55–65. 2022. Online: https://doi.org/10.55348/KM.16
[14] A bizottság 1321/2014/EU rendelete a légi járművek és repüléstechnikai termékek, alkatrészek és berendezések folyamatos légi alkalmasságának biztosításáról és az ezzel összefüggő feladatokban részt vevő szervezetek és személyek jóváhagyásáról alapján
[15] A szerző saját szerkesztésű ábrája a https://ukdiss.com/examples/outsourcing-continuing-airworthiness-management-activities.php forrás alapján

Type Conformity Assessment and Continuing Airworthiness of Unmanned Aircraft Systems and Impacts on Aviation Safety

The operational requirements for unmanned aircraft systems (UAS) are differentiated by the European Union (EU) according to the technical content of the UAS and how it is applied. According to the technical content and application of the UAS, there are three categories of open, special and certified operations.

If the UAS operation exceeds the limits set for the open category operation, e.g. the maximum take-off mass (MTOM) of the UAS exceeds 25 kg, the flight altitude of the operation is above 120 m, or it is performed beyond visual line of sight (BVLOS), then we are talking about special or certified category UAS operations. Or if, on the basis of a SORA-based risk assessment of the safe feasibility of an operation, the operation cannot be safely carried out and/or the competent aviation authority considers that only after an aircraft certification process can operational risks be reasonably mitigated, then we are considered to be certified category of UAS operations.

In this article, I would like to present these latter two types of applications, the possibilities of their safe implementation and the future significance of continuing airworthiness management organisations (CAMOs).

Keywords: *unmanned aircraft system (UAS), European Union (EU), maximum take-off mass (MTOM), notified body (NOBO), beyond visual line of sight (BVLOS), specific operations risk assessment (SORA), continuing airworthiness management organisation (CAMO)*

Simon Sándor
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Katonai Műszaki Doktori Iskola
simon.sandor@uni-nke.hu
orcid.org/0009-0009-0760-3510

Sándor Simon, MSc
PhD student
University of Public Service
Doctoral School for Military Engineering
simon.sandor@uni-nke.hu
orcid.org/0009-0009-0760-3510

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 49–58. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.4

Ripszám Dóra

A magánszféra védelme a pilóta nélküli légi jármű alkalmazása során

A technológiai fejlődés és a digitalizáció növekvő tendenciájának következtében az egyén magánszférájának védelme olyan új kihívásokkal néz szembe, amelyekre a szabályozásnak is szükséges reagálnia. A pilóta nélküli légi járművek használata rendkívül dinamikus terjedést mutat, azonban a széles körű igénybevétel során számos magánszférát, illetve az információs önrendelkezési jogot is érintő kérdés merül fel. A pilóta nélküli légi jármű használata kapcsán a magánszféra védelme nem csupán az Alaptörvényre vezethető vissza, de büntetőjogi felelősségi struktúra is kapcsolódik hozzá.

Kulcsszavak: *pilóta nélküli légi jármű, magánszféra, drón*

1. Bevezetés

Az Emberi Jogok Európai Egyezményének 8. cikk 1. pontja alapján: „Mindenkinek joga van arra, hogy magán- és családi életét, lakását és levelezését tiszteletben tartsák" [1, 8. cikk 1. pont].

Mint minden új, az információk gyűjtésére alkalmas technológia, a távirányítású pilóta nélküli légijármű-rendszerek (köznyelvben drónok) alkalmazása is komoly hatást gyakorolhat az állampolgárok életére, azon belül is nem utolsósorban a magánszférájára [2, p. 151].

A pilóta nélküli légi járművek használata környezetünkben igen dinamikus terjedést mutat, a katonai alkalmazások mellett ma már egyre inkább előtérbe kerül a polgári célú felhasználás. Nyilvánvaló, hogy a repülés jelenleg legdinamikusabban fejlődő ágának tekintendő, amely számos lehetőséget nyújt, de egyben felelősséget is jelent a felhasználók számára [3, p. 49].

A légi közlekedésről szóló 1995. évi XCVII. törvény (Lt.) 71. § 35. pontja a pilóta nélküli légi jármű kapcsán a következőt rögzíti: „pilóta nélküli légijármű (UA): az (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló bizottsági rendelet 3. cikk 1. pontja szerinti fogalom" [4, 71. § 35. pont]. Így tehát a Bizottság (EU) pilóta nélküli légijármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légijármű-rendszerek harmadik országbeli üzemben tartóiról szóló 2019/945 számú felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) adja meg számunkra a pilóta nélküli légi jármű fogalmát, miszerint „a »pilóta nélküli légi jármű (UA)«: bármely olyan légi jármű, amely a fedélzetén tartózkodó pilóta nélkül üzemel, vagy amelyet ilyen üzemmódra terveztek, és amely önálló vagy távirányítással történő üzemelésre képes" [5, 3. cikk 1. pont].

A pilóta nélküli légi járművek alkalmazása során olyan, a magánszféra-védelem szempontjából sérthetetlennek hitt helyeken érhet bárkit személyiségi jogsérelem – elsősorban

a képmáshoz és hangfelvételhez fűződő jog kapcsán –, amelyeken az egyén eddig egyáltalán nem számíthatott a jogsértésre [6, p. 90]. A személyiségi jogok védelmének célja az egyén autonómiájának, magánszférájának, szabad kibontakozásának, szabad döntési képességének (önrendelkezésének) a biztosítása [7, p. 267]. A képmáshoz és a hangfelvételhez való jog védi az emberi személyiség külső megnyilvánulását. Az ember külső megjelenése a személyiség belső sajátosságait vetíti ki, így az egyén megkülönböztetésének nélkülözhetetlen eszköze. A képmás és a hangfelvétel a személyiség azonosítására szolgál közvetetten. Képmás nemcsak a különböző fotótechnikai eszközök útján rögzített fénylenyomat lehet, hanem akár rajz, ábra, festmény, plasztika, fénymásolat, digitális rögzítés stb. [8]. A Polgári Törvénykönyvről szóló 2013. évi V. törvény 2:48. §-a kimondja, hogy: „(1) Képmás vagy hangfelvétel elkészítéséhez és felhasználásához az érintett személy hozzájárulása szükséges. (2) Nincs szükség az érintett hozzájárulására a felvétel elkészítéséhez és az elkészített felvétel felhasználásához tömegfelvétel és nyilvános közéleti szereplésről készült felvétel esetén" [9, 2:48. §].

A pilóta nélküli légi járművek állami (katonai, nemzetbiztonsági, katasztrófavédelmi stb.), kereskedelmi és magáncélú használata mára általánosnak tekinthető, igénybevételük során ugyanakkor számos, magánszférát, illetve az információs önrendelkezési jogot érintő kérdés merül fel [10, p. 101].

2. A magánszféra meghatározása

A modern alkotmányok, illetve az alkotmánybírósági gyakorlat az általános személyiségi jogot különféle aspektusaival nevezik meg: például a magánszférához, a személyiség szabad kibontakoztatásához, az önrendelkezés szabadságához való jogként, vagy akár az általános cselekvési szabadságként. Az általános személyiségi jog „anyajog", tehát olyan szubszidiárius alapjog, amelyet mind az Alkotmánybíróság, mind pedig a bíróságok minden esetben felhívhatnak az egyén autonómiájának védelmére, ha az adott tényállásra a konkrét, nevesített alapjogok egyike sem alkalmazható [11].

A magánszféra fogalma, valamint a hozzá fűződő aggodalmak meghatározása nem egyedül az adatvédelmi jog tekintetében fontos, az elmúlt években ugyanis több iparágat és szolgáltatási szektort formált az, hogy az adatvédelmi kérdésekről és a magánszféráról hogyan gondolkozik az az érintetti kör, amelyik az információs technológiában részt vesz a szabályozó hatóságoktól, a fogyasztókon és civil szervezeteken át a kormányzatokig és a versenyszféráig [12, p. 124].

A magánélet – ez a nehezen megfogható, ám mégis mindenki által világosan átélt és tudatosan megélt élettér – problematikája lényegében egyidős a társadalmak életével, azonban ennek ellenére a magánélet értelmezéséről és védelméről szóló viták viszonylag új keletűnek számítanak. Mindez pedig összefüggésben áll azzal, hogy a magánélet védelme az új és igen hatékony információs technológiák megjelenésével rendkívül sérülékennyé vált, továbbá az emberekben egyre inkább tudatosul, hogy a magánélet értelmezése szorosan összefügg a személyiség, a társadalom és az egyén szerepéről, helyéről vallott eszmékkel. A magánélet *(privacy)* mint mozgástér lényegi eleme az adott személyről szóló információk megszerzésének, valamint felhasználásának problémája: milyen mértékben maradhat „ura" az egyén a vele kapcsolatos információknak, mennyiben rendelkezhet velük szabadon,

kizárhatja-e életének meghatározott részéből a külvilágot, vagy pedig köteles eltűrni a világ szemét és száját [13, pp. 1–2].

3. A magánszféra alaptörvényi védelme

A technológiai fejlődés, a digitalizáció és a médianyilvánosság növekvő tendenciájának következtében az egyén magánszférájának védelme olyan új kihívásokkal néz szembe, amelyekre a szabályozásnak is szükséges reagálnia. A nagy fokú digitalizáltsággal támogatott világban a magánélet védelme már nem csupán az intim szférára, hanem egy tágabb értelemben vett magánszférára, az egyén családi életére, otthonára, kapcsolattartására is kiterjed [14].

Az Alaptörvény VI. cikk (1) bekezdése kimondja, hogy: „Mindenkinek joga van ahhoz, hogy magán- és családi életét, otthonát, kapcsolattartását és jó hírnevét tiszteletben tartsák. A véleménynyilvánítás szabadsága és a gyülekezési jog gyakorlása nem járhat mások magán- és családi életének, valamint otthonának sérelmével. (2) Az állam jogi védelemben részesíti az otthon nyugalmát. (3) Mindenkinek joga van személyes adatai védelméhez, valamint a közérdekű adatok megismeréséhez és terjesztéséhez" [15, VI. cikk (1)–(2) bek.].

A „magánszférához való jogot" sem az Alkotmány, sem az Alaptörvény nem nevezi meg konkrét, szubjektív alapjogként, de a magánélet szabadságához való jog kétségkívül az egyén autonómiájának védelmére szolgáló olyan alapjog, amely az ember veleszületett méltóságából ered. Amelynek tehát az általános személyiségi jog – az emberi méltósághoz való jog – szubszidiárius alapjoga [16].

Az Alkotmánybíróság értelmezésében az Alaptörvény VI. cikk (1) bekezdésében biztosított magánszférához való jog és az Alaptörvény II. cikke[1] által garantált emberi méltósághoz való jog között rendkívül szoros kapcsolat áll fenn. Az Alaptörvény II. cikke megalapozza a magánszféra érinthetetlen elemének védelmét, ami teljesen ki van zárva minden állami beavatkozás alól, mivel ez az emberi méltóság alapja. Az Alaptörvény VI. cikk (1) bekezdése alapján – a régi Alkotmány 59. § (1) bekezdésében foglaltakkal ellentétben – a magánszféra védelme nem szűkül le az Alaptörvény II. cikke által is védett belső vagy intim szférára. Az kiterjed a tágabb értelemben vett magánszférára (kapcsolattartás), illetve arra a térbeli szférára is, amelyben a magán- és családi élet kibontakozik (otthon), ezen túlmenően önálló védelmet élvez az egyén életéről alkotott kép is (jó hírnévhez való jog) [10, p. 102], [17].

A magánszféra kiemelt alaptörvényi védelmének a biztosítása a különféle jogterületeken úgynevezett tilalmi, a kívülállókat tartózkodásra kötelező normák meghatározásával történik. Az általános személyiségi jog egyes aspektusainak jogrendbeli védelme komplex képet mutat, hiszen azokat a polgári jog, a szabálysértési jog és a büntetőjog egyaránt oltalmazza [10, pp. 102–103].

Tanulmányomban elsősorban a pilóta nélküli légi járművek magáncélú felhasználását vizsgálom, így a magánszféra korlátozására csak igen röviden térek ki.

A magánszféra védelméhez való jog és az információs önrendelkezési jog nem minősül korlátlan alapjognak. A magánszférába való behatolást, valamint a megszerzett adatok felhasználását mind nemzetbiztonsági, mind pedig bűnüldözési célok igazolhatják, azonban az egyén

[1] Az Alaptörvény II. cikke kimondja: „Az emberi méltóság sérthetetlen. Minden embernek joga van az élethez és az emberi méltósághoz, a magzat életét a fogantatástól kezdve védelem illeti meg."

csak olyan mértékű korlátozását köteles elviselni alapjogainak, amelynek alkotmányos törvényi alapja van [17]. Az egyéni magánszférát számos esetben ellentétesnek tartják a közjóval vagy a közösségi érdekkel, úgyszintén a nemzeti érdekkel is. Tehát olyan követelésekkel, amelyekről úgy vélik, hogy fontosabbak az egyén magánszférára vonatkozó igényeinél [18, p. 83].

4. A magánszféra védelme a büntetőjog eszközével

Arra tekintettel, hogy a pilóta nélküli légi járművek megfizethetőbbé váltak, népszerűségük a nagyközönség és a gazdasági társaságok körében az elmúlt években jelentős növekedést mutatott. Amellett, hogy mind a hobbi célú felhasználók, mind a repülőgép-rajongók számára továbbra is szórakozásként szolgálnak, ma már használják őket olyan tevékenységek végzésére is, mint a bűnügyi felügyelet, a mezőgazdasági munkák, filmek és sportesemények speciális felvételének elkészítése, valamint kutatási tevékenységek. Annak ellenére, hogy számos jogszerű felhasználást tapasztalhatunk, egyre több hír érkezik arról is, hogy visszaélnek a pilóta nélküli légi jármű által nyújtott technológiákkal: a gondatlan repülések által okozott fizikai támadásoktól kezdve a légi navigációs szabályok megsértéséig [19].

A társadalmi problémák megoldását az államok legtöbbször a jogi szabályozóeszközök segítségével kísérlik meg, a helyzet alapos elemzését követően. A büntetőjog – mint ultima ratio[2] – végső eszközként akkor jöhet szóba, ha az adott társadalmi, politikai vagy egészségügyi krízis megoldása, illetőleg a következményeinek az enyhítése a többi jogág eszközeivel nem, vagy pedig nem hatékonyan valósulhat meg [20].

A drónok nyújtotta technikai lehetőség olyan mértékben változtatta meg a magánszféra megismerésének eshetőségét, hogy a magánterület, a magánlakás, a magánszféra védelme hétköznapi eszközökkel már nem biztosítható, és így – a jogalkotó álláspontja szerint – indokolttá vált a magánszférát sértő, jogosulatlan drónhasználathoz kapcsolódó speciális felelősség jogalapjának megteremtése [10, p. 103], [21].

Gál Andor és Szomora Zsolt a drónhasználathoz kapcsolódó felelősségi struktúrát a hatályos szabályok tükrében a következők szerint ismerteti:

- A jogosulatlan drónhasználathoz kapcsolódó felelősségi struktúra:
  - lakott terület felett a jogosulatlan drónhasználat már önmagában szabálysértést valósít meg [a szabálysértésekről, a szabálysértési eljárásról és a szabálysértési nyilvántartási rendszerről szóló 2012. évi II. törvény (Szabs. tv.) 229. § (1) bek.];
  - aki a jogosulatlan drónhasználat során más lakásáról, egyéb helyiségéről, vagy ezekhez tartozó bekerített helyről jogosulatlanul hang- vagy képfelvételt készít, szabálysértést követ el [Szabs. tv. 166. § (1a) bek.];
  - ha az előző szabálysértési tényálláshoz képest huzamosabb ideig tartó megfigyelés és felvételrögzítés történik, akkor az új bűncselekményi tényállás valósul meg, ennek minősített esetét jelenti a felvételek nagy nyilvánosság számára történő hozzáférhetővé tétele (a Büntető Törvénykönyvről szóló 2012. évi C. törvény [Btk.] 422/A. §). Hangsúlyozandó, hogy ez esetben nem titkos, hanem nyílt megfigyelésről van szó;

[2] „A büntetőjog a jogi felelősségi rendszerben az ultima ratio. Társadalmi rendeltetése, hogy a jogrendszer egészének szankciós zárköve legyen. A büntetőjogi szankció, a büntetés szerepe és rendeltetése a jogi és erkölcsi normák épségének fenntartása akkor, amikor már más jogágak szankciói nem segítenek" [30/1992. (V. 26.) AB határozat].

  - ha a megfigyelés vagy rögzítés titokban történik, akkor a tiltott adatszerzés – már korábban is létező – súlyosabb bűncselekményi alakzata állapítható meg [Btk. 422. § (1) bek. *b)* pont];
- A jogszerű drónhasználathoz kapcsolódó felelősségi struktúra:
  - amennyiben nem titkos, hanem nyílt megfigyelés vagy felvételrögzítés történik, akkor a személyiségi jogok sérelmének polgári jogi szankciói alkalmazhatók, ha pedig e jogosulatlan adatkezelés – eredményként – jelentős érdeksérelmet okoz, akkor a Btk. 219. § (1) bekezdése szerinti személyes adattal visszaélés vétsége állapítható meg;
  - a titkos megfigyelésre – egyébként jogszerű drónhasználat esetén is – a tiltott adatszerzés átfogó tényállása alkalmazandó [Btk. 422. § (1) bek. *b)* pont] [10, pp. 103–104].

Az egyes esetek rövid ismertetése előtt szükséges leszögezni, hogy a magyar légtér igénybevételéről szóló 4/1998. (I. 16.) Korm. rendelet 9/A. § (1) bekezdése szerint: „Jogosulatlanul veszi igénybe a magyar légteret az a pilóta nélküli légijármű, amely a légtér igénybevételére a pilóta nélküli légijármű üzemeltetésére, használatára vonatkozó jogszabályi előírásokat nem tartja meg" [22, 9/A. § (1) bek.]. Az Lt. 71. § 32. pontja alapján a magyar légtér nem más, mint a „Magyarország feletti légtérnek a légiközlekedés számára – a mindenkori legfejlettebb technikai színvonal alapján – fizikailag igénybe vehető magasságig terjedő része" [4, 71. § 32. pont].

A lakott terület fogalmáról a légi közlekedéssel kapcsolatos jogszabályok egyáltalán nem adnak számunkra iránymutatást. Arra, hogy mit tekinthetünk lakott területnek a közúti közlekedés szabályairól szóló 1/1975. (II. 5.) KPM-BM együttes rendelet (KRESZ), a vízgazdálkodásról szóló 1995. évi LVII. törvény, a növényvédelmi tevékenységről szóló 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet, a mező- és erdőgazdasági légi munkavégzésről szóló 44/2005. (V. 6.) FVM-GKM-KvVM együttes rendelet, a területszervezési eljárásról szóló 321/2012. (XI. 16.) Korm. rendelet ad némi felvilágosítást, azonban e definíciók nem azonosak.

A KRESZ 1. számú függelék III. részének (A közúti forgalommal kapcsolatos fogalmak) f) pontja alapján „lakott terület: a lakott terület kezdetét és végét jelző táblák közé eső terület" [23, 1. számú függelék III. rész f) pont]. Ez azonban csak a közúti közlekedés szempontjából értelmezhető fogalom, hiszen pilóta nélküli légi járműként nem csak a közutak felett érheti el, vagy hagyhatja el a lakott területek légterét [24].

A vízgazdálkodásról szóló törvény 1. számú mellékletének 32. pontja szerint „lakott terület: a település közigazgatási területének belterületi része, valamint az övezeti besorolástól függetlenül minden olyan külterületi településrész, ahol a nyilvántartott földrészleteket (ingatlanokat) tekintve legalább 50%-ban állandó tartózkodási hely szerint bejelentett (nyilvántartott) lakosság él, és a területfelhasználás, valamint az infrastruktúra-hálózat kialakítása a települést érintő – jóváhagyott – országos és térségi területrendezési tervekkel összhangban lévő településrendezési tervnek megfelel" [25, 1. számú melléklet 32. pont].

A 43/2010. (IV. 23.) FVM rendelet 1. § 4. pontja értelmében „lakott területrész: a település olyan bel- vagy külterülete, amelyen a tulajdonosok az év valamely szakában életvitelszerűen tartózkodnak" [26, 1. § 4. pont]. A 44/2005. (V. 6.) FVM-GKM-KvVM együttes rendelet a lakott területrész kapcsán erre a jogszabályhelyre utal vissza [27, 2. § 4a pont]. Azonban ebben a fogalomban a lakott területrész kizárólag növényvédelmi aspektusból értelmezhető és vizsgálható, ezért ez a jogszabályi definíció sem biztosít megoldást arra, mit tekintsünk lakott területnek – különösen a nem növényvédelmi műveletet végző – drónok reptetése esetén [28, p. 167].

A 321/2012. (XI. 16.) Korm. rendelet 1. § 8. pontja szerint „lakott területrész: a képviselő-testületek eltérő megállapodása hiányában a fogadó település bel- vagy külterületéhez kapcsolódó és azzal összefüggő természetes vagy jelentős műszaki létesítmény mesterséges határvonala által lehatárolt bel- vagy külterület, amelyen az érintett választópolgárok életvitelszerűen lakóhellyel rendelkeznek" [29, 1. § 8. pont].

A fentiek alapján elviekben, „lakott terület"-ként kell definiálni a települések közigazgatási területének belterületi részét, valamint az övezeti besorolástól függetlenül minden olyan külterületi településrészt, ahol emberek életvitelszerűen élnek. Ennek értelmében a városi tó is lakott terület, ha közigazgatási határon belül van, ahogyan a focipálya vagy a rét/liget/park is [30].

A drónhasználat engedély (eseti légtérkijelölés, légiforgalmi irányítói engedély, vagy egyéb más engedély) hiányában jogosulatlannak minősül, ami már önmagában veszélyezteti a magánélet háborítatlanságát (a magánszférát). Közlekedési szabálysértést (pilóta nélküli légi járművel végzett jogosulatlan tevékenység [Szabs. tv. 229. §]) valósít meg az, aki a szükséges engedély nélkül használ pilóta nélküli légi járművet lakott terület felett [31, p. 1001]. A pilóta nélküli légijármű-rendszerek távirányításához szükséges berendezést és a pilóta nélküli légi járműre rögzített eszköz adatkommunikációjához szükséges berendezést csak az e célra létrehozott internetes felület és mobilalkalmazás használatával szabad üzemeltetni [32]. Jogosulatlan továbbá a pilóta nélküli légi jármű használata például akkor is, ha a pilóta nélküli légijármű-rendszert a légi közlekedési hatóság nem vette nyilvántartásba [4, 17. § (2) bek.], ha a pilóta nélküli légijármű-rendszer üzemben tartóinak nyilvántartásba vétele nem történt meg [4, 17. § (7) bek.], illetve a kategóriának megfelelő képzés és vizsga hiánya esetén. Tehát a jogosulatlan használat már önmagában szankcionálható, ha az lakott terület felett valósul meg, abban az esetben is, ha nem készül felvétel, továbbá akkor is, ha készül ugyan felvétel, de azon lakás, egyéb helyiség stb. nem szerepel [33].

Amennyiben az elkövető a pilóta nélküli légi jármű jogosulatlan használata során más lakásáról, egyéb helyiségéről, vagy az ezekhez tartozó bekerített helyről jogosulatlanul hang-, vagy képfelvételt is készít, megalapozza a magánlaksértés új szabálysértési tényállását [Szabs. tv. 166. § (1a) bek.], hiszen ez a többletmagatartás már személyiségi jogsérelmet jelent [31, p. 1001]. A Szabs. tv. 166. § (2) bekezdésében foglalt magánlaksértési alakzatra tekintettel megállapítható, hogy az eseti jelleggel készített felvételek a szabálysértési tényállást, míg a huzamosabb időn át történő megfigyelés egyidejű rögzítése a bűncselekményi tényállást realizálhatja [34]. Természeténél fogva nem minősül jogosulatlannak a felvétel készítése, ha az érintett ahhoz hozzájárult (vagy kifejezetten ő adott rá megbízást) [33].

A megfigyelés huzamosabb ideig tartó figyelemmel kísérést, valamint vizsgálatot jelent [31, p. 1000]. A tiltott adatszerzés új tényállásának megvalósulása olyan drónreptetést feltételez, amely nem felel meg a vonatkozó háttérszabályoknak [34]. Az új tényállás a pilóta nélküli légi járművel való nyílt, tehát az érintett személy által észlelhető módon történő megfigyelést rendeli büntetni, méghozzá abban az esetben, ha a pilóta nélküli légi jármű használatára a vezetőnek nincsen jogosultsága [31, pp. 1000–1001]. Amennyiben jogszerű a pilóta nélküli légi jármű használata, a Btk. 422/A. §-a szerinti bűncselekmény nem valósulhat meg, ilyenkor a személyes adattal visszaélés, illetve a tiltott adatszerzés tényállásainak a vizsgálatára kerül sor [34]. A személyhez fűződő jogok szenzitivitására tekintettel – csakúgy, mint a szabálysértési alakzatok esetében – indokolt volt meghagyni

a sértett önrendelkezési jogát azzal összefüggésben, hogy kívánja-e az elkövető felelősségre vonását, ezért a javaslat szerint a fenti bűncselekmények magánindítványhoz kötöttek [35].

A titokban történő megfigyelés a Btk. 422. § alapján büntetendő, tehát a tiltott adatszerzés már korábban is létező alakzata állapítható meg [31, p. 1000].

Amennyiben a személyes adat jogosulatlan, vagy céltól eltérő kezelése (például drónnal történő felvétel készítése akár repülési engedéllyel rendelkezik az elkövető, akár nem, akár lakott területen követik el, akár nem, akár egyszeri, egyedi képfelvétel készül, akár tartós megfigyelés történik) jelentős érdeksérelmet okoz, az személyes adattal visszaélésként (Btk. 219. §) büntetendő [31, p. 1002].

5. Összefoglalás

A modern technika világában az okoseszközök mellett a mindennapjaink részévé váltak a pilóta nélküli légi járművek – azaz drónok –, amely eszközöknek számos pozitív hozadéka van, azonban különböző veszélyeket is hordoz magában a használatuk [36, p. 190].

A pilóta nélküli légi járművek nyújtotta technikai lehetőség olyan mértékben változtatta meg a magánszféra megismerésének eshetőségét, amelyre tekintettel a magánterület, a magánlakás, a magánszféra védelme hétköznapi eszközökkel már nem biztosítható tovább. Ennek megfelelően indokolttá vált a magánszférát sértő, jogosulatlan pilóta nélküli légijármű-használathoz kapcsolódó speciális felelősség jogalapjának megteremtése [21].

A Btk.-t és a szabálysértési törvényt módosító, a pilóta nélküli légi járművek üzemelésével összefüggő egyes törvények módosításáról szóló 2020. évi CLXXIX. törvényt megelőzően a mások – a magánlakás zavartalanságához fűződő jogban testet öltő – magánszférájának sérelme, személyes adatainak, magántitkainak, üzleti és gazdasági titkainak pilóta nélküli légi járművel történő megfigyelése vagy rögzítése a Btk. 422. §-ában meghatározott általános és átfogó tényállás (tiltott adatszerzés) alapján akkor volt büntethető, ha az titokban valósult meg [Btk. 422. § (1) bek. *b)* pont]. A pilóta nélküli légi járművek reptetése ugyanakkor – természeténél fogva – nem szükségképpen leplezett magatartás, nyílt reptetés esetén – függetlenül a sértett észlelésétől – a művelet leplezésére irányuló törekvésről sem lehet beszélni. Ezért a pilóta nélküli légi járművek használatának terjedésére tekintettel a jogalkotó a Büntető Törvénykönyvet és a szabálysértési törvényt is módosította, ezzel a magánszférát védő, meglehetősen bonyolult tényállási rendszert létrehozva [37].

Az új „drónjogszabályok" megjelenésével alapjaiban változnak meg a pilóta nélküli légi jármű használati lehetőségei, az európai uniós jogszabályok csupán egy általánosan követendő keretrendszert határoznak meg a tagállamok számára, amelytől adott esetekben eltérhetnek, és szigorúbb szabályokat alkothatnak meg. Magyarország élt ezzel a lehetőséggel, és számos területen szigorítást hajtott végre, amely jogalkalmazási megoldás egyben előremutató is, hiszen várható, hogy a jövőben olyan EU-s szabályozási megoldások fognak napvilágra kerülni, amelyek sok esetben a magyarhoz hasonló működési megoldásokat igényelnek (például az eszközregisztrációs kötelezettség vagy a vizsgáztatás rendszere) [38, pp. 35–36].

Felhasznált irodalom

[1] Emberi Jogok Európai Egyezménye
[2] Buzás P., Révész B., „A drónok alkalmazásának alkotmányos korlátai az Egyesült Államokban," *Pro Publico Bono – Magyar Közigazgatás,* 5. évf. 1. sz. pp. 150–162. 2017. Online: https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/ppbmk/article/view/1872/1162
[3] Restás Á., „A drónok közszolgálati alkalmazásának lehetőségei," *Új Magyar Közigazgatás,* 10. évf. 3. sz. pp. 49–63. 2017. Online: https://kozszov.org.hu/dokumentumok/UMK_2017/3/05_Dronok_a_kozszolgalatban.pdf
[4] 1995. évi XCVII. törvény a légiközlekedésről
[5] A Bizottság (EU) pilóta nélküli légijármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légijármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról szóló 2019/945 számú felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.)
[6] Zsurzsa Zs., „A drónrepüléssel összefüggő magánjogi igények," *Debreceni Jogi Műhely,* 16. évf. 1–2. sz. pp. 87–104. 2019. Online: https://doi.org/10.24169/DJM/2019/1-2/7
[7] Koltay A., „Az „általános személyiségi jog" azonosítása felé. Alkotmányjogi, magánjogi és büntetőjogi vizsgálódás," in *Sajtószabadság és médiajog a 21. század elején 4.,* Koltay A., Török B. szerk., Budapest, Wolters Kluwer, 2017, pp. 267–296. Online: http://real.mtak.hu/98867/1/Koltay-altalanosszemelyisegijog.pdf
[8] Székely L., „A képmáshoz és a hangfelvételhez való jog," in *Nagykommentár a Polgári Törvénykönyvről szóló 2013. évi V. törvényhez,* Gárdos P., Vékás L. szerk., 2023. évi Jogtár-formátumú kiadás, 2023. január 1. időállapotú
[9] 2013. évi V. törvény a Polgári Törvénykönyvről
[10] Gál A., Szomora Zs., „A drónnal történő megfigyelés kriminalizálása, mint a büntetőjogi magánszféravédelem kiterjesztése," *FORVM Acta Juridica et Politica,* 11. évf. 3. sz. pp. 101–108. 2021. Online: http://publicatio.bibl.u-szeged.hu/22807/1/juridpol_forum_011_003_101-108.pdf
[11] 8/1990. (IV. 23.) AB határozat
[12] Benkő L., „Magánszféra kontextusban: technológia, szakpolitika és a szociális élet integritása," *Információs Társadalom,* 18. évf. 2. sz. pp. 124–128. 2018. Online: https://doi.org/10.22503/inftars.XVIII.2018.2.9
[13] Sziklay J., „Az információs jogok történeti gyökerei – a köz- és magánszféra kategóriái alapján," *De Iurisprudentia et Iure Publico,* 4. évf. 1. sz. pp. 1–8. 2010.
[14] Alaptörvény Indoklása
[15] Magyarország Alaptörvénye (2011. április 25.)
[16] 56/1994. (XI. 10.) AB határozat
[17] 32/2013. (XI. 22.) AB határozat
[18] C. D. Raab, „A magánszféra mint biztonsági érték," *Replika,* 2. évf. 3. sz. pp. 81–95. 2017. Online: http://replika.hu/system/files/archivum/replika_103-05_raab.pdf
[19] G. Horsman, „Unmanned Aerial Vehicles: A Preliminary Analysis of Forensic Challenges," *Digital Investigation,* 16. évf. pp. 1–11. 2016. Online: https://doi.org/10.1016/j.diin.2015.11.002
[20] Gál I. L., „A spanyolnátha, a koronavírus és a büntetőjog," *Büntetőjogi Szemle,* 9. évf. 1. sz. pp. 57–64. 2020. Online: https://ujbtk.hu/prof-dr-gal-istvan-laszlo-a-spanyolnatha-a-koronavirus-es-a-buntetojog/

[21] 2020. évi CLXXIX. törvény indokolás a pilóta nélküli légijárművek üzemelésével összefüggő egyes törvények módosításáról szóló 2020. évi CLXXIX. törvényhez
[22] 4/1998. (I. 16.) Korm. rendelet a magyar légtér igénybevételéről
[23] 1/1975. (II. 5.) KPM-BM együttes rendelet a közúti közlekedés szabályairól
[24] Drónozás Európában, 8. rész: lakott terület, eseti légtér és adatvédelem. *Indóház Online,* 2021. április 18. Online: https://iho.hu/hirek/dronozas-europaban-8-resz-lakott-terulet-eseti-legter-es-adatvedelem
[25] 1995. évi LVII. törvény a vízgazdálkodásról
[26] 43/2010. (IV. 3.) FVM rendelet a növényvédelmi tevékenységről
[27] 44/2005. (V. 6.) FVM-GKM-KvVM együttes rendelet a mező- és erdőgazdasági légi munkavégzésről
[28] Sándor Zs., Pusztai M., „A „lakott terület" és kapcsolódó fogalmak jelentősége a pilóta nélküli légi járművek alkalmazásában," *Repüléstudományi Közlemények,* 34. évf. 1. sz. pp. 165–179. 2022. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2022.1.10
[29] 321/2012. (XI. 16.) Korm. rendelet a területszervezési eljárásról
[30] Lakott terület/Urban Area – mit takar drónos szemmel e fogalom? *Go2fly,* 2022. február 11. Online: https://go2fly.hu/lakott-terulet-urban-area-mit-takar-dronos-szemmel-e-fogalom/
[31] Molnár G. M., „Tiltott adatszerzés és az információs rendszer elleni bűncselekmények," in *Büntetőjog II. Különös Rész,* Belovics E., Molnár G. M., Sinku P. szerk., Budapest, HVG-ORAC, 2021, pp. 993–1013.
[32] Cserép A., Fábián A., Rózsás E., *Nagykommentár a szabálysértésekről, a szabálysértési eljárásról és a szabálysértési nyilvántartási rendszerről szóló 2012. évi II. törvényhez.* 2022. november 1. időállapotú, 2023. évi Jogtár-formátumú kiadás
[33] Szabálysértési törvény Indokolása
[34] Karsai K., „XLIII. Fejezet," in *Nagykommentár a Büntető Törvénykönyvről szóló 2012. évi C. törvényhez,* Karsai K. szerk., Budapest, Wolters Kluwer, 2020, Jogtár-formátumú kiadás, A kommentár utolsó időállapota: 2021. március 1.
[35] A Büntető Törvénykönyv Indokolása
[36] Hankó V., „A drónokkal kapcsolatos kockázatok és kezelési lehetőségeik," *Hadmérnök,* 16. évf. 3. sz. pp. 189–202. 2021. Online: https://doi.org/10.32567/hm.2021.3.11
[37] Szomora Zs., Személyiségvédő drónlövöldözések a szabálysértési és a büntetőjogban. *Jogászegylet,* 2021. február 16. Online: https://jogaszegylet.hu/jogelet/szemelyisegvedo-drontenyallasok-a-szabalysertesi-es-a-buntetojogban/
[38] Sándor Zs., Pusztai M., „A hazai pilóta nélküli légijármű-rendszerekre vonatkozó szabályozás EU-s jogszabályoktól való eltéréseinek bemutatása," *Repüléstudományi Közlemények,* 33. évf. 1. sz. pp. 27–37. 2021. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.3

Protection of the Private Sphere in the Use of Unmanned Aircraft

As a result of technological progress and the growing trend of digitalisation, the protection of an individual's privacy is facing new challenges to which regulation also needs to respond. The use of unmanned aircraft is spreading very dynamically, but widespread use raises a number of issues affecting the private sphere and the right to informational self-determination. In connection with the use of drones, the protection of privacy can not only be traced back to the Fundamental Law of Hungary, but also a criminal liability structure is attached to it.

Keywords: *unmanned aircraft, private sphere, drone*

Ripszám Dóra
fiatal büntetőjogász képviselő
Nemzetközi Büntetőjogi Társaság Magyar Nemzeti Csoport
doktori hallgató
Pécsi Tudományegyetem
Állam- és Jogtudományi Kar
Büntetőjogi Tanszék
ripszam.dora@pte.hu
orcid.org/0009-0002-9948-4852

Dóra Ripszám
President of Young Penalists AIDP
Hungarian National Group
PhD student
University of Pécs
Faculty of Law
Department of Criminal Law
ripszam.dora@pte.hu
orcid.org/0009-0002-9948-4852

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 59–69. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.5

Schuster György

A fejlesztésben használt szoftvermodellek alkalmazása és minősítése

A feladatok komplexitásának növekedésével a fejlesztőknek különböző eszközöket kell használni. Erről egy előző publikációban már részletesen beszéltünk. Ebben a cikkben egy speciális területet érintünk, amely napjainkban egyre inkább előtérbe kerül, ez a modellek alkalmazásának kérdése. A modellek alkalmazása biztonságkritikus rendszerekben azonban felveti a modellek megbízhatóságának kérdését, illetve ezeknek a szoftvereszközöknek a minősítési kérdéseit.

Kulcsszavak: *modellalapú fejlesztés, modellek minősítése*

1. Bevezetés

A modern eszközök összetettsége már olyan szintű, hogy klasszikus tervezési és konstrukciós szempontból áttekinthetetlenek. A tesztelés szempontjából is fontosak a modellek, mivel fizikai eszköz nélkül tudunk ellenőrizni különböző szoftverelemeket, illetve a teljes szoftverrendszer működését. Ez mind a fejlesztési időben, mind költség szempontjából kedvező.

A modellalapú fejlesztés olyan módszer, amely a szoftverfejlesztés során a számítógépes modellek használatát jelenti, vagy egy adott specifikus területen, vagy egy teljes rendszert tekintve.

A modell egy rendszer adott szempontkészletének, esetlegesen fizikai felépítésének és működésének absztrakt reprezentációja, amelyet elemzéshez, verifikációhoz, szimulációhoz, kódgeneráláshoz vagy bármely más, a rendszerrel kapcsolatos tevékenységhez használhatunk.

Ha a fejlesztés célja egy biztonságkritikus rendszer létrehozása, akkor a felhasznált modelleknek pontosaknak, megbízhatóknak kell lenniük, és megfelelő minősítéssel kell rendelkezniük.

A minősített modellező eszközök használata, amelyek automatikusan generálnak kódot, sőt bizonyos esetekben automatikusan generálnak tesztvektorokat, egy viszonylagosan új paradigmaváltás a járműfedélzeti szoftverek gyártásában.

A modellek alkalmazása hatalmas előnyökkel jár, illetőleg járhat, de nem mentes a kockázatoktól sem.

Ebben a cikkben a modellalapú fejlesztés előnyeit és hátrányait egyaránt megvizsgáljuk mind a biztonság, mind tanúsítás szempontjából.

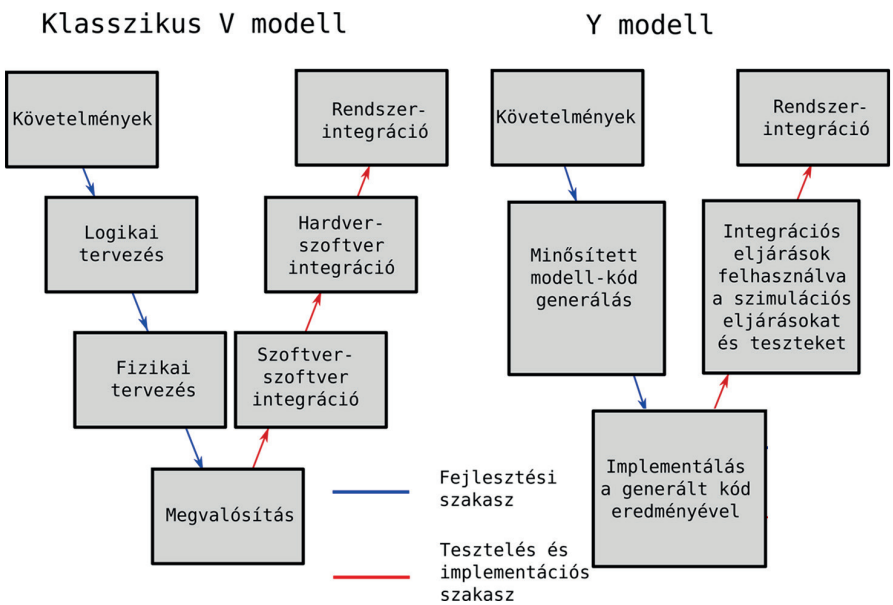
Ezenkívül rövid áttekintést nyújtunk a DO-331-ről, mint a DO-178C és DO-178A szabványok modellalapú fejlesztési és ellenőrzési kiegészítéséről.

2. A modellalapú fejlesztés szintjei, előnyei és problémái

A modellalapú fejlesztésnek és ellenőrzésnek számos lehetséges előnye van. Az előnyök kihasználásának képessége a megvalósítás részleteitől függ. Ezek az előnyök a következők.

2.1. A modellalapú fejlesztés előnyei

1. Áttérhetünk V életciklusmodellről Y életciklusmodellre.



1. ábra
Egyszerűsített V és Y életciklusmodellek [a szerző]

A modellalapú fejlesztés egyik fő motivátora a hagyományos V életciklusról Y életciklusra való átállás képessége, amely csökkenti a fejlesztési időt, költséget és esetleg még az emberi hibákat is.

A rendszerkövetelményekre való összpontosítással és az automatizálással az életciklus lerövidülhet. Egyes becslések 20%-os csökkenést mutatnak minősítetlen kódgenerátor használata esetén, és akár 50%-os csökkenést minősített kódgenerátor használatakor.

Számos módja van a modellek bevezetésének a termék életciklusába. Előállíthatók a rendszer szintjén, a szoftverkövetelmények szintjén és a szoftvertervezés szintjén. A legtöbb vállalat megpróbál egy platformfüggetlen szintű modellt létrehozni, így azt hordozhatóbbá teszi. A platformspecifikus részletek az alacsonyabb szintű modellben is megjeleníthetők.

2. Nagyobb összpontosítás a követelményekre.
Ismert, hogy a követelményekkel kapcsolatos hibák gyakran a funkcionális szoftverhibák okai. Ismert tény az is, hogy minél később találják meg a követelményhibát, annál költségesebb annak javítása.

Ha egy modell a követelményeket reprezentálja, akkor a követelmények rögzítése során tisztább képet ad a rendszerről és a szoftver működéséről, mint a szokásos szöveges követelményleírások.

Ebben nagy segítséget nyújtanak a grafikus tervezőeszközök, különösen azok, amelyek automatikus verifikációt is biztosítanak. Így könnyebb az aktuális részletekre összpontosítani, és nem veszünk el az adott szinten még lényegtelen részletekbe.

Ha mégis fellépne valami hiba a tervezés során, akkor a hiba gyökerének feltárása is hatékonyabb lehet.

3. A korai ellenőrzés lehetősége.
Ha minősített modell-kód eszközöket használnak, a hangsúly a kódról a modellre tolódik át. A modellszimuláció és az automatikus teszteset-generátorok használata elősegíti a korai ellenőrzést, lehetővé téve a követelmények magasabb érettségi szintjét és az esetleges hibák felismerését.

Az ellenőrzés gyakran a szoftverfejlesztési erőforrások 50–70%-át veszi igénybe, a hibák korábbi észlelése és az emberi ellenőrzési munka csökkentése a projekt költségvetése és ütemezése szempontjából előnyös lehet.

4. A szükségtelen redundancia kiküszöbölése.
A hagyományos szoftverfejlesztés három követelményszintet alkalmaz:
   - a szoftverhez rendelt rendszerkövetelmények;
   - magas szintű szoftverkövetelmények[1] és
   - alacsony szintű szoftverkövetelmények[2].

A követelmény rögzítési módjától függően jelentős redundancia léphet fel e szintek között. Ez a szinte elkerülhetetlen változtatások során következetlenségekhez vezethet.

A minősített modellezőeszközök használata csökkentheti ezeket a redundanciákat és következetlenségeket. Ha a modelleknek több szintje is van, akkor könnyen jelentős mennyiségű redundancia, illetve következetlenségek is előfordulhatnak.

Ezért a többi említett előnyhöz hasonlóan ez is az alkalmazott megközelítéstől függ.

5. A követelmények jobb érthetősége.
Az eszközök olyan modelleket állítanak elő, amelyek könnyebben érthetők, mint a szöveges követelmények. Ezért elősegíthetik a nagyobb pontosságot, következetességet és teljességet. A modellek intuitívabbak lehetnek, mint a szöveges követelmények, így könnyebben észlelhetők a hibák és a tervezett viselkedés hiányosságai.

Azonban tapasztalatunk szerint nem minden modellezőeszköz hoz létre könnyen érthető modelleket, és néhány generált modell meglehetősen zavaró lehet. A modellezőeszközöket ezért körültekintően kell kiválasztani.

[1] High-level Requirements, HLR.
[2] Low-level Requirements, LLR.

Egy jó modellezési szabvány, illetőleg előírás elengedhetetlen annak biztosításához, hogy minden fejlesztő megfelelően használja a modelljelöléseket, szimbólumokat és eszközöket.

6. Jobb interakció az ügyfelekkel.
A modellek vizuálisabb természete miatt hasznosak lehetnek az ügyfelek és a tervezők véleményének megszerzésében. Javíthatja a kommunikációt.

7. A növekvő eszköztámogatás.
Léteznek eszközök a kódgenerátorok kimenetének ellenőrzésére. Ha az egyik eszközbe vetett bizalom nem teljes, akkor számos esetben lehetséges eltérő eszköz használata.
Egyes kritikusabb rendszerek – például járműirányítás – esetében ez akkor is ajánlott és hasznos módszer lehet, ha megbízunk az eszközökben, ezzel csökkenthető a bizonytalanság és növelhető az eszközbe vetett bizalom.

8. A formális módszerek fejlesztése.
A modellezési technológia alkalmazása, az eszköztámogatás és a formális módszerek konvergenciája jelentősen növelheti a modellalapú fejlesztés és ellenőrzés előnyeit.
Ha egy modellező eszközkészlet – beleértve a kódgenerátort is – helyességét formálisan ellenőrzik, várhatóan az eszköz megbízhatóan teljesíti a kívánt funkciót.
Formális ellenőrzés nélkül mindig felmerül az a kellemetlen érzés, hogy a modellezőeszköz vagy a mögöttes kódgenerátor hibát vihet be a fejlesztési folyamatba.

2.2. A modellalapú fejlesztés problémái

Mint minden technológia esetében, a modellalapú fejlesztés és ellenőrzés használatakor számos lehetséges probléma és kihívás adódhat. Ezek közül néhányat itt megemlítünk.

1. A többszörös követelmény felülvizsgálatának figyelmen kívül hagyása.
Amikor a modelleket automatikus kódgenerálással valósítják meg, a követelmények hagyományos ellenőrzésének egy része elveszhet, különösen, ha a modellt rendszerszinten vezetik be.
A hagyományos szoftverfejlesztés során áttekintik a rendszerkövetelményeket, a szoftverkövetelményeket, a tervezést és a kódot. Ezen túlmenően, mivel minden egyes követelményszintet elemeznek az alacsonyabb szint létrehozásához, a problémákat azonosítják és megoldják. Például a kódot ellenőrző személy ellentmondást találhat a követelményekkel.
Tapasztalt szakemberek, akik kódot terveznek, fejlesztenek vagy teszteseteket határoznak meg, biztosítják a szoftverrendszer informális validálását. Miközben ezek a mérnökök megvizsgálják az adatokat, hibákat észlelnek, és biztosítani tudják a megfelelő korrekciós intézkedéseket. Ha azonban a modellt magasabb szintre emelik, és a megvalósítási folyamatot eszközök kezelik, akkor ez a „biztosíték" csökkenhet, esetleg teljesen elvész, mert a tervezők túlságosan távol kerülnek a kódtól.

2. A rendszermérnöki szerepkör bővítése.
Előfordulhat, hogy a rendszermérnökök nem ismerik a követelmények lefedettségének, a robusztussági tesztelésnek, a modell lefedettségelemzésének adott fogalomkörét. Ezt tapasztalataink alátámasztják. A probléma megoldása érdekében célszerű a rendszermérnöki csapatot tapasztalt szoftvermérnökökből álló szakértői csapattal kiegészíteni.

3. A nyomon követhetőség nehézkes.
Habár a követelmények grafikusan modellként jelennek meg, akkor is követniük kell a magasabb és alacsonyabb szintű követelményeket.

A magasabb szintre és az alsó szintre vezető útvonalaknak kétirányúnak kell lenniük. Egyes modellezőeszközök sajnos nem támogatják megfelelően a követhetőséget. A szöveges követelmények és a modellalapú követelmények megfeleltetése komoly kihívás lehet.

4. A teszt teljességével kapcsolatos nehézségek.
A modell jellemzőitől és a tesztcsoport tapasztalataitól függően nehéz biztosítani, hogy a modell által reprezentált követelmények teljes mértékben igazolhatók legyenek.

Az összetett modellek teljes körű ellenőrzése különösen nagy kihívást jelenthet. Részletes tesztelési irányelvekre van szükség annak biztosításához, hogy a követelményeken alapuló tesztek teljes mértékben igazolják a modellt.

5. A szimulációs eljárások hitelességének kérdése.
A modellalapú fejlesztés és ellenőrzés egyik mozgatórugója a szimulációs eszközök használatának lehetősége a hibák mielőbbi azonosítása érdekében.

A DO-331 megpróbálja tisztázni, hogy mi várható és mi megengedett a szimulációhoz. A DO-331 bevezetése előtt egyedi eljárások folytak a tanúsító hatóságokkal, és természetesen a DO-331 alkalmazása esetében is szoros együttműködésre van szükség velük.

6. A modellek gyakran keverik, a „mit" és a „hogyan"-t.
Mivel a modellek gyakran tartalmaznak részleteket a megvalósításról, néha nehéz lehet felismerni, mit csinál a modell.

Alapvetően a tervezés és a követelmények keveredhetnek. Ez gyakran probléma a hagyományos fejlesztésben is. Sajnos a modellek alkalmazásának esetén ez gyakran előfordul. Ezért a DO-331 erre a problémára előírásokat tartalmaz.

7. A specifikációs modellek elkülönítése a tervezési modellektől.
A DO-331 útmutatást ad a specifikációs modellekhez és a tervezési modellekhez. Az útmutató egyértelműen kimondja, hogy a modellek nem kombinálhatók.

A valóságban nehéznek bizonyulhat a specifikáció és a tervezési modellek megkülönböztetése, különösen akkor, ha a már meglévő modelleket használják. A modellek többsége bizonyos fokig ezeket összevonja, ami valamilyen mértékben hasznos lehet, de néha zavaró.

Ezenkívül a legtöbb modellezési technika ösztönzi a tervezési részletek, például egyenletek és algoritmusok beépítését. Nagyrészt ezért is használjuk a modelleket, de ez inkább a kódolási szakaszban hasznos.

A specifikációs modellek és a tervezési modellek elkülönítése a legtöbb szervezet számára jelentős paradigmaváltást igényel.

8. A rendszer- és a szoftverszerepek összemosása.
Attól függően, hogy a modellt hol vezetik be, előfordulhat, hogy egy rendszert tervezők a hagyományos eljárásnál jobban részt vesznek az alacsonyabb szintű tervezésben, a szoftvertervezők pedig a hagyományosnál jobban belefolynak a magasabb szintű tevékenységekbe.

Ha ezt a megfelelő módon teszik, akkor előnyös lehet a rendszermérnökök és a szoftvermérnökök közötti együttműködés szorosabb kialakításában.

9. A hagyományos és a modellalapú fejlesztést ötvöző kihívások.
A legtöbb fejlesztési projektben a modelleken kívül hagyományos tervezési módszereket is alkalmazni kell. Ez igaz a kódgenerátorok esetén is.

Elkerülendő a későbbi problémákat a hagyományos és a modellalapú fejlesztés alkalmazásának területein, gondosan meg kell határozni a határterületeteket azért, hogy a fejlesztés következetes legyen, ne maradjon ki semmi, és kerüljük az átfedéseket.

Hasonlóképpen, a DO-178C és a DO-331 szabványokat egyaránt használni kell a hagyományos (DO-178C) és a modellalapú (DO-331) fejlesztési tevékenységben.

A tervezés során egyértelműen meg kell határozniuk a módszerek alkalmazásának területeit és integrálásuk módját.

10. Inkonzisztens modellértelmezés.
Ha a modellalkalmazás fogalomrendszere nem jól definiált és helyesen implementált, az a modell hibás, nem következetes értelmezéséhez és alkalmazásához vezethet.

A jól definiált modellezési szabványok és azok szigorú betartása nagy valószínűséggel megoldja ezt a problémát.

11. A modell karbantartása.
Megfelelő dokumentáció nélkül előfordulhat, hogy a modellek nem karbantarthatók. Egy modell alkalmazása, karbantartása és tanúsítása nem lehet személyhez kötött.

A modell minden szempontból dokumentált kell hogy legyen.

12. Az automatikus tesztgenerálás problémája.
Egyes modellezőeszközök nemcsak kódot generálnak automatikusan, hanem teszteket is. Ez előnyös az informális ellenőrzés és a modellbe vetett bizalom kialakítása szempontjából. Ha azonban egy projekt automatikusan generál teszteket és a fejlesztő ezt a tanúsításra is használni akarja, az számos problémát okozhat.

Ha a modell hibás, előfordulhat, hogy a hiba nem észlelhető időben. A géppel generált tesztek nem biztos, hogy egyes területeken olyan hatékonyak, mint az emberi tesztelők. Viszont sokban segítik a tesztelés folyamatát.

Az automatikusan generált tesztek használatakor biztosítani kell a megfelelő függetlenséget. Ez azt jelenti, hogy adott szoftverszintekhez a tesztgenerátort és a kódgenerátort egymástól függetlenül kell fejleszteni.

13. Az eszköz instabilitása.
A modellalapú fejlesztés és az eszközök ellenőrzése miatt az eszközök instabilitása problémás lehet. Az „éretlen" eszközök gyakran változhatnak, ami a modellek változtatását

és újbóli ellenőrzésének szükségességét eredményezheti. Egy eszköz változásának hatása különböző mértékű hatással lehet a rendszerre, különösen biztonságkritikus területen.

14. A modellezés korlátai.
Nem minden rendszer alkalmas a modellezésre. A modellalapú fejlesztés és ellenőrzés nem minden projekt vagy szervezet számára megfelelő megközelítés. Számos állítás ellenére nem minden esetben ez a végső megoldás.

3. A DO-331 szabvány áttekintése

A DO-331 szabvány a DO-178C és DO-178A szabványok modellalapú fejlesztési és ellenőrzési kiegészítése volt. Ezt az RTCA 205. számú Különbizottság (SC-205) és az EUROCAE munkacsoportja fejlesztette ki [10].

A DO-331 útmutatás igyekszik rugalmasságot biztosítani a modell megvalósításához, ugyanakkor biztosítja, hogy a modell segítségével generált szoftver a rendeltetésszerű működését és csak azt teljesítse. A DO-331 is a DO-178C-ből indul ki, és szükség szerint módosítja, helyettesíti vagy hozzáadja a DO-178C-hez a szükséges célokat, tevékenységeket és útmutatást [12].

A DO-331 felismeri, hogy az adott modell rendszerkövetelményként, szoftverkövetelményként vagy szoftvereszközként kerülhet be a szoftver életciklusába. Azt is figyelembe veszi, hogy a modellabsztrakciónak több szintje is lehet.

A DO-331 kétféle modellt határoz meg [10]:

1. a specifikációs modell magas szintű követelményeket képvisel, ezek:
   - funkcionális követelmények;
   - teljesítménykövetelmények;
   - interfészkövetelmények;
   - biztonsági követelmények.

   A specifikációs modellnek ezeket egyértelműen ki kell fejeznie.

   A specifikációs modellek nem határozhatnak meg olyan szoftvertervezési részleteket, mint adatszerkezetek és algoritmusok. Tehát csak és kizárólag a magas szintű követelményekkel foglalkozhatnak.

2. a tervezési modell alacsony szintű követelményeket és architekturális kérdéseket tartalmaz [3].

Ha egy modell szoftvertervezési adatokat fejez ki, függetlenül az egyéb tartalomtól, akkor azt tervezési modellnek kell minősíteni.

A DO-331 megtartja a DO-178C útmutatásainak nagy részét, de hozzáad néhány modellspecifikus információt. Általánosságban elmondható, hogy a DO-178C-ben szereplő, a magas szintű követelményekre vonatkozó útmutatások többsége a specifikációs modellekre vonatkozik, a szoftvertervezési útmutató pedig a tervezési modellekre [4].

A DO-331 és a DO-178C közötti legjelentősebb különbségeket az alábbiakban foglaljuk össze. Ezek azok a területek, ahol a DO-331 módosítja vagy pontosítja (azaz kiegészíti) a DO-178C-t a modellalapú fejlesztés és ellenőrzés során [2]. Ezek az alábbiak.

1. Modelltervezés.
   A tervezési szakaszban a terveknek tisztázni kell a modellezés alkalmazási körét és azt, hogy az hogyan illeszkedik a szoftver életciklusába. Továbbá a terveknek meg kell határozni, hogy az egyes modellek milyen szoftveréletciklus-szinteket képviselnek, milyen modellszabványokat fognak használni, és a tervezett ellenőrzési megközelítést. Ha szimulációt használnak a minősítéshez, a terveknek egyértelműen részletezniük kell azt a pontos megközelítést, hogy milyen minősítési szempont szerint végzik ezt. A tervezési szakasznak meg kell határoznia a modell szimulációs környezetét is, beleértve a módszereket, eszközöket, eljárásokat és működési környezetet.

2. Modellszabványok.
   Minden használt modelltípusnak rendelkeznie kell megfelelő szabványokkal, amelyek meghatározzák és ismertetik a modellezési technikákat, megszorításokat és eljárásokat. A DO-331 szerint minden szabványnak a következő minimális információkat kell tartalmaznia [10]:
   - az alkalmazandó módszerek és eszközök ismertetése és használatuk indoklása;
   - a használandó modellezési eszköz jellemzőinek szintaktikai, szemantikai ismertetése;
   - a bonyolultsági korlátozások, amelyek lehetővé teszik, hogy a modellezési megközelítés és annak megvalósítása egyértelmű, determinisztikus legyen és megfeleljen a DO-331 célkitűzéseinek;
   - a bonyolultsági korlátozások különösen fontosak. Általában korlátozni kell a modell mélységét (beágyazási szintek), a strukturális rétegek számát [1];
   - a megszorítások felsorolása és ismertetése a modellezőeszközök és a támogató könyvtárak megfelelő használatának biztosítására [10];
   - a követelményrétegek közötti kétirányú nyomon követhetőség létrehozása, a származtatott követelmények azonosítása, az összes származtatott követelmény indoklásának dokumentálása.

3. Modellkönyvtárak.
   A legtöbb modellező eszközben széles körben használják a könyvtárakat. Például a modell grafikus ábrázolására használt szimbólumok egy szimbólumkönyvtárból származnak. Minden egyes modellben használható könyvtárelemnek biztosítani kell a megfelelő szoftverszintet a DO-178C szerint. Alapvetően a könyvtári elemekhez szükség van tervekre, fejlesztési szabványokra, követelményekre, tervezésre, kódra, ellenőrzési esetekre és eljárásokra, mint minden más biztonságkritikus szoftverre. Ha vannak olyan elemek a könyvtárban, amelyek nem rendelkeznek megfelelő szintű bizonyossággal, akkor azokat nem szabad használni.

4. Modell-lefedettség elemzése tervezési modellekhez.
   A DO-331 a következőképpen határozza meg a modell-lefedettség elemzését: olyan elemzés, amely meghatározza, hogy a tervezési modell által kifejezett követelmények mely követelményeket nem érvényesítették a tervezési modell kidolgozásának követelményei alapján való ellenőrzéssel. Ennek az elemzésnek az a célja, hogy támogassa a nem szándékolt funkció észlelését a tervezési modellben, ahol a modell kifejlesztésének követelményeit a verifikációs esetekkel sikerült lefedni [6].

5. Modellszimuláció.
A DO-331 szószedet a következőképpen határozza meg a modellszimulációt és a modellszimulátort [9].

Definíció: a modellszimuláció: a modell viselkedésének megvalósítása.

Definíció: a modellszimulátor: olyan eszköz, számítógépes program vagy rendszer, amely lehetővé teszi egy modell végrehajtását, hogy demonstrálja annak viselkedését az ellenőrzés, illetve a tanúsítás támogatása érdekében.

Megjegyzés: A modellszimulátor célja az, hogy végrehajthasson egy olyan kódot, amely a végleges tárgykódot reprezentálja.

A DO-331 konkrét útmutatást ad a modellszimulációhoz. Modellszimuláció használható a DO-331 ellenőrzési, felügyeleti és tesztelési célkitűzéseinek támogatására, illetőleg teljesítésére. Ha szimulációs eseteket és eljárásokat használunk a formális ellenőrzési jóváíráshoz, a szimulációs esetek és eljárások helyességét ellenőrizni kell, a szimuláció eredményeit szintén ellenőrizni kell, és értékelni kell az esetleges eltéréseket.

4. Alkalmazási példák

Számos példa van a járműfejlesztésben a modellalkalmazásra. Ezeknek a felsorolására nincs lehetőség, ezért, a teljesség igénye nélkül, az A380 fejlesztésében alkalmazott modelleket említjük. Ezek az alábbiak [10]:

- repülésvezérlési rendszerek;
- robotpilóta;
- felügyelő és figyelmeztető rendszerek;
- a pilótafülke-kijelző rendszerei;
- üzemanyag-gazdálkodás rendszerei;
- kormányvezérlés;
- terhelésirányítás.

A tesztelésben alkalmazott eljárások közül leginkább a „software in the loop" és a „hardware in the loop" eljárásokat érdemes megemlíteni, ahol az elsőben még a hardvert is modellezzük a rendszer mellett, a másodikban a már kész hardvert szoftverrel együtt, a kapcsolódó rendszer modelljével vizsgáljuk [5], [9].

5. Összefoglaló

Az avionikai szoftverfejlesztés egyik legfontosabb és legmeghatározóbb szabványa a DO-178C, amely előírja az érintett fejlesztőknek a szoftverfejlesztés során követendő szigorú szabályokat. A DO-178C kiegészítői további iránymutatásokat adnak a szabvány alkalmazásához bizonyos területeken [10].

Az egyik ilyen kiegészítő a DO-331, amely a Model-Based Development and Verification Supplement (MBDVS) címet viseli. A DO-331 a modellalapú fejlesztési és verifikációs módszerek alkalmazását szabályozza, és azt írja elő, hogy a fejlesztőknek a szoftvertervezés során

alkalmazniuk kell a modellezési módszereket, valamint a modellekből kiinduló verifikációs tevékenységeket.

A DO-331-et azonban nehéz alkalmazni, különösen akkor, ha a fejlesztők már meglévő modelleket szeretnének felhasználni a szabvány szerinti fejlesztéshez és verifikációhoz. Az ilyen modellek esetében nehéz lehet meghatározni, hogy milyen mértékben kell alkalmazni a modellezési és verifikációs előírásokat, és hogyan kell összehangolni a meglévő modelleket a DO-178C követelményeivel [7], [8].

Az ilyen kihívások miatt a DO-331 alkalmazása nagyobb szaktudást és erőforrásokat igényelhet, és a fejlesztőknek előzetesen meg kell vizsgálniuk a meglévő modellek alkalmazhatóságát és azok összhangját a DO-178C szabvánnyal. Emellett ajánlott, hogy a fejlesztők konzultáljanak szakértőkkel vagy tanácsadókkal a DO-331 alkalmazásával kapcsolatban, és a modellezési és verifikációs előírásokat a lehető legjobban illesszék a meglévő modellekhez.

Összességében, bár a DO-331 fontos előírásokat tartalmaz a modellezési és verifikációs tevékenységekhez, kihívást jelenthet a már meglévő modellek esetében, és a fejlesztőknek alaposan fel kell készülniük az alkalmazására.

A modellek alkalmazása azonban elvitathatatlan előnyökkel rendelkezik, ha a cikkben leírt szempontokat figyelembe vesszük, és ha a modellek alkalmazását a helyén kezeljük, a fejlesztési és a verifikációs folyamat gyorsabb és hatékonyabb lehet, mint a klasszikus módszerek alkalmazása [11].

Felhasznált irodalom

[1] Hardware in the Loop. *Blackberry/QNX,* [é. n.]. Online: https://blackberry.qnx.com/en/ultimate-guides/cloud-computing/hardware-in-loop

[2] Model Based Design Overview for System Development. *Collimator,* 2022. november 11. Online: www.collimator.ai/post/model-based-development

[3] Hardware-in-the-Loop for embedded system developers. Compact and fast for earlier testing. *Protos,* [é. n.]. Online: www.protos.de/en/products/minihil/

[4] Sz. n., *Model based software architectures.* [é. n.]. Online: www.pvpsiddhartha.ac.in/dep_it/lecture%20notes/SPM/unit3.pdf

[5] Basics of Hardware-in-the-Loop simulation. *Mathworks,* [é. n.]. Online: www.mathworks.com/help/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html

[6] M. Woodside, et al., „Transformation Challenges: From Software Models to Performance Models," *Software & Systems Modeling,* 13. évf. 4. sz. pp. 1529–1552. 2014. Online: https://doi.org/10.1007/s10270-013-0385-x

[7] A. R. Puerta, „A Model-based Interface Development Environment," *IEEE Software,* 14. évf. 4. sz. pp. 40–47. 1997. Online: https://doi.org/10.1109/52.595902

[8] Wikipedia, *Model-based Design.* [é. n.]. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Model-based_design

[9] dSPACE Group, Linux-Based V-ECUs in Software-in-the-Loop. *YouTube,* 2022. Online: www.youtube.com/watch?v = PheVfABN2B8

[10] L. Rierson, *Developing Safety-critical Software. A Practical Guide for Aviation Software and DO-178C Compliance.* Boca Raton, CRC Press, 2013.

[11] K. Schmiechen et al., „A Requirements Management Template in Polarion for Model-Based Development of Airborne Systems," in *Software Engineering 2021 Satellite Events, Lecture Notes in Informatics (LNI),* S. Götz et al. szerk., Bonn, Gesellschaft für Informatik, 2021. Online: www.researchgate.net/publication/358646267
[12] V. Hilderman, DO-331 Introduction – Model Based Development. *AFuzion,* 2014. Online: https://afuzion.com/do-331-introduction-model-based-development/

Application and Qualification of Software Models Used in Development

As the complexity of tasks increases, developers have to use different tools. We also talked about this in detail in a previous publication. In this article, we will discuss a special area that is increasingly coming nowadays, which is the application of models. However, their application in safety-critical systems development raises the question of the reliability of the applied models and the questions of the certification of these special software tools.

Keywords: *model-based development, model certification*

Dr. Schuster György
docens
Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék
schuster.györgy@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8573-3670

György Schuster, PhD
Associate Professor
Óbuda University
Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Electronic and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation
schuster.györgy@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8573-3670

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 71–80. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.6

Schuster György

Idősorok alkalmazása szoftvermegbízhatóság előrejelzésére

A biztonságkritikus szoftverek fejlesztése kulcsfontosságú. Ez kifejezetten hangsúlyos olyan területeken, ahol a feladatok nagy része, vagy teljes egésze szoftverekre van bízva. Az ilyen szoftverek hibái komoly következményekkel járhatnak, ideértve az életveszélyes helyzeteket, a gazdasági károkat és egyéb komoly problémákat. Ebbe a kategóriába tartoznak a a hagyományos és autonóm járművek fedélzeti szoftverei, az űrkutatás autonóm eszközeinek, speciális ipari eszközöknek és fegyverrendszereknek a szoftverei is.
A megrendelő számára komoly kihívás a szoftver gyártójának kiválasztása. Mivel a szoftverek esetén a klasszikus gyártási folyamatok vizsgálati módszereit nem tudjuk alkalmazni, ezért a gyártót kell megvizsgálnunk. Az teljesen egyértelmű, hogy egy adott gyártónak megfelelő minősítésekkel kell rendelkeznie. De mi a helyzet akkor, ha több azonos minősítésű gyártó áll rendelkezésre, és ezek közül kell választani?
Ebben a cikkben javaslunk egy módszert, amellyel a gyártók megfelelő megszorítások melletti általános fejlesztési tevékenységét vizsgáljuk, az elkövetett működési és fejlesztési hibák alapján, ezeket idősorokba rendezve. A cikkben ismertetjük a módszert, annak előnyeit, korlátait, alkalmazásának akadályait és egy nem várt következményt az oktatásban.

Kulcsszavak: *szoftverminőség-becslés, idősorok*

1. Bevezetés

A szoftver kritikus sikertényező. Egyre több feladatot bízunk rájuk. Ezek nagy része biztonságkritikus. Sokszor ez azt is jelentheti, hogy meghibásodás esetén emberi beavatkozásnak nincs lehetősége, vagy a beavatkozás lassú, esetleg rendkívül kockázatos.

Vegyünk például egy fly-by-wire repülésirányító rendszert. Egy szoftvermeghibásodás akár katasztrofális következményekkel is járhat, itt azonnali javításra nincs lehetőség, és az emberi beavatkozás is erősen korlátozott, esetleg az időkorlátok miatt. Ha például egy instabil repülőszerkezetben következik be irányítási hiba, a személyzet esetleg cselekvésképtelenné válhat a fellépő túlterhelés miatt.

Másik példánk legyen egy űrszonda. Ha programhiba lép fel kritikus helyzetben, ez az eszköz elvesztését is jelentheti. Ha ez nem kritikus helyzetben következik be, akkor esetleg a hiba javítható, de sok időbe kerül, és a beavatkozás igen kockázatos.

A klasszikus gépészeti és villamos gyártásban vannak megfelelő statisztikai módszerek, amelyekkel a gyártás folyamata minősíthető. Ezt sajnos a szoftverfejlesztésben elég nehezen tudjuk biztosítani. A szoftvercégek természetesen rendelkeznek megfelelő minősítésekkel, megfelelő módszertannal, eljárásrenddel. Ez a CMM[1] besorolási rendben legalább a meghatározott szintet jelenti [3].

Ez mind segíthet, de a folyamat végén ott van az ember, aki a fejlesztés kulcstényezője. Sajnos az ember mint fejlesztő okos, tapasztalt, intuitív és kreatív, és ugyanilyen mint hibaforrás. Ami előny, az egyszerre hátrány is.

2. Besorolási szintek

Keressük azokat a statisztikai jellemzőket, amelyek segítenek a fejlesztési folyamat vizsgálatában abból a célból, hogy a még el nem készült szoftvertermék minősége az elvárásoknak megfelelő.

A CMM- és a CMMI-besorolások[2] ugyan bizonyos mértékig információt szolgáltatnak az adott gyártó minősítéséről, ezért ezeket mindenképpen célszerű figyelembe venni.

2.1. CMM-besorolások

A CMM egy olyan modell, amely a szoftvertervezési és -fejlesztési folyamatok érettségének és minőségének értékelésére szolgál. A modell az alábbi öt besorolásból áll [2]:

- kezdeti (kaotikus) szint: a folyamatok nem rendelkeznek standardizált módszerekkel, és nem kiszámíthatók. Az eredmények változók, és az egyén szerepe rendkívül fontos;
- menedzselt szint: a folyamatokat kezelik és ellenőrzik, és azokat a minőségi követelményeknek megfelelően végzik. A folyamatokat és a teljesítményt mérni lehet;
- meghatározott szint: a folyamatok szabványosítottak és dokumentáltak, ami lehetővé teszi a szabványos és következetes végrehajtást. A minőség ellenőrizhető és javítható;
- mennyiségi szempontból menedzselt szint: a folyamatokat mérhető, kvantitatív módon vezetik és ellenőrzik. A folyamatok szorosan kapcsolódnak a gyártói célokhoz és a minőségi követelményekhez;
- optimalizált szint: a folyamatokat mindig optimalizálják a minőség és hatékonyság növelése érdekében. A folyamatokat a legjobb gyakorlatok alapján végzik, és állandóan fejlesztik őket.

2.2. CMMI-besorolások

A CMMI az előző CMM-modell továbbfejlesztett verziója, amely nemcsak a szoftvertervezési és -fejlesztési folyamatok értékelésére, hanem az egész szervezet működésének javítására is szolgál.

[1] Capability Maturity Model.
[2] Capability Maturity Model Integration.

A CMMI hat képességszintet határoz meg, amelyek a szervezetek érettségi szintjét tükrözik a folyamatok végrehajtása és a minőség ellenőrzése szempontjából. Az alábbiakban a hat képességszintet soroljuk fel [2]:

- kezdeti szint;
- menedzselt szint;
- meghatározott szint;
- mennyiségileg menedzselt szint;
- optimalizált szint;
- túlmutató szint: ezt a szintet a CMMI legújabb verziója határozza meg, és azt mutatja, hogy a szervezetek már nemcsak a folyamataikat optimalizálják, hanem azokat a megrendelői igényeknek megfelelően folyamatosan fejlesztik is [2].

Biztonságkritikus fejlesztésben csak az a gyártó jöhet szóba, aki legalább a harmadik szinten van.

3. A vizsgálat módszertana

3.1. Az idősor képzése

Az idősor elemei a fejlesztés és/vagy a rendszer működése közben bekövetkezett hibák számából állnak. A probléma az időszelet meghatározása. A biztonságkritikus fejlesztés számos esetben egyedi fejlesztést jelent, ráadásul az egymást követő projektek eltérő platformon történnek.

A kérdés, hogyan határozzuk meg az időszeletet? Rögtön három probléma merül fel:

- a szoftverek nem futnak állandóan, így azonos platformon is nehéz a követés;
- az eltérő platformok működési sebessége eltérő lehet, így az időalapú összehasonlítás megint nem korrekt;
- az eltérő platformok eltérő fejlesztői környezeteket feltételeznek.

Ezért a következő javaslatot tesszük: az idő kezelése helyett a végrehajtott gépi utasítások számát vegyük alapul.

Az is nyilvánvaló, hogy a gépi utasításkészletek is különbözhetnek, illetve a fordított kódok sem felelnek meg egymásnak különböző platformokon utasításról utasításra. Ezért statisztikai alapon bevezethetünk egy súlyozó tényezőt. Így a végrehajtási számok összehasonlíthatók lesznek. Nem szabad arról sem elfeledkeznünk, hogy egy jó szoftvergyártónál a két programhiba között végrehajtott gépi utasítások száma óriási lehet. Az adatgyűjtés esetén ez nem igazán gond, mert az összehasonlítás után nem „nagyon" dolgozunk ezzel a számmal.

Az általunk javasolt vizsgálat olyan szoftvercsoportokat vizsgál, amelyek közvetlenül a fejlesztést hajtják végre, nem kizárva a tervezési folyamatot. Nem alkalmazható kísérletező, a projektben nem közvetlenül részt vevő kutatói csoportra, illetőleg olyan csoportokra, ahol gyakornokok is írnak olyan programokat, amelyek esetleg bekerülnek a végleges kódba.

Miután meghatároztuk a megfelelő csoportot, a következő statisztikai vizsgálatokat célszerű elvégezni:

- Hurst-analízis;
- autokorrelációs függvény;
- idősorra illesztett regressziós polinom.

A Hurst-analízis, más néven Hurst-exponens analízis, egy matematikai eszköz, amelyet idősorok hosszú távú memóriájának mérésére használnak [1].

Megjegyzés: számos Hurst-exponenst meghatározó módszer létezik [5]. Ezek nagy részét megvizsgáltuk, lényeges eltérést nem találtunk, ezért a legegyszerűbbet választottuk ki.[3]
A Hurst-exponens kiszámításának képlete [6], [7]:

$$\frac{R}{S} = N^H, \Rightarrow log(R/S) = Hlog(H), \Rightarrow H = \frac{log(R/S)}{log(N)} \quad (1)$$

és rövid magyarázata [1]:

A Hurst-exponens H kiszámításához az idősorokat különböző részekre, úgynevezett bokszokra osztják fel, majd minden egyes boxra meghatározzák a boxban található adatok szórását.

Ezután kiszámítják a logaritmusok átlagát és szórását az összes boxra. A Hurst-exponens értéke a logaritmusok szórásának és átlagának az aránya.

A paraméterek [3]:

R – a legnagyobb boxátlag;
S – a legnagyobb boxszórás;
N – a boxok száma;
H – a Hurst-exponens.

Az exponens értéke az idősor trendtartására utal, ha:

$0 \leq H < 05$ az idősor kiszámíthatatlan jellegű,
$H = 05$ az idősor teljesen véletlenszerű sorozat,
$05 < H \leq 1$ az idősor trendtartó jellegű. Minél magasabb ez az érték, annál erősebb a trendjelleg.

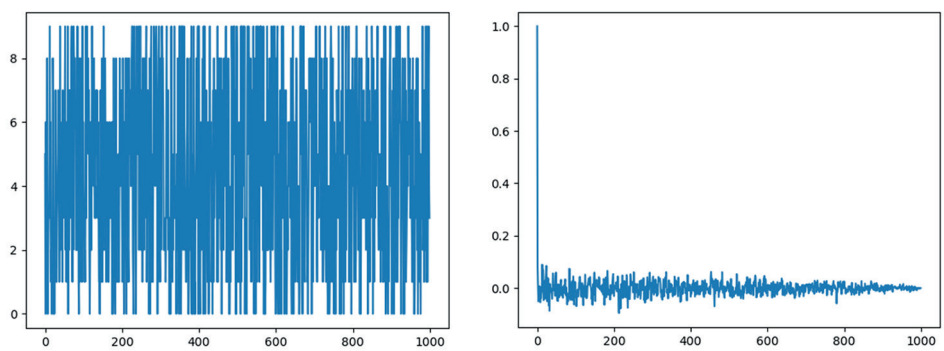
Emellett célszerű megvizsgálni az idősor autokorrelációs függvényét. Ez számos esetben segíthet a hibák okainak felderítésében. Ha az autokorrelációs függvény csak a kezdőértékben mutat 1 értéket és máshol 0, vagy közel nulla, akkor a hibák bekövetkezése teljesen véletlenszerű. Minél gyorsabban éri el a 0 értéket a sorozat, annál gyorsabban „felejti el" az előző értékeket [7].

Mivel tételszerűen kijelenthetjük, hogy hibátlan szoftver nincs, következésképpen hibátlan fejlesztési folyamat sincs. A véletlen jellegű szoftverhibák előfordulása nem szerencsés. Számunkra az a kedvező, ha az autokorrelációs függvény abszolút értéke gyorsan csökken, de nem túl gyorsan. Ha az autokorrelációs függvény „magas", az azt jelentheti, hogy a hibák rendszeresek és a gyártó ezt a problémát nem kezeli elég hatékonyan. Ha az autokorrelációs függvény „túl alacsony", ez azt jelenti, hogy a hibák közel teljesen véletlenszerűek, így ezek okainak felderítése nehezen, vagy egyáltalán nem megoldható, például hardverkörnyezet-eredetű hibák. Ha az autokorrelációs függvény ezek között van, az szintén egyfajta trendtartást jelent [9], [10].

[3] Amennyiben valakinek a Python-forráslistára szüksége van, szívesen rendelkezésére bocsátom.

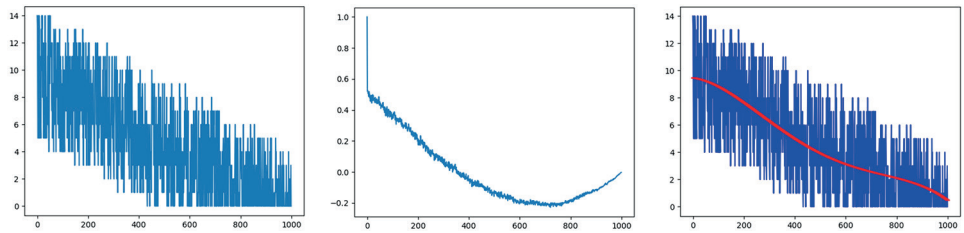
Az előző gondolatmenetben feltételeztük, hogy az elkövetett hibák száma csökken. Az autokorrelációs függvény nem mondja meg, hogy a sorozat elemei csökkenő vagy növekvő tendenciát mutatnak, csak a sorozat elemeinek összefüggéséről nyújt képet. Ezért meg kell néznünk a trend jellegét. Erre célszerű valamilyen regressziós függvény alkalmazása. A lehetőségek a következők:

- lineáris regresszió, vagyis regressziós egyenes illesztése az adatsorra. Ez arra alkalmas, hogy összességében lássuk, hogy a trend általánosságban növekszik vagy csökken. Azonban a finomabb részleteket elfedi [10];
- exponenciális regresszió, egyszeres exponenciális regresszió nem elegendő, mert egy trendváltozást képtelen kimutatni [11];
- szigmoid függvény és logisztikai görbe. A szigmoid függvény inflexiós pontja az értelmezési tartomány közepén van. Ez sajnos nem szerencsés. A logisztikai görbe csökkenő formája a szigmoid görbe inflexióproblémáját ugyan megoldja, de sajnos itt is azt tapasztaljuk, hogy a finomabb részleteket a görbe figyelmen kívül hagyja [12];
- regressziós polinom alkalmazása. Végül ezt a módszert alkalmaztuk. A vizsgálatok esetén maximum negyed-ötödfokú polinom alkalmazása volt célszerű [13]. A magasabb fokú polinomok túlságosan „figyelnek" a részletekre, és információt nem hordozó hullámzást mutatnak.



1. ábra
Véletlenszerű folyamat idősora és autokorrelációs függvénye [a szerző]

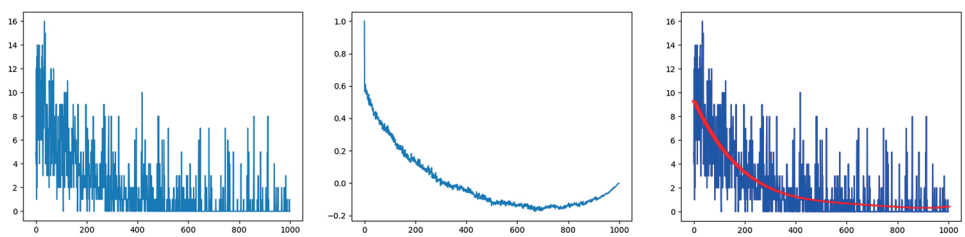
Az 1. ábrán egy véletlenszerű folyamat időDiagramját láthatjuk. Ez szimulált idősor. A Hurst-exponens értéke H = 0,47, amely nagyon közel van a teljesen független idősor 0,5 értékéhez. Ha megnézzük az 1. ábrán az autokorrelációs függvényt, akkor láthatjuk, hogy a 0 értéknél látható az 1 érték, a diagram további részei közel 0 értékűek. Ez alátámasztja a véletlenszerűség tulajdonságot.



2. ábra
Trenddel rendelkező folyamat idősora, autokorrelációs függvénye és polinomiális regressziós függvénye [a szerző]

A 2. ábrán szintén egy szimulált idősort láthatunk, de a generáló függvénybe építettünk egy lineáris csökkenő tendenciát. Ez jól látszik a diagramon. A Hurst-exponens H = 0,91. Az autokorrelációs függvényen is egyértelműen látszik az idősorban a „hosszú távú emlékezet".

A 2. ábra harmadik részábráján az idősorra egy ötödfokú regressziós polinomot illesztettünk. Ez a piros görbe.



3. ábra
Egy valós fejlesztési projekt jellemzői [a szerző]

A 3. ábrán egy valós vizsgálat adataiból származó idősor adatait láthatjuk. (Ezek az egyetlen céges adatsorból származó adatok, ezt később tárgyaljuk.) A Hurst-exponens értéke H = 0,93. Az autokorrelációs függvény szintén mutatja az „emlékezetet". A harmadik részábra az idősorra illesztett ötödfokú polinomot mutatja. Ez egyértelműen mutatja a trend jellegét.

A vizsgálatokat 1000 elemű idősorokra végeztük el.

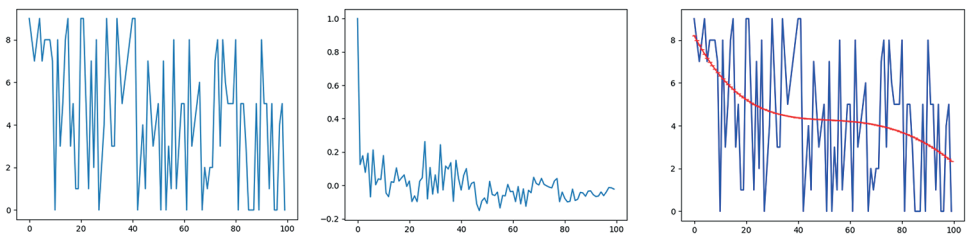
4. Másodlagos felhasználás

A módszert sajnos cégek esetén nem tudtam alkalmazni, ennek okairól nem kívánok a továbbiakban beszélni.

Ez alól csak egy cég volt kivétel, de ott is csak egyetlen programozót vizsgálhattam, mert a cégben lévő két másik programozó nem szoftverprojektekben dolgozik, hanem kutatást végez, és erre, mint már korábban említettük, a módszer nem alkalmazható. Viszont oktatási vizsgálatokat tudtam végezni különböző tantárgyak esetén.

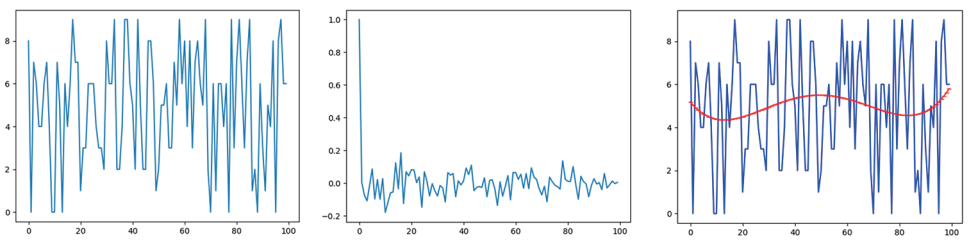
Az adatgyűjtés módszere az volt, hogy a hallgatók által írt programok szintaktikai és szemantikai hibáit vizsgáltuk. Az így kapott idősorok egyes hallgatók esetén egyértelműen megmutatták a kérdéses hallgató képességeit. A kapott Hurst-exponens, a regressziós polinom és hibaráta jól korrelált az adott szemeszter végén kapott érdemjeggyel.

Másodlagos eredmény volt az, ha az oktatókat vizsgáltuk. Szintén a Hurst-exponenst, a regressziós polinomot és hibaarányt vizsgáltuk. Mivel az adott tantárgyakban a szubjektív osztályzás kizárt, ezért az eredmények az oktatót minősíthetik. Az eredmények alapján az oktatók rangsorolhatók. Lényeges, hogy a vizsgált minta elég nagy legyen. Jó lenne az is, ha a két féléves laboratóriumi oktatás esetén, a kurzusokon azonos hallgatók lennének, de ez sajnos nem biztosítható. Kiválasztottunk két hallgatót, egy jól teljesítőt és egy nem annyira jól teljesítőt, aki viszont a vizsgálat két félévét elsőre sikeresen abszolválta. Lényeges, hogy a két hallgató azonos kurzuson vett részt.



4. ábra
A jól teljesítő hallgató diagramjai [a szerző]

A 4. ábrán sorra a jól teljesítő hallgató diagramjai láthatók. A Hurst-exponens H = 0,75 értékű.



5. ábra
A gyengébb hallgató diagramjai [a szerző]

Az 5. ábrán a gyengébb hallgató diagramjait tüntettük fel. A Hurst-exponens H = 0,27, amely nem teljes véletlenszerűséget mutat, de az eredmény eléggé következetlennek számít.

Első pillantásra a két hallgató idősora között szemmel alig látható különbség van. A jelleget a regressziós polinom és a Hurst-exponens mutatja. A szemeszterekét lezáró jegyek az első hallgatónál jó és jeles, a második hallgatónál elégséges és elégséges. Tehát az idősor-analízis helyesen mérte fel a hallgatók teljesítményét.

Az oktatóknál a korrekt eredményekhez sokkal nagyobb mintát kell vizsgálni. A vizsgálatot erősen torzítja az, hogy nem azonos populáción végezzük a vizsgálatot. Ezért gyors eredmény

nem várható el. Sajnos a pandémia ezt a vizsgálatot lehetetlenné tette, és az eredmények elvesztek. A vizsgálatokat a 2021/22-es tanév első félévében kezdtük újra. Ez az időtartam túl rövid, ezért nem tartjuk megfelelőnek, hogy az eredményeket jelen pillanatban publikáljuk.

5. Minőségi következtetés

Az előző vizsgálatok egyértelműen meghatározták a fejlesztők tevékenységének trendjét, azonban ez még kevés a várható minőség becslésére. Ez egyértelmű, ha nézzük a következő erősen sarkított példát: adott „A" fejlesztő, a vizsgálati trendje jó, a Hurst-exponens értéke H = 0,85, az autokorrelációs függvény a megfelelő szinten van, de a hiba előfordulásának gyakorisága 10^{-10}, ez rendkívül magas hibaráta. „B" fejlesztő értékei hasonlók, míg Hurst-exponense kicsit gyengébb, mint az előző fejlesztőé, H = 0,79, autokorrelációs függvénye is fölötte halad az előzőnek, a trend iránya jó, viszont a hiba előfordulásának gyakorisága 10^{-25}. Ez sokkal jobb arány, tehát nyilvánvalóan a „B" fejlesztőt fogjuk választani. Az egyértelmű, hogy egy viszonylag rossz eredményből sokkal könnyebb javulni, mint egy eleve jobb eredményből.

Az előzőekben ismertettük egy fejlesztő cég idősorjellemzőit és hallgatók idősorjellemzőit. A hallgatóknál egyértelmű a laborgyakorlaton nyújtott teljesítmény. A fejlesztői cégnél két lehetőségünk adódik, ezek:

- egy adott projektben nyújtott teljesítmény, ez a vizsgálat gyakorlatilag megegyezik a hallgatói teljesítmény vizsgálatával;
- az eddig elkészült szoftverekből származó idősorok vizsgálata.

A fejlesztők esetén célszerű mindkét vizsgálatot elvégezni.

6. Összefoglaló

Az idősorok segítségével nyomon követhetjük, hogy az adott rendszerben vagy folyamatban milyen gyakorisággal és időzítéssel jelennek meg a hibák, és ezeket az információkat felhasználhatjuk a rendszer javításához vagy optimalizálásához. Az általunk javasolt eljárással az idősorok eltérő platformokon fejlesztett és futó szoftverek esetén is használhatók vizsgálatokra.

Az idősorok elemzése során az említett Hurst-exponens, autokorrelációs függvény és regressziós polinomok hasznos eszközök lehetnek a hibák előrejelzéséhez. Lehetőséget nyújtanak a megrendelőnek, hogy az adott szoftver vagy szoftverelem fejlesztéséhez melyik szoftverfejlesztő céget válassza ki. Ez különösen fontos lehet működésbiztos (safety-critical), vagy veszélybiztos[4] (mission-critical) fejlesztés esetén.

Ebben a cikkben három jellemző alapján határozzuk meg a vizsgálat tárgyának időbeli viselkedését: a Hurst-exponens alapján, amely megmutatja a folyamat trendjellegét, autokorrelációs függvény alapján, amely grafikusan mutatja az idősor összefüggését és a regressziós polinom segítségével, amely megmutatja a trend irányát.

Ezeket a vizsgálatokat elvégeztük egy fejlesztő cég egy adott projektjére, lásd 3. ábra és két kiválasztott hallgatóra, lásd 4. és 5. ábra.

[4] Erre a kifejezésre nincs igazán jó magyar fordítás.

A cég esetén a projekt sikeres volt. A hallgatóknál a módszer elég jól előrejelezte az évközi jegyeket. Jelenleg az oktatói minősítésen is dolgozunk.

Felhasznált irodalom

[1] Szilágyi, G. A. „ A légi balesetek fraktáldimenziója," *Repüléstudományi Közlemények,* 28. évf. 2. sz. pp. 41–48. 2016. Online: https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4484

[2] B. Lutkevich, Capability Maturity Model (CMM). *Techtarget,* 2022. április. Online: www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/Capability-Maturity-Model

[3] NEDL, Hurst exponent explained: Long-term memory in time series (Excel). *YouTube,* 2021. január 12. Online: www.youtube.com/watch?v = l08LICz8Ink

[4] S. Aref, Hurst Phenomenon and Fractal Dimensions in Long-Term Yield Dataterm Yield Data. in *Conference on Applied Statistics in Agriculture 1998 – 10th Annual Conference Proceedings.* 1998. pp. 32–42. Online: https://newprairiepress.org/cgi/viewcontent.cgi?article = 1275&context = agstatconference

[5] M. de las Nieves López García, J. P. Ramos Requena, „Different Methodologies and Uses of the Hurst Exponent in Econophysics," *Studies of Applied Economics,* 37. évf. 2. sz. pp. 96–108. 2019. Online: https://doi.org/10.25115/eea.v37i2.2603

[6] B. Davidson, Hurst exponent. *MathWorks,* 2023. szeptember 7. Online: www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9842-hurst-exponent

[7] https://github.com/ziyadparekh/MATLAB/blob/master/hurst_exponent.m

[8] P. Dix, *Time Series Forecasting Methods.* Influxdata, 2020. Online: https://www.influxdata.com/time-series-forecasting-methods/#download

[9] NIST, „6.4. Introduction to Time Series Analysis," in *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods.* 2012. Online: www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section4/pmc4.htm

[10] C. Zaiontz, Exponential Regression using a Linear Model. *Real Statistics Using Excel,* [é. n.]. Online: https://real-statistics.com/regression/exponential-regression-models/exponential-regression/

[11] Wikipedia, *Logistic Regression.* [é. n.]. Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_regression

[12] S. Anayah, The Sigmoid in Regression, Neural Network Activation and LSTM Gates. *GitHub,* 2020. január 17. Online: https://suzyahyah.github.io/machine%20learning/2020/01/17/Sigmoid.html

[13] R. Agrawal, Master Polynomial Regression With Easy-to-Follow Tutorials. *Analytics Vidhya,* 2021. július 9. Online: www.analyticsvidhya.com/blog/2021/07/all-you-need-to-know-about-polynomial-regression/

[14] Polynomial Regression – Least Square Fittings. *Matrixlab,* [é. n.]. Online: www.matrix-lab-examples.com/polynomial-regression.html

Application of Time Series to Predict Software Reliability

Choosing a software manufacturer is a serious challenge for the customer. Since we cannot apply the test methods of classic production processes in the case of software, we must therefore examine the manufacturer. It is quite clear that a specific manufacturer must have appropriate qualifications. But what if there are several manufacturers with the same certification, and you have to choose between them.

In this article, we propose a method that examines the general development activities of manufacturers under appropriate restrictions based on the operational and development errors made, arranging them in time series.

The article describes the method, its advantages, limitations, obstacles to its application and an unexpected consequence in education.

Keywords: *software quality estimation, time series*

Dr. Schuster György
docens
Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék
schuster.györgy@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8573-3670

György Schuster, PhD
Associate Professor
Óbuda University
Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Electronic and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation
schuster.györgy@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8573-3670

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 81–99. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.7

Terpecz Gábor

eVTOL[1] légi járművek biztonsága

Az eVTOL járművek fejlesztése és elterjedése az utóbbi években nagy figyelmet kapott a légi közlekedési iparban. Az eVTOL biztonsága nagy kihívást jelent az ipar számára, mivel az ilyen típusú járművek repülési rendszerei és az ehhez szükséges infrastruktúra még fejlesztésre szorulnak. Az eVTOL járműveknek több biztonsági szempontot kell figyelembe venniük, mint a hagyományos repülőgépeknek, mivel az alacsonyabb magasságban való repülés, a rövidebb fel- és leszállási úthossz, valamint a sokkal nagyobb forgalom potenciális veszélyeket jelentenek.

Kulcsszavak: *eVTOL, nagyvárosi légi mobilitás, biztonság, fejlett légi mobilitás, biztonsági integritási szint, hibaarány, biztonságkritikus rendszer, megbízhatóság*

1. Mi is az az eVTOL légi jármű?

Az eVTOL jelölés a függőleges fel- és leszállás képességét jelenti a repülőgépek egy speciális változatánál. Akár a hagyományos helikopterek, képesek helyből fel- és leszállni, így alkalmasak városi környezetben történő műveletek végrehajtására.

Az eVTOL (elektromos függőleges felszállású és leszállású) drónok új generációja a repülőgépeknek, és a biztonságuk kulcsfontosságú. Az eVTOL drónok fejlesztése és üzemeltetése során számos biztonsági protokollt kell alkalmazni, például az ütközésgátló rendszereket és a légiforgalmi irányítást.

Az eVTOL drónok megbízhatósága kritikus fontosságú, mivel az utasokat szállítják, és rendszeresen ellenőrizni kell őket. Az eVTOL drónok adatvédelmi kérdéseinek meg kell felelniük az adatvédelmi törvények követelményeinek, és a személyes adatok kezelése, valamint tárolása biztonságos kell legyen.

Az eVTOL drónokra vonatkozó biztonsági, adatvédelmi szabályozás további fejlesztése és szigorítása szükséges ahhoz, hogy a repülés biztonságos legyen mindenki számára.

A fenntarthatóságnak, az innovációnak, a környezetvédelemnek, valamint a gyorsan változó szállítási igényeknek megfelelve, a robbanásszerűen fejlődő új technológiák eredményeképpen megjelentek az elektromos meghajtású, függőleges fel- és leszállásra képes légi járművek, amelyek a világ minden részén forradalmasíthatják a légi közlekedést és a légi áruszállítást.

[1] Electric Vertical Take-Off Landing – elektromos helyből fel- és leszálló.

1.1. Az eVTOL légi járművek jellemzői

Az eVTOL légi járművek villamos energiát használnak a függőleges fel- és leszálláshoz, valamint a lebegéshez, ezért több tanulmány szerint is fontos elemei lehetnek a városok és azok agglomerációjában felmerülő modern közlekedési igények kiszolgálásának.

Az eVTOL légi járművek a fenntartható szállítás jegyében kínálnak megoldásokat utasok és különböző terhek városokban vagy azok külterületein való mozgatására. A jelenleg elérhető megoldások akár 100–200 km távolságra is biztosítják a szállítást, csökkentve ezzel a közlekedési torlódásokat, valamint a szén-dioxid-kibocsátást.

Az akkumulátortechnológia és az üzemanyagcellák dinamikus fejlődése, valamint a fenntartható közlekedés iránti növekvő kereslet fokozza az érdeklődést az eVTOL légi járművek iránt. Mivel eVTOL légi járműveknél alkalmazott különböző technológiák már több mint egy évtizede léteznek, a villamos energiával működtetett meghajtások fejlesztései és az ezekhez szükséges pénzügyi befektetések jelentősen megnövekedtek.

Jelenleg már több kereskedelmi forgalomban lévő eVTOL termék létezik. A repüléssel foglalkozó cégek már több olyan légijármű-típussal is rendelkeznek, amelyek fejlesztése a tesztszakaszba lépett, illetve a tesztelés végén jár. Ezek első példányai várhatóan 2023-ban már megjelennek a légi közlekedésben, ezért rendkívül fontos a biztonságos működésük mielőbbi szabályozása.

2. eVTOL szabályozási környezetek

A közlekedési ágazat fejlett légi mobilitásának (AAM[2]) kiemelt részét képezi az eVTOL légi járművekben rejlő lehetőségek kihasználása. Ezek a lehetőségek nagyban elősegítik a regionális és városi közlekedési hálózatokban történő személy- és teherszállítás korszerűsítésére, racionalizálására tett erőfeszítéseket.

A fejlett légi mobilitáson belül az eVTOL légi járművek várhatóan fontos szerepet fognak betölteni a városi légi mobilitásban (UAM[3]), amely nem más, mint a városokon belüli és városok közötti alacsony tengerszint feletti magasságban történő légi közlekedés jelenleg kialakulóban lévő szabályozási kerete.

Tekintettel az eVTOL légi járművek iránti világszerte növekvő érdeklődésre, a légi közlekedéssel foglalkozó szervezeteknek (például FAA[4], EASA[5]) olyan szabályozási kereteket kell létrehozniuk, amelyek az egyes tagállamokon belüli használatukat szabályozzák. Ilyenek lehetnek például az EU 2019/945 40. cikkely 1. bekezdés [1], vagy az EU 2019/947 3. cikkely [2, p. 6] rendeletekben meghatározott, az eVTOL légi járművekre adaptálható típustanúsítások és műveletek. Ezt a folyamatot az EASA a drónok tervezésének ellenőrzésére vonatkozó, 2021. április 8-án közzétett iránymutatásai vázolták fel. Az EU-ban a német Volocopter VC200-2 kapta meg elsőként (1. ábra) az úgynevezett DVR[6] tanúsítást.

[2] Advanced Air Mobility.
[3] Urban Air Mobility.
[4] Federal Aviation Administration – Szövetségi Repülési Hivatal (USA).
[5] European Union Aviation Safety Agency – EU Repülésbiztonsági Ügynökség.
[6] Design Verification Report.

1. ábra
Volocopter VC200 [3]

A DVR az EASA által létrehozott tervhitelesítési jelentés, amelynek kiadását a drónygyártók vagy üzemeltetők kérhetik az EASA-tól egy meghatározott feladatra használt drónra.

Ez azt is jelenti, hogy bármelyik európai üzemben tartó kérhet az illetékes nemzeti légügyi hatóságtól az adott kategóriába tartozó műveleti engedélyt egy meghatározott tevékenység elvégzésére DVR-rel rendelkező drónnal anélkül, hogy az EASA-tól további hitelesítést kellene beszereznie. További információk a 2021. április 21-én kiadott iránymutatásban találhatók.[7]

3. eVTOL légi járművek biztonsági tervezése

Az eVTOL légi járművek biztonságkritikus rendszerek, ezért a tervezésük olyan folyamat, amelynek célja az olyan rendszerek tervezése és implementálása, amelyek biztosítják a magas szintű biztonságot és megbízhatóságot, különösen olyan környezetekben, ahol a hibák vagy a rendszerhibák súlyos következményekkel járhatnak.

A biztonságkritikus rendszerek tervezése során az elsődleges cél a biztonság, a megbízhatóság és a stabilitás biztosítása a rendszer egész életciklusa alatt. Az ilyen rendszerek tervezése és bevezetése magas szintű szakértelmet és átfogó ismereteket igényel az adott területen, és magában foglalja a megfelelő tervezési és tesztelési módszerek alkalmazását, hogy biztosítsa a rendszer teljesítményét és megbízhatóságát.

3.1. A PFD[8]-érték

A PFD egy olyan mérőszám, amelyet a funkcionális biztonság területén használnak annak értékelésére, hogy egy biztonsági rendszer mennyire megbízható és hatékony a hibákat elkerülő vagy azok következményeit csökkentő működése során.

[7] Guidelines on Design verification of UAS operated in the 'specific' category and classified in SAIL III and IV.
[8] Probability of Failure on Demand.

A PFD értéke azt mutatja meg, hogy a biztonsági rendszer mennyire valószínű, hogy egy adott időszakban kudarcot vall, amikor kérésre el kell indítania egy biztonsági funkciót. Általában a PFD értéke nagyon kicsi tört szám (például 10^{-5}, ami azt jelenti, hogy a rendszernek nagyon alacsony az esélye a hiba bekövetkezésére).

A PFD értékelése során figyelembe veszik a rendszer minden lehetséges hibáját és a rendszer tervezésének minden lépését. A PFD értéke befolyásolható a rendszer architektúrájával, a redundancia szintjével, a hardver és szoftver megbízhatóságával, valamint az érzékelők és az aktuátorok[9] megbízhatóságával is.

3.1.1. Példa PFD számítására

Vegyünk példának egy közelségérzékelő rendszert, amely eVTOL-okon működik, és távolságérzékelő szenzorokkal van felszerelve. A rendszer célja, hogy észlelje a beállított értékekhez közeledő légi és földi objektumokat, és küldjön riasztást a repülésvezérlő számítógépnek.

A rendszer érzékenysége és a környezeti tényezők, például a terület forgalma, valamint a környező interferenciák, zajok befolyásolhatják a PFD értékét. Tegyük fel, hogy a rendszer érzékenysége magas, és a környezeti tényezők nem befolyásolják jelentősen a rendszer teljesítményét.

Ebben az esetben a PFD számítása a következő lenne:

Tételezzük fel, hogy a rendszer által észlelt, közeledő objektumok száma 1000, és ebből 5 hamis riasztás volt.

A PFD értéke kiszámítható a következő képlettel:

PFD = hamis riasztások száma/összes észlelt mozgások száma

PFD = 5/1000 = 0,005 vagy 0,5%

Ez azt jelenti, hogy a rendszer 1000 észlelt mozgásából csak 5 volt hamis riasztás, ami nagyon alacsony PFD-értéknek felel meg. Ez azt jelenti, hogy a rendszer megbízható és hatékonyan előzi meg a hamis riasztásokat.

3.1.2. A PFDavg[10] mutató

A PFDavg egy biztonsági mutató, amely az adott rendszer vagy folyamat meghibásodásának valószínűségét méri. A PFDavg érték azt mutatja meg, hogy milyen gyakran várható az adott biztonsági rendszer hibás működése, ha azt rendszeresen ellenőrzik és karbantartják.

A PFDavg-t gyakran használják az ipari biztonságtervezés során, különösen a megbízhatósági tervezésben, amelynek célja, hogy minimalizálja az eszközök, rendszerek vagy folyamatok meghibásodásának kockázatát.

A biztonságkritikus rendszerek tervezésekor és karbantartásakor fontos a PFDavg érték meghatározása, hogy a tervezők biztosítani tudják a lehető legnagyobb megbízhatóságot.

[9] Aktuátor: olyan eszköz vagy berendezés, amely képes mozgatni, irányítani vagy módosítani egy másik rendszert vagy gépet.

[10] Probability of Failure on Demand average.

Az ilyen rendszerek közé tartoznak például a légi közlekedésben is elterjedt tűzjelző, tűzoltó, gázérzékelő, közelségérzékelő stb. rendszerek.

A PFDavg értéke hasznos információ a döntéshozók számára is a tervezési vagy karbantartási folyamat során, mivel segít abban, hogy meghatározzák a rendszer megbízhatóságát és azonosítsák a tervezési vagy karbantartási intézkedésekkel kapcsolatos legfontosabb területeket. Ez segíthet csökkenteni a meghibásodás kockázatát és javítani a biztonságot, valamint az üzleti teljesítményt.

3.1.3. A PFDavg számítása

A PFDavg számítása általában a következő képlettel történik:

PFDavg = λ_{DU} × Test Coverage × Diagnostic Coverage

Ahol:

- λ_{DU}: az eszköz vagy rendszer meghibásodási rátája[11] (h-1)
- Test Coverage: a tesztelési eljárások hatékonysága (0 és 1 közötti érték). Ez az érték azt mutatja meg, hogy a tesztelés során milyen valószínűséggel találnak meg egy hibát. Ez az érték az adott drón típusától, az alkalmazott tesztelési eljárásoktól és azok hatékonyságától függ.

Számítása:

- Test Coverage = (tesztelt hibák száma)/(összes lehetséges hiba száma)
  Ez azt jelenti, hogy a Test Coverage faktor számításához szükséges meghatározni az összes lehetséges hiba számát, majd ebből kiválasztani azokat a hibákat, amelyekre tesztet végeztek. A tesztelt hibák számának elosztása az összes lehetséges hiba számával adja meg a Test Coverage faktor értékét. A Test Coverage faktor értéke általában 0 és 1 között van, és minél magasabb a faktor értéke, annál nagyobb a tesztelési és diagnosztikai lefedettség, valamint annál jobb a rendszer megbízhatósága.
- Diagnostic Coverage: a diagnosztikai eljárások hatékonysága. Ez az érték azt mutatja meg, hogy a diagnosztikai eljárásokkal milyen valószínűséggel lehet azonosítani egy hibát. Ez az érték az adott drón típusától, az alkalmazott diagnosztikai eljárásoktól és azok hatékonyságától függ.
  A Diagnostic Coverage értéke 0 és 1 között mozog. A nagyobb érték azt jelenti, hogy a biztonsági rendszer képes hatékonyabban észlelni a hibákat, így a PFDavg értéke is alacsonyabb lesz (1. táblázat). A Diagnostic Coverage értékének meghatározása általában a rendszer tervezése és fejlesztése során történik, és figyelembe veszi az összes lehetséges hibafeltáró technológiát és a rendszer komponenseinek megbízhatóságát.

[11] Failure Rate – meghibásodási arány.

Például, ha az adott rendszer meghibásodási ráta 0,01 h-1, a tesztelési eljárások hatékonysága[12] = 0,9 és a diagnosztikai eljárások hatékonysága[13] = 0,8, akkor a PFDavg értéke a következő lenne:

$$PFDavg = 0{,}01 \times 0{,}9 \times 0{,}8 = 0{,}0072\ h\text{-}1$$

Ez azt jelenti, hogy az adott biztonsági rendszer átlagosan 0,0072-szer fog hibásan működni óránként, ha azt rendszeresen ellenőrzik és karbantartják.

1. táblázat
Egy esemény hatására bekövetkező átlagos meghibásodás valószínűsége [a szerző]

Egy esemény hatására bekövetkező átlagos meghibásodás valószínűsége		
PFDavg	$\frac{Elviselhető\ baleseti\ gyakoriság}{Védelem\ nélküli\ balesetek\ gyakorisága} = \frac{1}{RRF}$	
	Egyszerűsített egyenletek	
	Közös okok nélkül	**Gyakori okokkal (Béta faktor)**
1001	$\lambda_{DU} \times \frac{TI}{2}$	
1002 **1002D**	$\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_2} \times \frac{TI^2}{3}$	$\frac{[(1-\beta)] \times (\lambda_{DU} \times TI)^2}{3}$
1003	$\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_2} \times \lambda_{DU_3} \times \frac{TI^3}{4}$	$\frac{[(1-\beta)] \times (\lambda_{DU} \times TI)^3}{4}$
2002	$(\lambda_{DU_1} + \lambda_{DU_2}) \times \frac{TI}{2}$	$[(1-\beta) \times (\lambda_{DU} \times TI)] + \frac{(\beta \times \lambda_{DU} \times TI)}{2}$
2003	$[(\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_2}) + (\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_3}) + (\lambda_{DU_2} \times \lambda_{DU_3})] \times \frac{TI}{2}$	$[(1-\beta) \times (\lambda_{DU} \times TI)]^2 + \frac{(\beta \times \lambda_{DU} \times TI)}{2}$
1001	$\lambda_{DU} \left[\left(Et \times \frac{TI}{2} \right) + (1 - Et) \times \frac{SL}{2} \right]$	

ahol:

RRF[14] – kockázatcsökkentési tényező;
TI[15] – a bizonyítási tesztidő intervalluma;
Et[16] – a teszt hatékonysága;
λ_{DU}[17] – veszélyes nem észlelt hibaarány;
$1 - \beta$ – felfedezési valószínűség.

12 Test Coverage – teszt lefedettség.
13 Diagnostic Coverage – diagnosztikai lefedettség.
14 Risk Reduction Factor.
15 Proof Test Time Interval.
16 Test Effectiveness.
17 Test Dangerous Undetected Failures.

4. Biztonsági integritási szintek (SIL[18])

4.1. Mi is a SIL szint?

A PFD értéke alapján a rendszert biztonsági integritási szintekbe (SIL) sorolják, amelyeket az IEC 61508 és más funkcionális biztonsági szabványok határoznak meg. Minél alacsonyabb a PFD értéke, annál magasabb a SIL szint, és annál megbízhatóbb a rendszer.

Az eVTOL-ok tervezésénél a SIL szabványt alkalmazzák. A SIL biztonsági integrációs szintek gyűjteménye, amelyeket egy adott ipari folyamathoz vagy rendszerhez szükséges kockázatcsökkentési szint meghatározására használnak.

A SIL azonosítja és értékeli a kockázatokat, amelyeket egy adott rendszer, folyamat vagy eszköz jelent az emberekre, a környezetre vagy a gazdasági javakra.

Minél nagyobb egy folyamathoz vagy rendszerhez kapcsolódó kockázat, annál magasabb a szükséges SIL szint.

A SIL-t gyakran használják a biztonság szempontjából kritikus rendszerek tervezéséhez és üzemeltetéséhez olyan iparágakban, mint az olaj- és gázipar, a vegyipari feldolgozás és az atomenergia-termelés, járműipar vagy éppen a légi közlekedés.

A SIL-t a Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság (IEC[19]) határozza meg az IEC 61508 és IEC 61511 szabványokban.

A SIL egy szabványosított módszer a biztonsági rendszerek megbízhatóságának értékelésére és a biztonsági követelmények teljesítésének biztosítására. A SIL szintjei az adott rendszer kockázatának mértékétől függenek. Az IEC 61508 szabványon alapuló funkcionális biztonsági szabványok négy SIL-t határoznak meg, amelyek közül a SIL 4 a legmegbízhatóbb és a SIL 1 a legkevésbé megbízható. A következő SIL szinteket különböztetjük meg:

- SIL 1 – alacsony biztonsági szint;
- SIL 2 – közepes biztonsági szint;
- SIL 3 – magas biztonsági szint;
- SIL 4 – kritikus biztonsági szint.

4.2. SIL 3

A számos halálos áldozattal vagy súlyos sérüléssel járó balesetek elkerüléséhez szükséges integritást képviseli. A SIL 3 a biztonsági integritás harmadik legmagasabb szintje a SIL szabványban. A SIL 3 követelményeinek való megfelelésre tervezett rendszer vagy folyamat PFD-je az adott alkalmazástól függően kevesebb, mint 0,1–1%. A SIL 3-ra jellemzően olyan rendszerek esetében van szükség, amelyek meghibásodás esetén jelentős kockázatot jelentenek az emberi életre vagy a környezetre, mint például egy vegyi üzem vészleállító rendszerei vagy egy atomerőmű biztonsági rendszerei.

[18] Safety Integration Level.
[19] International Electrotechnical Commission.

4.3. A SIL 3 tartalmi elemei

4.3.1. Teljesítményszint

A SIL 3 esetén a rendszernek magas szintű teljesítményt kell biztosítania a hibák és meghibásodások minimalizálása érdekében. A rendszernek képesnek kell lennie a kritikus hibák azonosítására, elkerülésére vagy csökkentésére.

4.3.2. Biztonsági intézkedések

A SIL 3 rendszereknek magas szintű megbízhatósági és biztonsági intézkedéseket kell tartalmazniuk. A rendszernek képesnek kell lennie arra, hogy előre jelezze a hibákat és meghibásodásokat, és minimalizálja azok kockázatát. A SIL 3 tanúsítvány megszerzéséhez egy rendszernek vagy folyamatnak szigorú tervezési, tesztelési és ellenőrzési folyamaton kell átesnie annak biztosítása érdekében, hogy megfeleljen a szükséges biztonsági integritási szintnek.

5. SIL 4

A SIL 4 tanúsítás az egyik legmagasabb biztonsági szintet jelenti, és általában a kritikus fontosságú biztonsági rendszerek értékelésére és tanúsítására használják. A SIL 4 tanúsítás tehát azt jelenti, hogy egy adott rendszer a legmagasabb szintű biztonsági követelményeknek felel meg, megfelelően tesztelték, ellenőrizték és tanúsították az adott szintnek megfelelően. Az ilyen tanúsítványok általában olyan kritikus rendszerekhez kapcsolódnak, mint például az űrkutatás, a repülés, a vasúti közlekedés, a kémiai vagy nukleáris iparágak és más hasonló területek.

5.1. A SIL 4 tartalmi elemei

5.1.1. Teljesítményszint

SIL 4 esetén a rendszernek magasabb szintű teljesítményt kell biztosítania a hibák és meghibásodások minimalizálása érdekében. A rendszernek képesnek kell lennie a kritikus hibák azonosítására, elkerülésére vagy csökkentésére.

5.1.2. Biztonsági intézkedések

A SIL 4 rendszereknek rendkívül magas szintű megbízhatósági és biztonsági intézkedéseket kell tartalmazniuk. A rendszernek képesnek kell lennie arra, hogy előre jelezze a hibákat és meghibásodásokat, és minimalizálja azok kockázatát.

5.1.3. Tervezési követelmények

A SIL 4 rendszerek tervezéséhez nagyon magas szintű szakértelemre és figyelemre van szükség. A tervezőknek meg kell érteniük a rendszer működési környezetét és azokat a lehetőségeket, amelyek megbízhatósági és biztonsági kihívásokat jelentenek.

5.1.4. Ellenőrzés és karbantartás

A SIL 4 rendszerek működését folyamatosan ellenőrizni kell, és szükség esetén karbantartást kell végezni. A rendszernek képesnek kell lennie az automatikus tesztelésre, valamint az öndiagnosztikára is.

5.1.5. Dokumentáció

A SIL 4 rendszerekhez szükséges dokumentációknak nagyon részletesnek és pontosnak kell lenniük, valamint tartalmazniuk kell a rendszer működési követelményeit, az ellenőrzési és karbantartási utasításokat, a hibaelhárítási utasításokat, valamint a biztonsági utasításokat.

5.1.6. Validáció[20] és verifikáció

A SIL 4 rendszerek tervezését, fejlesztését és telepítését validálni, a rendszer működését verifikálni kell. A validáció és verifikáció célja, hogy bizonyosodjon meg arról, hogy a rendszer megfelel az előírt követelményeknek és biztonságosan működik.

6. Tanúsítások

6.1. A tervező szervezet jóváhagyása (DOA-tanúsítvány)

A DOA[21] egy olyan jóváhagyási eljárás, amely lehetővé teszi, hogy egy tervezési szervezet, például egy repülőgépgyártó cég, hivatalosan is elvégezhesse a tervezési és mérnöki munkát, valamint a repülőgép-alkatrészek gyártását, valamint azt, hogy be lehessen építeni a repülőgépekbe. Az EASA (Európai Repülésbiztonsági Ügynökség) által kiadott DOA-tanúsítvány bizonyítja, hogy a tervezési szervezet felelős az általa tervezett, gyártott vagy karbantartott légi járművek biztonságos működéséért, valamint azért, hogy megfeleljen az EASA előírásainak.

A DOA-tanúsítvány rendelkezése értelmében a tervezési szervezet jogosult arra, hogy saját maga véglegesítse a terveket, azokat jóváhagyassa és megfelelő minőségűre szabja a légi járművek tervezéséhez, gyártásához, valamint karbantartásához. Ezért a DOA-tanúsítvánnyal rendelkező cégeknek nagyobb szabadságot biztosítanak az alkotófolyamatban, illetve gyorsabbak

[20] Elfogadás, hitelesítés.
[21] Design Organisation Approval.

és hatékonyabbak lehetnek az új repülőgépek vagy repülőgép-alkatrészek kifejlesztésében és tesztelésében. A DOA-tanúsítvány tehát az eVTOL légi járművek tervezése, tesztelése és gyártása szempontjából kulcsfontosságú, hogy biztosítsa azok biztonságos működését.

6.2. A gyártó szervezet jóváhagyása (POA-tanúsítvány)[22]

A POA olyan engedélyezési eljárás, amely lehetővé teszi, hogy egy szervezet hivatalosan is elvégezhesse az eVTOL légi járművek gyártását. Az EASA által kiadott POA-tanúsítvány bizonyítja, hogy a gyártó szervezet megfelel az EASA előírásainak a termékek minőségére és biztonságára vonatkozóan. A POA-tanúsítvány rendelkezése értelmében a gyártó jogosult arra, hogy gyártási folyamatokat vezessen be, ellenőrizzék az alkatrészeket, az összeszerelést és tesztelést, valamint a minőségellenőrzési rendszereket a légi járművek gyártása során. Ez garantálja, hogy az eVTOL légi járművek kerülnek legyártásra, tesztelésre és minősítésre a szabványoknak megfelelően, és ennek megfelelően biztonságosan működnek.

A POA-tanúsítvánnyal rendelkező cégeknek nagyobb szabadságot biztosítanak a termelési folyamatban, és gyorsabbak, hatékonyabbak lehetnek az új repülőgépek vagy repülőgép-alkatrészek gyártásában. Ezáltal lehetővé válik az eVTOL légi járművek sorozatgyártása, és azt is garantálja, hogy az összes termék ugyanolyan magas minőségű és biztonságos lesz.

7. Az első, Európában kiadott tanúsítások

A német Volocopter már rendelkezik EASA-tanúsítással, mégpedig a „Design Organisation Approval" (tervezési szervezet jóváhagyás) és a „Production Organisation Approval" (gyártási szervezet jóváhagyás) tanúsításokkal. Emellett a Volocopter az első cég, amely megkapta az EASA „Type Certificate" (típusbizonyítvány) tanúsítását az elektromos meghajtású VTOL (eVTOL) légi jármű kategóriájában a VoloCity típusra, amely egy kétszemélyes eVTOL légi jármű.

Ez azt jelenti, hogy az EASA szerint a Volocopter VoloCity típusa megfelel a biztonsági, teljesítmény- és környezetvédelmi előírásoknak, és engedélyezett, hogy üzembe helyezzék az európai légterekben. A fenti tanúsítványok kiterjednek a VoloCity teljes gyártási folyamatára is, amely magában foglalja a kompozit alkatrészek gyártását, az elektromos meghajtóegységek teljes spektrumát, a meghajtásrendszer és a sárkányszerkezet végszerelését, valamint a mindenre kiterjedő berepülési programot.

8. eVTOL légi járművek kialakítása

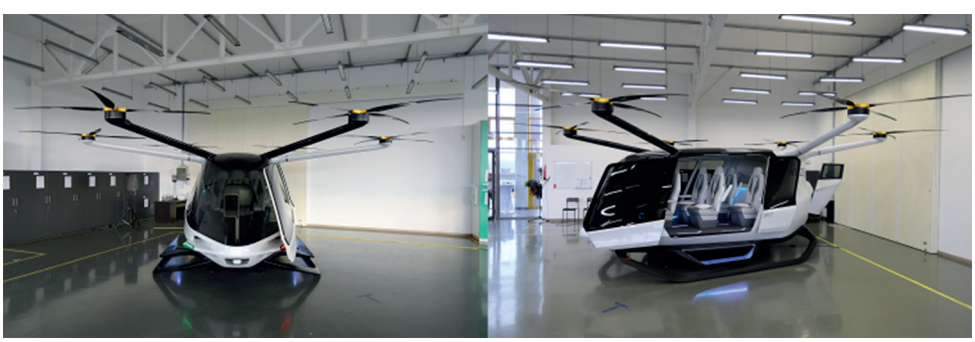
Az eVTOL-t a kivitelük sokfélesége választja el a másik két repülőgéptípustól, a fix és forgószárnyú modellektől, ahol jelenleg négy különböző típus található.

[22] Production Organisation Approval.

2. ábra
VoloCity [4]

8.1. Multikopter típusú kialakítás

Ez a kialakítás egyszerű és hatékony (2. és 3. ábra). A multikoptereknek nincsenek szárnyaik, a hatótávolságuk a hagyományos légi járművekhez képest kisebb, az energiafogyasztás pedig nagyobb, mivel a szárnyak hiányából adódó aerodinamikai felhajtóerő-szükségletet a légcsavarok és a motorok teljesítményével kell kompenzálni.



3. ábra
A Kaliforniai Alaka'i Technologies által fejlesztett Skai típusú multikopter [5]

8.2. Az „Emelkedj és utazz”[23] irányzat

4. ábra
A Beta Technologies által kifejlesztett Alia [6]

A második tervezési irányzat az „Emelkedj és utazz” (4. ábra), amely a függőleges fel- és leszállásokhoz használható multikopterdizájnt kombinálja a hagyományos repülőgéppel. Ebben a koncepcióban a repülőgépnek van egy szárnya, amelyen az emelő hajtóművek és légcsavarok találhatók. Ezek biztosítják a függőleges mozgást. Az emelő légcsavarok a függőleges felszállás és leszállás, valamint a lebegés során használatosak. A vízszintes haladáshoz a hossztengelyen vagy annak irányában elhelyezett további erőforrást helyeznek el.

8.3. A dönthető szárny és dönthető rotor irányzat

A harmadik koncepció neve „dönthető szárny és dönthető rotor”[24] (5. ábra). Ennél a tervezésnél több, viszonylag lassú, nyílt térben forgó légcsavart vagy rotort használnak, amelyek képesek minimalizálni a zajhatást. Ennek a kialakításnak a hátránya, hogy nehezebb, nagy nyomatékú villanymotorokat kell beszerelni, ami némileg bonyolítja az általános kialakítást.

[23] Lift & Cruise.
[24] „Tilt Wing” és „Tilt Rotor”.

5. ábra
A Joby Aviation repülőgépe [7]

8.4. A tolóerővektor-eltérítéses (DVT[25]) irányzat

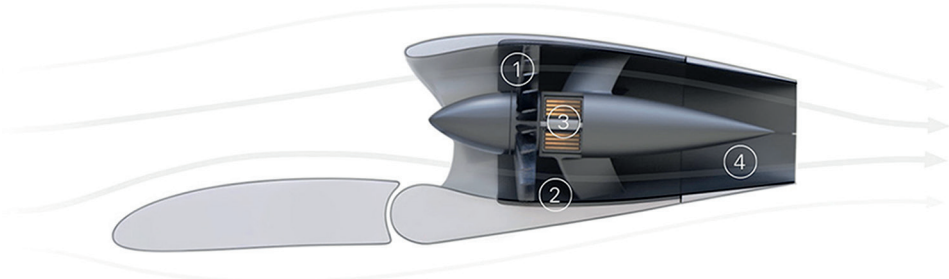
Az eVTOL-piacon megtalálható a tolóerővektor-eltérítéses irányzat is (6. ábra). Ennél az irányzatnál a merev szárnyakon ventilátorcsatornákat alkalmaznak (7. ábra). Ezekben a csatornákban (8. ábra) helyezték el a villanymotorral hajtott lapátkoszorúkat (EDF[26]) a függőleges és vízszintes repülési üzemmódhoz, az elosztott elektromos meghajtás (DEP[27]) koncepcióját alkalmazva. Ez a rendszer nagyon hatékony, és csendesebb a korábban ismertetett irányzatoknál.

6. ábra
A német Lilium Jet [8]

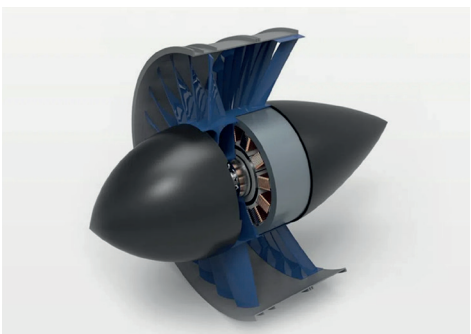
[25] Deducted Vector Thrust.
[26] Electric Ducted Fan – elektromos légcsatornás ventilátor.
[27] Distributed Electric Propulsion.

A Lilium Jet meghajtásrendszere a 7. ábrán látható elemekből áll:

1. ventilátor lapátkoszorú;
2. légcsatorna a motor rögzítésével;
3. villanymotor;
4. elfordítható (vektorálható) fúvócső a vertikális manőverekhez.



7. ábra
A Lilium Jet meghajtásrendszere [9]



8. ábra
A Lilium Jet EDF hajtóműve [10]

Az eVTOL repülőgépek DVT tervezési irányzata különösen előnyös lehet az átmeneti üzemmódban, amikor a repülőgép átvált a függőleges emelkedésről vízszintes repülésre, és fordítva. Ez a tervezési megoldás hatékonyabbá és biztonságosabbá teszi (az egyik legkritikusabb fázisban) az átmenetet a két repülési mód között.

9. eVTOL légi járművek mentési megoldásai

Noha a mai eVTOL légi járművek redundáns rendszerekkel vannak felszerelve, mégis előfordulhat a tolóerő vagy az irányítás kritikus mértékű elvesztése. Ez azt eredményezi, hogy a fedélzeten tartózkodók védelme (az összes légijármű-típushoz hasonlóan) teljes mértékben a futóműtől/csúszótalpaktól, a törzs aljának és az ülések kialakításától függ. Ezek a kialakítások egy

rendszerként működnek együtt az utasokra gyakorolt leszállási hatások enyhítésére. Az eVTOL repülőgépek mentőrendszerei különböző megoldásokat tartalmazhatnak, attól függően, hogy milyen típusú repülőgépről van szó, és azt milyen felhasználási területen alkalmazzák.

9.1. Vészhelyzeti eljárások

Az eVTOL repülőgépek vészhelyzeti eljárásai általában a következő funkciókat tartalmazzák.

9.1.1. Vészleszállás

Az eVTOL-oknak lehetőséget kell biztosítani a vészleszállásra, ha valamilyen hiba vagy probléma merül fel a repülés során. Mentőrendszerüknek lehetővé kell tennie az irányítónak (vagy autonóm üzemmód esetén a vezérlő számítógépnek), hogy a légi jármű biztonságosan leszállhasson a dedikált leszállóhelyeken kívül, ha bármilyen műszaki vagy emberi tevékenységből adódó (esetleg egészségügyi) probléma merül fel. Ehhez természetesen elégséges energiatartalékkal kell rendelkezni.

9.1.2. Nem irányított vagy részben irányított vészleszállás

Amennyiben az eVTOL légi jármű a levegőben olyan sérülést szenved, amely nem teszi lehetővé a repülés feltételeinek fenntartását, a fedélzeten tartózkodók sérülésének mérséklése érdekében a sárkányszerkezetbe már a tervezéskor be kell iktatni úgynevezett energiaelnyelő pontokat, amelyek nagyban hozzájárulnak a becsapódási energia csökkentéséhez. További védelmi megoldásként alkalmazható még a helikoptereken már sikeresen alkalmazott amortizációs ülések beépítése (9. ábra). Ezek az ülések a becsapódáskor keletkező energiák jelentős részét elnyelik.

9. ábra
Az Npp Zvezda által gyártott „Pamir" amortizációs ülés [11]

9.1.3. Mentőernyő használata

Az ejtőernyő a légi járművet és az utasokat is mentheti, ha bármilyen hiba vagy probléma merül fel.

9.1.4. Személyi mentőernyő használata

Kisszámú utas esetében (1–2 fő) lehetséges lehet a sportrepülőgépeken elterjedt mentőernyők alkalmazása, amely személyi felszerelésként használható. Hátránya, hogy csak abban az esetben lehetséges a biztonságos menekülés, ha a fedélzeten tartózkodók ismerik a gépelhagyás folyamatát és az ejtőernyő szakszerű használatát. A fentiekből következik, hogy ez a megoldás szinte kizárólag magáncélú felhasználás esetén jöhet szóba, megfelelő kompetenciákat és a légi jármű megfelelő szerkezeti kialakítását feltételezve. Amennyiben a légi jármű kialakítása nem teszi lehetővé annak biztonságos elhagyását lefelé (10. ábra), lehetőség van a katonai légi járművekhez hasonló vészelhagyásra.

10. ábra
A vészelhagyás lefelé nem lehetséges [11]

Ilyen megoldás lehet az NPP Zvezda által kifejlesztett STS-94 ejtőernyős rendszer (11. ábra) alkalmazása, amelyet kifejezetten sportrepülőgépekre fejlesztettek ki, de paraméterei révén más, könnyű repülőszerkezetekben vagy megfelelő kialakítás esetén eVTOL-okban is használható.

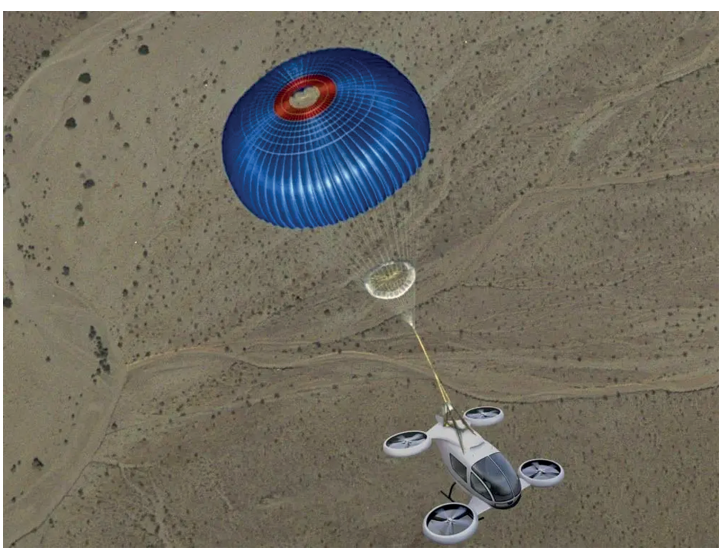
A rendszer működése a következő:

- a katapultfogantyú meghúzását követően az ülés, amely egy piropatronnal ellátott teleszkópos rúdhoz van csatlakoztatva, megemelkedik felfelé;
- az ülés tetején lévő fejtámla egyfajta „kosként" áttöri a kabin tetejét, és aktiválja a pilóta ejtőernyőjének nyitási folyamatát;
- ezt követően működésbe lép a kilövő mechanizmus, amely egy rakétára szerelt kötél és egy hám segítségével kirántja a pilótát a kabinból. Az egész folyamat 1–1,5 másodpercig tart (11. ábra).

11. ábra
Az orosz NPP Zvezda SKS-92 hevederes mentőrendszer [11]

9.1.5. Központi ballisztikus mentőrendszer alkalmazása

Abban az esetben, ha az előzőekben ismertetett vészhelyzeti evakuálási megoldások valamilyen okból nem alkalmazhatók, lehetőség van egy központi ballisztikus mentőrendszer alkalmazására (12. ábra).



12. ábra
Központi ballisztikus rendszer alkalmazása [11]

Ez a módszer abból áll, hogy a gép fedélzetén egy (vagy több) nagy teherbírású ejtőernyőt helyeznek el, amelyet vészhelyzet esetén kioldanak, így a légi jármű a fedélzeten tartózkodókkal együtt biztonságosan lehozható. A rendszer hátránya, hogy a mentőernyő felfúvódásához meghatározott magasság kell, ami a nagyvárosi környezetben vagy a fel- és leszállási műveletek közben nem mindig adott.

10. Összefoglalás

Az eVTOL légi járművek megfelelő tervezéssel, teszteléssel és biztonsági rendszerekkel kell hogy rendelkezzenek, amelyek garantálják a repülőgép és az utasok biztonságát. A városi légi mobilitási ágazat fejlődésének jelenlegi szakaszában nincs egyértelmű konszenzusos megoldás a különböző mentési és kárenyhítési problémákra. A gyártók különböző technológiákkal kísérleteznek, a beszállítók pedig olyan technológiákat próbálnak létrehozni vagy adaptálni, amelyek jobban megfelelnek a biztonsági igényeknek. Az érdekelt feleknek együtt kell működniük a Szövetségi Légügyi Hivatallal, az Európai Unió Repülésbiztonsági Ügynökségével, valamint más szabályozó szervezetekkel, hogy meghatározzák az emberek és az eVTOL légi járművek biztonságának előnyben részesített módját. Az egyik dolog, amiben az iparági szakértők egyetértenek, az, hogy a biztonság a legfontosabb, valamint a korai hibák ezen a fronton tartósan aláásható a közvélemény általi elfogadottság elnyerését.

Felhasznált irodalom

[1] European Commission, Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems. Online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0945

[2] European Commission, Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. Online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&rid=9

[3] *Volocopter VC200*. Online: https://lh5.googleusercontent.com/U9TfcREXAlwfUgt9ydHa4lKxvBPbQs8O7aGmr73uaApVyoQZ0ZBAAwxGvzUKP2GfQCeA7y-CHMJidTIiX0UKrnfFLPtrclek0SIMBP6Oaok0SG1eSLSdxLwcaTxz5F1txNU_3_VDb

[4] *VoloCity*. Online: www.volocopter.com/wp-content/uploads/VoloCity_Long-Shot-scaled-e1618221255516.jpg

[5] Földes A., Repülni is tud az új magyar busz. *Vezess,* 2020. január 23. Online: www.vezess.hu/magazin/2020/01/23/repulni-is-tud-az-uj-magyar-busz

[6] https://transportup.com/wp-content/uploads/2020/06/tu1-1.jpg

[7] https://i0.wp.com/assets.verticalmag.com/wp-content/uploads/2022/06/01_Joby-Aviation_Aircraft-1.jpg?resize = 640%2C457&ssl = 1

[8] https://s30121.pcdn.co/wp-content/uploads/2021/04/lilium_jet_7_seat_render_04.jpg.webp

[9] https://lilium.com/files/redaktion/refresh_feb2021/jet/mobile/00_engine_default.jpg

[10] https://s30121.pcdn.co/wp-content/uploads/2019/04/p1bper7s3l6lm1upte50f010a-085s0mh06.0pn0g.w0ebp00

[11] https://i0.wp.com/aeroautosales.com/wp-content/uploads/2022/03/evtol-safety-parachute.jpg?w = 1000&ssl = 1

Safety of the eVTOL aircraft

The development and widespread use of eVTOL vehicles has received significant attention in the aviation industry in recent years. The safety of eVTOL technology is a significant challenge for the industry. Its flight systems and infrastructure of these type of vehicles require continuous development. eVTOL vehicles should consider more safety aspects than traditional aircrafts, such as flying at lower altitudes, shorter takeoff and landing distances, and much higher traffic potential hazards.

Keywords: *eVTOL, Urban Air Mobility, safety, Advanced Air Mobility, safety integrity level, error rate, safety-critical system, reliability*

Terpecz Gábor
mérnöktanár
Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Elektronikai és Kommunikációs Rendszerek Intézet Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék
terpecz.gabor@uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0001-7899-2837

Gábor Terpecz, MSc
Engineering Teacher
Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering Institute of Electronic and Communication Systems Department of Instrumentation and Automation
terpecz.gabor@uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0001-7899-2837

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 101–114. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.8

Sándor Zsolt, Pusztai Máté

A polgári pilóta nélküli légi járművek EU-s és hazai képzési rendszere

A pilóta nélküli légi járművek felhasználását szabályozó és 2021. év elején bevezetett EU-s keretrendszer számos kötelező kompetencia meglétét előírja azok számára, akik ilyen eszközöket szeretnének használni. A cikkben a szerzők bemutatják az EU-s keretrendszert és az azt kiegészítő hazai részletszabályokat, amelyek az EU által mindössze általánosságban szabályozott területeket fednek le, további kötelezően teljesítendő kompetenciaelemekkel.

Kulcsszavak: *drón, drónpilótaképzés, távpilótaképzés, pilóta nélküli légijármű-rendszerek, kompetenciák, kockázatok, képzés*

1. Bevezető

A 2020. december 31. óta hatályos (EU) 2019/947 végrehajtási rendelet (a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról) a műveleteket repülésbiztonsági kockázat alapján sorolja különböző kategóriákba [1]. Az egyes kategóriák kifejezik, hogy légi közlekedési szempontból mennyire veszélyes egy-egy tevékenység, és meghatározzák, hogy a felmerülő kockázatok hogyan és milyen módon kezelhetők. Ezek alapján a műveleteket az alábbi kategóriákba lehet sorolni: „nyílt" *(open),* „speciális" *(specific)* és „engedélyköteles"[1] *(certified)* kategória.

A kockázatkezelés egyik eleme az, hogy a műveletet végrehajtó távpilóta és a számára segítséget biztosító megfigyelő milyen kompetenciákkal rendelkezik. Mielőtt ezeket a lehetőségeket részletesen áttekintenénk, nézzük meg, hogy a három említett kategóriának milyen főbb jellemzői vannak.

„Nyílt" kategória: Az ilyen kategóriában végrehajtott műveletek alacsony repülésbiztonsági kockázattal rendelkeznek. A kategóriában megvalósuló UAS-műveletek végrehajtása hasonló, mint amikor valaki részt vesz a közúti közlekedésben. A szükséges jogosítások birtokában, megfelelő eszközzel (UAS) a távpilóta, az UAS-t üzemben tartóra és az UAS-ra vonatkozó szabályok maradéktalan betartása mellett a légi közlekedési hatóság előzetes engedélye nélkül, szabadon használhatja a légteret (három alkategóriában, meghatározott tulajdonságú

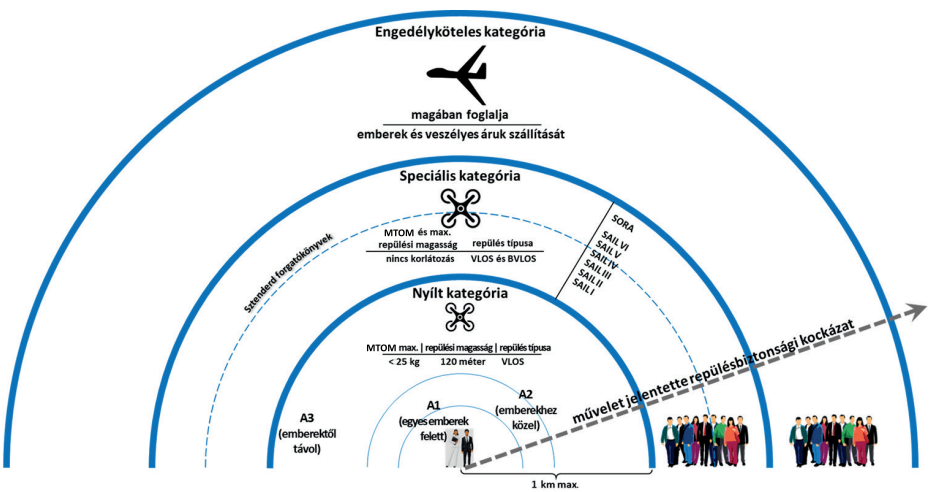
[1] Helyesebb lett volna, ha a magyar fordításban a tanúsításköteles kifejezés szerepel, amely szemléletesebb és egyben kifejezőbb is, ugyanis már a „speciális" kategória esetén is szükség van hatósági engedélyekre.

eszközökkel, elméleti és gyakorlati vizsgák birtokában, előre rögzített műveleti korlátok mellett – repülési magasság, eltávolodás, biztonsági védőtávolságok stb.).

„Speciális" kategória: A közepes repülésbiztonsági kockázattal rendelkező műveletek sorolhatók ide. A kategória átmenetet képez a két másik kategória között. Lényeges, hogy minden, ebbe a kategóriába tartozó műveletet engedélyeztetni kell (egyedileg a légi közlekedési hatóság által műveleti engedély útján, vagy LUC tanúsítvány birtokában az UAS-t üzemben tartó által). Azok a műveletek sorolhatók a kategóriába, amelyeket a „nyílt" kategóriában nem lehet végrehajtani, mivel a „nyílt" kategóriára vonatkozó korlátozó tényezők egyike vagy többsége nem tud teljesülni.

„Engedélyköteles" kategória: Rendkívüli repülésbiztonsági kockázatot jelentő műveletek tartoznak ide, amelyeket nagy teljesítményű és nagy méretű eszközökkel hajtanak végre, vagy a művelet jellege olyan, hogy a felmerülő kockázatok észszerűen nem csökkenthetők, így az előző két kategóriába nem lehet besorolni őket. Ebbe a kategóriába jellemzően az alábbi tevékenységek tartoznak: embertömeg feletti repülés, személyszállítás, veszélyes áru szállítása.

Az 1. ábra sematikusan szemlélteti, hogy a repülésbiztonsági kockázatok szempontjából hogyan helyezkednek el hierarchikusan az egyes kategóriák. Lényeges, hogy ennek megfelelően a távpilótáknak a felmerülő kockázatok hatékony csökkentése érdekében eltérő kompetenciákkal kell rendelkezniük.



1. ábra
Pilóta nélküli légijármű-rendszerek üzemeltetéséhez kapcsolódó műveleti kategóriák hierarchikus rétegződése [a szerzők]

2. Távpilóta-kompetenciák az EU-s jogrend alapján a „nyílt" kategória igénybevételéhez

Az (EU) 2019/947 végrehajtási rendelet két, egymásra épülő távpilótaképesítési formát és hozzá kapcsolódó követelményeket határoz meg, amelyek a „nyílt" kategória igénybevételéhez

kapcsolódnak [1]. Ezek a képzések olyan alapszintű kompetenciák elsajátítására terjednek ki, amelyek más kategóriák igénybevétele esetén is megkövetelhetők.

A két, szisztematikusan egymásra épülő távpilótaképzési forma illeszkedik a „nyílt" kategória alkategóriáihoz. Ennek megfelelően ismerni kell, hogy az adott UAS-művelet mely alkategória szerint valósul meg, és annak megfelelő kompetenciával kell rendelkezzen a távpilóta.

Az alkategóriáknak megfelelően a követelmények az alábbiak (lásd 1. táblázat).

1. táblázat

A „nyílt" kategória alkategóriáinak használatához kapcsolódó személyi és műszaki követelmények [a szerzők]

Alkategória	Alkategória ismérve	Legnagyobb felszállótömegre (MTOM) vonatkozó korlátozások	Személyi követelmény
A1	Egyes emberek felett át lehet repülni, de lebegni nem lehet, és az embertömeg feletti repülés is tilos.	MTOM < 900 g (C1 UA osztály esetén) MTOM < 250 g (saját építésű drónok és C0 UA osztály esetén) MTOM < 500 g (osztályazonosító nélküli drónok 2024. 01. 01-ig) reptethetők.	UAS.OPEN.020 szerinti igazolás online vizsga teljesítéséről.
A2	Emberek mellett, biztonságos távolságban (30 m, illetve 5 m > alacsony sebességű üzemmód esetén [átmeneti időszakban 50 m-es biztonsági védőtávolság szükséges]).	MTOM < 4 kg (kizárólag C2 UA osztály) vagy osztályazonosító nélküli 2 kg alatti MTOM-mel rendelkező eszközök 2024. 01. 01-ig reptethetők.	UAS.OPEN.030 szerinti kompetenciatanúsítvány.
A3	Emberektől és épített infrastruktúrától távol min. 150 m-re.	MTOM < 25 kg (25 kg alatti saját építésű drón, C0-C2, C3 vagy C4 UA osztály).	UAS.OPEN.020 szerinti igazolás online vizsga teljesítéséről.

Látható, hogy az A1 és A3 alkategóriában megvalósuló műveletek esetén – amelyek alacsony kockázati besorolásúak – elegendő az UAS.OPEN.020 szerinti igazolás az online vizsga teljesítéséről. Amennyiben a művelet A2 alkategória szerinti üzemben valósul meg, úgy már a távpilótának szüksége van a kompetenciatanúsítványra.

Mivel ezek a kompetenciák a teljes EGT[2] térségében és – nemzetközi szerződés alapján – Svájcban azonosak, így a kölcsönös elfogadás értelmében bármely tagállamban megszerzett online vizsgaigazolás vagy kompetenciatanúsítvány egy másik tagállamban is érvényes, így ezek megszerezhetők külföldön is.

A kompetenciák meglétét sikeres vizsgával lehet igazolni, amely vizsgákat minden tagállam kijelölt intézménye biztosít. Sikeres vizsga esetén a vizsgázó egy kártya formátumú igazolást kap, amelyet jellemzően digitálisan küldenek meg. Ez digitálisan és kinyomtatva is érvényes. Bármely vizsgaigazolás a sikeres vizsgától számítva 5 évig érvényes. Ezt meghosszabbítani újbóli vizsgázással lehet.

A kiállított igazoláson szerepel a tulajdonosának a neve, igazolványának egyedi azonosítója és az érvényességi ideje (sikeres vizsgától számított 5 év), valamint az igazolás típusa, miszerint távpilóta online képzés teljesítéséről vagy kompetenciatanúsítványról van szó az UAS.OPEN.020 vagy UAS.OPEN.030 jogszabálypont alapján.

[2] Európai Gazdasági Térség: az Európai Unió, valamint Norvégia, Liechtenstein és Izland.

2.1. UAS.OPEN.020 szerinti online vizsgaigazolás

Ez egy *alap* elméleti képzést követően teljesíthető vizsga. A vizsga teljesítéséhez szükséges, hogy a vizsgázó rendelkezzen a vizsga témakörét lefedő 9 tantárgyhoz kapcsolódó alapszintű ismeretekkel. A tantárgyak az alábbiak, megjelölve a főbb tématerületeket:

- *repülésbiztonság:* kockázatok a repülésben, az alapvető biztonsági garanciák teljesítésének és kisegítésének módjai;
- *légtérkorlátozások:* a légtér struktúrája, légtértípusok és az egyes légterekben történő repülési szabályok és felhasználási módok, a repülés végrehajtásának szempontjából;
- *légi közlekedés szabályozása:* az alapvetően betartandó szabályok a légterek használatához;
- *emberi teljesítőképesség határai:* azon tényezők összessége, amelyekre fiziológiai és mentális szempontból a távpilótának figyelemmel kell lennie a művelet elvégzése során, és annak képessége, hogy vizsgálni tudja saját alkalmasságát a művelet fizikai lebonyolításával kapcsolatosan;
- *operatív eljárások:* egy adott művelet biztonságos végrehajtásához szükséges repülési eljárások összessége, amelyek befolyásolják a művelettel kapcsolatos biztonságot;
- *általános UAS-ismeretek:* UAS-típusok és azok részegységeinek ismerete, különböző típusok alapvető műszaki felépítése, az egyes konstrukciók előnyei és hátrányai;
- *magánélet tiszteletben tartása és az adatvédelem:* annak biztosítása, hogy a művelet ne okozzon problémát azoknak, akik a műveletbe nincsenek bevonva, továbbá a gyűjtött adatok jogszerű felhasználási módjainak ismerete;
- *biztosítás:* kötelező felelősségbiztosításhoz kapcsolódó ismeretek;
- *védelem:* nemkívánatos külső behatásokkal szembeni intézkedések, amelyekkel megakadályozható a veszélyes jelenségek kialakulása.

A képzés bármely EU-s tagállamban elvégezhető,[3] a tématerületek mindenhol azonosak, eltérés csak a nemzeti sajátosságok megjelenésében és alkalmazási követelményében lehet. Az elméleti tananyag minden országban a saját nemzeti nyelven elérhető, plusz még esetleg angolul is. A képzések ingyenesen, online, e-learning formájú képzésben teljesíthetők. Magyarországon a képzést hivatalosan a Közlekedéstudományi Intézet biztosítja, mint olyan szereplő, aki a légi közlekedési hatóság általi akkreditációt a tevékenységre megszerezte.[4] Ettől függetlenül számos piaci szereplő folytat vizsgafelkészítést a témában, ami nem szabályellenes.

A képzéshez kapcsolódó vizsga a legtöbb tagállamban online teljesíthető, a kapcsolódó tananyag áttanulmányozását követően, a személyes adatok megadásával, nemzeti nyelven vagy esetleg angolul is. Hazánkban a vizsgát a Közlekedési Alkalmassági Vizsgaközpontnál (KAV) lehet elvégezni, személyes megjelenéssel, és 4600 Ft-os vizsgadíj befizetésével [2]. A vizsgán 40 feleletválasztós kérdésből kell legalább 30-at helyesen megválaszolni [1].

A vizsgaigazolás birtokában a távpilóta alapvetően hobbi tevékenységekre tudja használni a drónt A1 és A3 alkategóriába tartozó műveletekhez. Az okmány mintáját a 2. ábra szemlélteti.

[3] Az egyes tagállamok, persze az adott tagállamban érvényes lakcímhez köthetik az online képzésre és vizsgára jelentkezést (pl. Németország).

[4] Lásd: www.kozlekedesihatosag.kormany.hu/hu/dokumentum/288647 www.kozlekedesihatosag.kormany.hu/hu/dokumentum/289800.

2. ábra
UAS.OPEN.020 igazolás minta [3]

2.2. UAS.OPEN.030 szerinti kompetenciatanúsítvány

Amennyiben a távpilóta olyan műveletet szeretne végrehajtani, amelyet az A1 és A3 alkategória szabályai szerint nem lehetséges, viszont az A2 alkategóriában még végrehajtható, akkor ezt csak kompetenciatanúsítvány birtokában teheti meg. Ez a kompetencia az online vizsgaigazolás meglétén túl, további három elméleti tárgyból való ismeretelsajátítást követően letett vizsga és a kötelező, önállóan teljesített gyakorlatról[5] szóló nyilatkozat birtokában szerezhető meg. A három kiegészítő tárgy az alábbi:

- *meteorológia:* időjárási ismeretek, amelyek lényegesek ahhoz, hogy a távpilóta azonosítani tudja az UAS-műveleteket befolyásoló környezeti körülményeket, és ismerje ezek rövid- és hosszú távú hatásait (szél, hőmérséklet, légnyomás stb.). A témához tartozik az is, hogy a távpilóta értelmezni tudja a meteorológiai táviratokat is (TAF, METAR stb.);
- *UAS repülési teljesítménye:* a különböző környezeti és műszaki tényezők hatásai a művelet elvégzésére, a távpilóták számára rendelkezésre álló műszaki lehetőségek kiválasztásának ismérve, figyelembe véve az egyes részegységek által biztosított megoldásokat és a korlátozó feltételeket;
- *földi kockázat technikai és operatív jellegű csökkentése:* az UAS használata komoly kockázatokat jelenthet a földön tartózkodókra, így szükséges, hogy a távpilóta megfelelő ismeretekkel rendelkezzen arról, hogy a felmerülő kockázatokat az elérhető műszaki

[5] Gyakorolni az online vizsgaigazolás birtokában, A3 műveleti környezetben lehet, ismerve a felhasználandó UAS használati útmutatóját és a drón üzemeltetési tulajdonságait.

eszközök érdemben hogyan csökkentik, és milyen megoldások állnak rendelkezésre, amelyek nem műszaki intézkedésekkel képesek a művelettel összefüggő kockázatokat csökkenteni.

A kompetenciatanúsítvány megszerzéséhez szükséges elméleti ismeretek elsajátításához nincs kijelölt szervezet, helyette piaci alapon működő képzőszervezetek biztosítják a tanfolyamokat, változatos képzési formákban, de a jelölt akár képzőszervezet bevonása nélkül, önállóan, *egyéni felkészülés* útján is elsajátíthatja a vizsgához szükséges tudást. Az elméleti vizsgát Magyarországon szintén a KAV biztosítja, ahol személyes megjelenéssel és 4600 Ft-os vizsgadíj befizetésével lehet vizsgázni [2]. A vizsgán 30 feleletválasztós kérdésből kell legalább 23-at helyesen megválaszolni [1].

Kompetenciatanúsítvány birtokában a távpilóta kisebb távolságot tarthat a műveletbe nem bevont személyekhez, megfelelő UAS-használat esetén akár 5 m-re is megközelítheti őket, az adott helyzet értékelését követően. A kompetenciatanúsítvány birtokában a teljes „nyílt" kategória használhatóvá válik, a vonatkozó szabályok betartása mellett. Az okmány mintáját a 3. ábra szemlélteti.

3. ábra
UAS.OPEN.030 igazolványminta [3]

3. Távpilóta-kompetenciák az EU-s jogrend alapján, a „nyílt" kategórián túli műveletekre

Az EU meghatározott néhány olyan művelettípust, amelyek a „nyílt" kategórián túlmutatnak és „speciális" kategóriájúnak minősülnek. Bizonyos „speciális" kategóriájú műveletek esetén azonban jogszabályi szinten biztosítja, hogy azon UAS-t üzemben tartók, akik ilyen, úgynevezett standard forgatókönyv szerinti műveleteket hajtanak végre, mentesülnek a műveleti engedély megkérése alól. Ennek feltétele, hogy az UAS-t üzemben tartónak be kell tartania

az adott forgatókönyv szerinti intézkedéseket, és a műveletet végrehajtó távpilótának rendelkeznie kell azokkal az elméleti és gyakorlati kompetenciakövetelményekkel, amelyeket a jogszabály meghatároz. Ezek a könnyítő intézkedések 2024 januárjától lesznek elérhetők [1].

Ennek megfelelően a már kidolgozott két standard forgatókönyvhöz (STS-01[6] és STS-02[7]) a vonatkozó EU-s jogszabály meghatározta, hogy pontosan milyen *elméleti és gyakorlati követelményeknek* kell eleget tennie a műveletet végrehajtó távpilótának.

Az elméleti ismeretek mind a két művelettípus esetén azonosak, és hasonlóan a „nyílt" kategóriához, ebben az esetben is vizsgával kell igazolni a tudást. Az elméleti tudást az úgynevezett *standard forgatókönyvek szerinti üzemeltetéshez szükséges elméleti ismeretekről szóló tanúsítvány* igazolja.

A tanúsítvány megszerzéséhez a távpilótának rendelkeznie kell az UAS.OPEN.020 szerinti online vizsgaigazolással vagy az UAS.OPEN.030 szerinti kompetenciatanúsítvánnyal, és ezt követően önállóan vagy szakosított képzőszervezetnél további elméleti ismereteket kell elsajátítania. Ezt követően a légi közlekedési hatóság által kijelölt (akkreditált) szervezetnél vizsgát kell tennie, amely 5 vagy 8 tárgyból és 30 vagy 40 feleletválasztós kérdésből áll, attól függően, hogy a távpilóta online vizsgaigazolással vagy kompetenciatanúsítvánnyal rendelkezik.[8] Az eltérés oka az, hogy egyes területeken átfedés van az STS és a nyílt kategóriás vizsga tantárgyai között. Az így megszerzett tanúsítvány a sikeres vizsgától számított 5 évig érvényes – az okmányok mintáit a 4. ábra szemlélteti. Ezt meghosszabbítani újbóli vizsgázással vagy hatóság által is elfogadott szervezetnél megvalósuló ismeretfrissítő képzésen való részvétellel lehet.

Az elméleti vizsgával érintett tantárgyak:

- légi közlekedés szabályozása;
- emberi teljesítőképesség határai;
- operatív eljárások;
- földi kockázat technikai és operatív jellegű csökkentése;
- általános UAS-ismeretek;
- meteorológia;
- UAS repülési teljesítménye;
- légi kockázat technikai és operatív jellegű csökkentése.

A gyakorlati ismeretek igazolása jártassági vizsga alapján történik, a jogszabályban lefektetett kompetenciák ellenőrzése mentén, amelyet hatóság által elfogadott gyakorlati képzést és értékelést végző szervezetek vagy UAS-t üzemben tartók állíthatnak ki, részletes, igazolt és visszakövethető gyakorlati képzést követően.

Lényeges, hogy EU-s jogrend szerinti kompetencia lévén a kölcsönös elismerés jogintézménye ebben az esetben is működik, így bármely tagállamban megszerezhető a tanúsítvány

[6] STS-01 – VLOS ellenőrzött földi műveleti terület felett, lakott környezetben C5 osztályazonosítóval rendelkező UAS esetén.

[7] STS-02 – EVLOS légtérmegfigyelők közreműködésével, ellenőrzött földi műveleti terület felett, ritkán lakott környezetben C6 osztályazonosítóval rendelkező UAS esetén.

[8] Hazánkban még nincs ilyen kijelölt szervezet, és nincs STS-re vonatkozóan elérhető vizsga. Egyes EU-s országok már biztosítják a vizsgát.

és a jártassági vizsga,[9] a megszerzésének feltételei mindenhol azonosak, a vizsgák témakörei is megegyeznek.

4. ábra
STS elméleti ismeretek megszerzését igazoló okmányminta [4]

4. Távpilóta-kompetenciák a speciális kategóriában

Amennyiben „speciális" kategóriájú műveletet hajt végre az UAS üzemben tartója, és nem STS szerinti műveletet kíván teljesíteni, úgy részletes kockázatelemzést kell végrehajtania az EU által elfogadott JARUS-SORA módszertan alapján [5]. A módszertan az (EU) 2019/947 végrehajtási rendelet mellé kiadott, úgynevezett a megfelelőség elfogadható módozata és egyéb segédanyagok dokumentumban (AMC&GM[10]) érhető el [6]. A módszertan a művelet végső földi és légi kockázatai alapján határoz meg úgynevezett operatív biztonsági célokat, amelyeket a művelet eredő kockázata alapján különböző megalapozottsági szinteken kell az UAS üzemben tartójának kielégítenie. E célok között számos olyan is megtalálható, amely kifejezetten a távpilóta elméleti és gyakorlati kompetenciáira vonatkozik (például személyzeti együttműködés, kedvezőtlen időjárási körülmények között megvalósuló UAS-üzemeltetés stb.). Mivel a kompetenciatanúsítványon felül további EU-s megszerezhető kompetenciák nem elérhetők – leszámítva az STS-műveletekhez kapcsolódó elméleti ismereteket –, így a SORA módszertan alkalmazása révén megkövetelt extra elméleti és gyakorlati ismeretek megszerzésének módja az UAS üzemben tartójára van bízva. Maga a módszertan lehetővé teszi az egyéni felkészülést és az önbevallás alapján való igazolást is, azonban lényeges, hogy a távpilóták kompetenciaalapú – szervezet által biztosított vagy szervezeti keretek között megvalósított[11] – képzésben részesüljenek, és legalább ismerjék azt, hogy pontosan milyen műveletet, milyen eszközzel és hogyan fognak végrehajtani, adott esetben milyen kiegészítő berendezések felhasználásával.

[9] Accreditation of Completion of the Practical Skill Training.
[10] Acceptable Means of Compliance and Guidance Materials.
[11] Amelyet adott esetben az UAS-t üzemben tartó saját maga is megtarthat.

5. Távpilóta-kompetenciák a magyar jogrend alapján, a „nyílt" kategórián túli műveletekre

A már említett (EU) 2019/947 végrehajtási rendelet csak a „nyílt" kategóriára vonatkozóan tartalmaz kötelezően elérendő minimum távpilóta-kompetenciákat – kivéve a sztenderd forgatókönyvek alapján megvalósítandó műveleteket.[12] Így a „speciális" és „engedélyköteles/tanúsításköteles" kategória esetén az engedélyt kiadó tagállami hatóság döntési jogköre, hogy ő pontosan milyen többletkompetenciákat vár el a „nyílt" kategórián túli műveletek esetén. Az adott művelet típusától függően ezek lehetnek generális vagy egyedi, azaz műveletspecifikus többletkövetelmények. Az előző fejezetben említett SORA-módszertan alapján az UAS üzemben tartójának a „speciális" műveleti kategóriában további követelményeket kell kielégítenie a távpilótára vonatkozóan. A magyar jogrendbe beépített kompetenciakövetelmények egyfajta válaszként szolgálnak e kötelezettségekre.

A „speciális" kategóriájú műveletek magasabb repülésbiztonsági kockázatokat hordoznak magukban, ugyanis e műveletek során már lehetőség van az alábbiakra:

- művelet végrehajtása 25 kg-ot meghaladó maximális felszállótömeggel rendelkező UAV-val;
- látótávolságon túli műveletek (BVLOS) elvégzése;
- kijuttatással járó (növényvédelmi) műveletek elvégzése, amely során az UAV kiszór bizonyos anyagot;
- eltérés az 1:1 védőtávolsági szabálytól, és annál szűkebb biztonsági védőtávolságok alkalmazása;
- talajfelszíntől számított 120 m-nél magasabban végrehajtott műveletek.

Mivel ezek a műveletek a repülésbiztonsági kockázatuk miatt többlet elméleti és gyakorlati ismereteket igényelnek, így szükséges, hogy csak megfelelően és igazoltan képzett távpilóták hajtsák végre.

„Speciális" kategóriájú művelet esetén a kompetenciatanúsítvány megléte – a kialakult hatósági gyakorlat alapján – alapkövetelmény, mivel a kockázatokról és azok csökkentési lehetőségéről igazolt módon csak azok rendelkeznek ismeretekkel, akiknek van ilyen tanúsítványa. Ezen túlmenően a hazai jogszabályok kijuttatással járó növényvédelmi (permetezési) műveletekhez még két további kompetencia meglétét is előírják, aminek előfeltétele a mezőgazdasági pilóta nélküli légi jármű irányítói nyilvántartásba való bejegyzése, amely alapján a távpilóta növényvédelmi beavatkozás végrehajtására jogosult műveleti engedély birtokában:

- pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolvány [2], [3], és
- NÉBIH-féle növényvédelmi drónpilóta végzettség, és a megszerzését követően kétévenként kötelező továbbképzésen való részvétel [7].

[12] E műveleti kategóriára vonatkozóan a hazai jogrend nem tud további kompetenciabeli többletkövetelményeket megfogalmazni, így csak az uniós kötelezettségek várhatók el egy távpilótától.

5.1. Pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolvány

A hazai jogrend alapján elismert távpilóta-képesítés, amely a kompetenciatanúsítványon túli további kiegészítő elméleti ismeretek és gyakorlati készségek elsajátítását biztosítja. Az igazolvány megszerzését biztosító felkészítő tanfolyamokat a légi közlekedési hatóság által akkreditált képzőszervezetek nyújtják. A képzéseknek kötött tematikája és óraszáma van [2], [3].

A képzés célja, hogy a távpilóta multikopterrel történő „speciális" kategóriájú UAS-műveletek végrehajtásához megfelelő tudással és gyakorlattal rendelkezzen, azok biztonságos elvégzése érdekében.

Bár a képzés jelenleg csak a kijuttatással járó növényvédelmi műveletekhez kötelező, azonban az átadott ismeretek birtokában a távpilóta képessé válik további tevékenységek elvégzésére, amelyek „speciális" kategóriába tartoznak.

A képzésen csak érvényes UAS.OPEN.030 kompetenciatanúsítvánnyal rendelkezők vehetnek részt, így biztosított, hogy a megfelelő elméleti tudás mint előkövetelmény rendelkezésre áll.

Az igazolvány megszerzéséhez elméleti és gyakorlati (hatósági) vizsgát kell tenni, amelyet a KAV biztosított. Az elméleti vizsga személyes megjelenést igényel, amely során a jelöltnek a 60 feleletválasztós kérdésből a sikerességhez 45-öt kell helyesen megválaszolnia. A gyakorlati vizsgát a képzőintézmény szervezi, és a képzési helyszínen kell vizsgázni a sikeres elméleti vizsgát követően, a KAV által kirendelt vizsgabiztos jelenlétében, aki biztosítja a vizsga hatósági jellegét. Lényeges, hogy a gyakorlati vizsgafeladatok és azok értékelési keretrendszere is előre ismertek, azok a hatóság oldalán elérhetők a képzéshez kapcsolódó dokumentumok között [3].

5. ábra
Pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolványminta [3]

A megszerzett igazolványt (mintáját az 5. ábra szemlélteti) külföldön automatikusan nem ismerik el, mivel erre vonatkozóan kölcsönös elismerési megállapodás nem áll rendelkezésre, és az EU-s jogszabályokban nincs nevesítve a kompetencia. Így ezt csak egyedileg lehet elismertetni, külön eljárás keretében, ha erre szükség van. Ez azt jelenti, hogy a másik tagállam hatósága a műveleti engedély benyújtása során egyedileg vizsgálja meg a távpilóta

kompetenciáit, és dönt arról, hogy ez a képzés elegendő tudást biztosít-e a távpilótának a műveleti engedély iránti kérelemben foglalt műveletek elvégzésére.

A pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolvány a kapcsolódó vizsga sikeres teljesítésének időpontjától számított 5 évig hatályos. Ezen időn belül új vizsgát lehet letenni, amelynek sikeressége esetén újabb 5 évvel meghosszabbodik az igazolvány hatálya.

5.2. Növényvédelmi drónpilóta végzettség

Annak érdekében, hogy a kijuttatást is magában foglaló növényvédelmi drónműveleteket végrehajtó távpilóták megfelelő növényvédelmi ismeretekkel rendelkezzenek, lényeges, hogy további, a szakma növényvédelmi részét elsajátító képzésben részesüljenek. A NÉBIH által elfogadott és akkreditált, úgynevezett NÉBIH-féle növényvédelmi drónpilóta végzettség – amely egy speciális szakképesítés, szakmát adó képesítés – ezt biztosítja, és célja, hogy a pilóta nélküli légi járművel kijuttatással járó növényvédelmi műveletet csak olyan személy végezzen, aki a szükséges növényvédelmi és UAS műszaki ismereteknek és gyakorlati képességeknek egyaránt birtokában van [8].

Ez a képesítés a pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolványra épül, a képzés csak az igazolvány birtokában kezdhető meg. Lényeges, hogy az elméleti és gyakorlati képzést a NÉBIH által akkreditált képzőszervezetek végzik [9], és a kapcsolódó, személyes megjelenéssel járó vizsgát, amely elméleti és gyakorlati részből áll, akkreditált vizsgaközpontok biztosítják. Mivel hazánkban számos akkreditált vizsgaközpont található, így a vizsgák (tartalmukat és díjukat tekintve) képző szervezetenként és vizsgaközpontonként eltérők lehetnek. A képzés során lehetőség van arra, hogy annak elméleti része kizárólag távoktatásban is megvalósuljon.

A képzés hierarchikusan illeszkedik a hazai rendszerbe, így teljesítéséhez számos előkövetelmény kapcsolódik:

- a jelöltnek rendelkeznie kell érvényes pilóta nélküli légi jármű irányítói igazolvánnyal;
- B kategóriás jogosítvánnyal, amely az egészségügyi alkalmasság igazolását is biztosítja;
- érettségivel vagy speciális középfokú szakmai végzettséggel[13] kell rendelkeznie;
- FVM rendeletben előírt minimális szakmai követelmény, hogy rendelkezik alapfokú növényvédelmi képesítéssel (igazolás 80 órás zöld könyves növényvédelmi alaptanfolyam elvégzéséről).

Lényeges, hogy a megszerzett végzettség nem évül el, azonban a mezőgazdasági pilóta nélküli légi jármű irányítói nyilvántartásban szereplő személynek kétévenként kötelező a NÉBIH által kijelölt szervezetek valamelyikénél igazolt módon továbbképzésen részt vennie, és ezt követően vizsgáznia. Erről tanúsítványt kap, amelyet a NÉBIH-nek bemutatva a kétéves jogosultság újraindul. A továbbképzés és a vizsga elmaradása esetén a távpilótát a nyilvántartásból törlik.

[13] Mezőgazdaság és erdészet vagy Gépészet vagy Specializált gép- és járműgyártás vagy Informatika és távközlés ágazatokban szerzett középfokú szakmai végzettség.

6. Egyéb kompetenciák a pilóta nélküli légi járművek használatához

Előfordulhatnak olyan speciális repülési és szervezeti feladatok, amikor szükséges, hogy a műveletet végrehajtó távpilóta, vagy maga az UAS üzembentartását biztosító szervezet (és ott a repülés végrehajtását támogató személyek) rendelkezzen további kiegészítő (nem csak és kizárólag repülési) kompetenciákkal. Ezeket „speciális" kategóriájú műveletek esetén akár a légi közlekedési hatóság is előírhatja (illeszkedve a SORA-módszertanhoz), de lényeges, hogy megszerzésükről nem feltétlen kell hatósági akkreditációval rendelkező jogalanytól igazolást szerezni. Egyes esetekben az is elegendő lehet, ha az UAS üzemben tartója saját hatáskörben igazolja, hogy meghívott oktatókkal, felnőttképző szervezetnél vagy bármilyen más módon történtek meg az oktatások, és így a szükséges ismeretek birtokában vannak a kijelölt személyek. Utóbbi ellenőrzéséhez az UAS üzemben tartója szervezhet belső vizsgákat, kompetenciaalapú méréseket is. Ezek eredményei – amennyiben a vizsgák teljesítménye meghaladja az előzetesen meghatározott sikerkritériumokat – akkor alkalmasak arra, hogy az UAS-t üzemben tartó igazolni tudja a hatóság irányába az ismeretek rendelkezésére állását. A speciális és kiegészítő ismeretek igénye jellemzően „speciális" kategóriába tartozó műveletek során merül fel, hiszen ekkor ellenőrzi a hatóság az UAS-t üzemben tartókat, és ekkor lehet megfogalmazni a „nyílt" kategórián túlmutató ismeretekre vonatkozó követelményeket.

Az így megszerzendő extra kompetenciák egy része műszaki jellegű és közvetlenül a repülés lebonyolításához kapcsolódik, míg vannak olyan ismeretek, amelyek a szervezet működéséhez, illetve interperszonális tulajdonságokhoz kapcsolódnak. Az alábbiakban néhány példát sorolunk fel.

Extra műszaki ismeretek:

- típusismeret;
- üzemeltetési és karbantartási ismeretek;
- fónia és repülési rádióhasználati ismeretek;
- kiegészítő rendszerek használatára vonatkozó ismeretek (katapult, ejtőernyő, külsős kommunikációs rendszerek).

Szervezeti és nem műszaki extra ismeretek:

- compliance ismeretek;
- repülésbiztonsági és kockázatelemzési ismeretek;
- légi jogi ismeretek, kiemelten a műveletek lebonyolítására és a szervezet belső működésére vonatkozóan;
- idegennyelv-ismeret;
- biztonsági és védelmi ismeretek;
- védelmi tudatossági ismeretek;
- munkavédelmi ismeretek;
- elsősegélynyújtási ismeretek.

További interperszonális ismeretek és kompetenciák:

- személyzeti együttműködés (MCC);
- emberi tényezők ismerete;

- asszertív és együttműködő kommunikáció;
- csapatmunka.

Az „engedélyköteles" kategória feltételrendszere jelenleg is kidolgozás alatt áll, azonban a műveletek jelentette jelentős kockázatok miatt ebben a kategóriában feltehetőleg elvárt lesz, hogy a távpilóta rendelkezzen a hagyományos légi járművek vezetéséhez hasonló szakszolgálati engedéllyel és típusjogosítással, valamint egyéb kompetenciákkal is, amelyek alapján alkalmas lesz a légiforgalmi irányítókkal való kommunikációra is.

7. Összefoglaló

Az eltérő műveleti kategóriákban megvalósuló UAS-műveletek a kockázatuk szempontjából más-más kompetenciákat igényelnek. Ennek megfelelően a „nyílt" kategórián túli műveletek esetén a tagállami hatóságokra is jelentős szerep hárul a műveleti engedélyek és a könnyű UAS-t üzemben tartói tanúsítványok kiadása kapcsán, ugyanis meg kell határozniuk, hogy a műveletek végrehajtásához a távpilótáknak milyen kompetenciakövetelményeket kell kielégíteniük.

Várható, hogy a jövőben további speciális tanfolyamok jelennek meg, amelyek kiemelten egy-egy művelettípushoz kapcsolódóan biztosítanak megszerezhető ismereteket, és ezzel együtt az is várható, hogy a képzési és jogszabályi követelményrendszer is kiszélesedik. Utóbbi nagyobb mértékű differenciálódást tud biztosítani, és elképzelhető, hogy ennek megfelelően szakosított drónpilóták is lesznek, akik a megszerzett képesítéssel egy-egy jól körülhatárolt feladatot fognak tudni ellátni (például permetezés, filmezés, épületfelmérés, kábelbehúzás stb.). Ez némileg hasonlíthat a hagyományos pilótáknál elérhető különböző szakszolgálati engedélyekre és típusképzésekre, amelyek birtokában az egyes pilóták eltérő tevékenységeket végezhetnek és eltérő légi járműveket vezethetnek, a jogosításaik alapján.

Felhasznált irodalom

[1] A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról
[2] 6/2021. (II. 5.) ITM rendelet a távoli pilóták képzését és vizsgáztatását végző szervezetek kijelöléséről, a távoli pilóták képzésének és vizsgáztatásának részletes szabályairól, valamint a vizsgán való részvétel díjáról
[3] A pilóta nélküli légijármű-rendszerek távpilótáinak vizsgaszabályzata 2023. Második kiadás, 2023. március 24. Online: www.kozlekedesihatosag.kormany.hu/hu/dokumentum/208222
[4] https://eudrohnenpruefung.de/blogs/aktuell/easa-sts-theorie-zertifikat
[5] Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems, *JARUS Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)*. 2019. január 30. Második kiadás. Online: https://uas.gov.ge/dashboard/pdf/SORA%20methodology%20SAIL%20Step%209.pdf
[6] EASA, ED DECISION 2022/002/R, 2022. február 9. Online: www.easa.europa.eu/document-library/agency-decisions/ed-decision-2022002r

[7] 44/2005. (V. 6.) FVM-GKM-KvVM együttes rendelet a mező- és erdőgazdasági légi munkavégzésről
[8] Innovatív Képzéstámogató Központ, A 08104005 számú Növényvédelmi drónpilóta megnevezésű szakképesítés megszerzésére irányuló szakmai képzéseket megalapozó programkövetelmény. Online: https://api.ikk.hu/v1/media/documents/7773?filename = N%C3%B6v%C3%A9nyv%C3%A9delmi-dr%C3%B3npil%C3%B3ta-2023.02.02.-v3.pdf
[9] https://portal.nebih.gov.hu/adatbazisok-noveny#N%C3%B6v%C3%A9nyv%C3%A9delem

Training Framework of the Civil Unmanned Aircraft Systems in the EU and Hungary

The EU framework that regulates the use of unmanned aerial vehicles introduced at the beginning of 2021 requires a number of mandatory competencies for those who wish to use such devices. The authors present the EU framework and the supplementary Hungarian detailed rules in the article. The EU regulations cover areas that are generally regulated, and the Hungarian rules cover the uncontrolled areas where additional competence elements need to be met.

Keywords: *drone, drone training, drone law, competency based training, risks, UAV missions*

Dr. Sándor Zsolt
légi közlekedési szakértő
Drone Operations Hungary Kft.
zsolt.sandor1@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7117-9069

Zsolt Sándor, PhD
Aviation Expert
Drone Operations Hungary Ltd.
zsolt.sandor1@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7117-9069

Dr. Pusztai Máté
légi közlekedési szakértő
Drone Operations Hungary Kft.
pusztai.mate988@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6983-4554

Máté Pusztai, PhD
Aviation Expert
Drone Operations Hungary Ltd.
pusztai.mate988@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6983-4554

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 115–130. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.9

Kiss Beatrix, Palik Mátyás

A drónok katonai alkalmazása modern katonai műveletek során

A dróntechnológia életünk rengeteg területén megjelent már és számtalan diszciplína kutatási tárgyává vált, mint a logisztika, média és politika, etika, jog, és még hosszasan sorolhatnánk a tudományágakat, amelyek foglalkoznak ezzel a témával. Napjaink katonai műveleteiben is jelentős szerepet töltenek be a különböző pilóta nélküli légi járművek,[1] amelyek már a 2000-es évek során megjelentek Afganisztánban. A kezdeti szárnypróbálgatások óta jelenlétük más autonóm rendszerekkel együtt, párhuzamosan az elektronikai és kiberhadviselés térnyerésével forradalmi változásokat idézett elő a modern hadszíntereken. A publikációban a pilóta nélküli légijármű-rendszerek[2] alkalmazását és az abban megjelenő eltéréseket, hasonlóságokat mutatjuk be két esettanulmányon keresztül. De vajon a drónok alkalmazása valóban sorsdöntő fölényt jelent-e egy fegyveres konfliktus során? Célunk az elmúlt évtizedben zajló, az európai hadi-technikai beszerzéseket is befolyásoló háborúk elemzése, elsősorban a természetük és a drónok alkalmazása közötti kapcsolat felvázolása.

Kulcsszavak: *Ukrajna, Oroszország, Örményország, Azerbajdzsán, Hegyi-Karabah, pilóta nélküli légi jármű, UAV, UCAV*

1. A drónokról általában

Ami a drón fogalmát illeti, nincs egyetemesen elfogadott definíciója. Dr. Szegedi Péter megfogalmazása jól tükrözi komplikáltságukat: „Ezek a szerkezetek összetett, a technológiák fejlődését tükröző, műszaki alkotások, melyekben a mechanika, hidraulika, elektrotechnika, irányítástechnika, elektronika, informatika stb. ismeretei ötvöződnek" [1]. A folyamatban lévő forradalmi tudományos és technikai fejlődés hajtómotorja a tudományágak és technológia egymásra gyakorolt hatása. A pilóta nélküli platformok esetében a mesterséges intelligencia, robottechnika, nanotechnológia és műholdas kommunikáció játszanak kulcsszerepet.

A NATO-tagállamok által elfogadott és alkalmazott definíció alapján: „Egyszer vagy többször felhasználható, vezető nélküli, meghajtott légi jármű, mely repüléséhez aerodinamikai erőket használ. Távirányítással, programozott önirányítással, illetve kombinált irányítással működhet, képes halálos vagy nem halálos teher hordozására" [2].

[1] Unmanned Aerial Vehicle (UAV).
[2] Unmanned Aircraft System (UAS).

A pilóta nélküli légi jármű, mai szóhasználattal élve a drón, magát az úgynevezett légi platformot jelöli. Azonban az eszköz üzemeltetéséhez szükség van egyéb földi rendszerekre is, mint például irányító, karbantartó, fel- és leszállást biztosító alrendszerekre. A drónt, a fedélzeti berendezéseket és a földi kiszolgáló, üzemeltető, kommunikációs egységeket együttesen nevezzük pilóta nélküli légijármű-rendszernek.

2. Történeti áttekintés

Első megjelenésük a történelmünk hadszíntereire vezethető vissza. Néhányan több mint 1000 évvel ezelőttről, attól a kínai elképzeléstől számítják az eredetüket, hogy papírsárkányok segítségével bombáztak jól védett városokat [3]. Mások szerint az első írásos emlékek 1849-ből származnak, Velence bombázásáról, amikor a Velencei Köztársaság hadserege visszavonult szárazföldi területekre, ahol az osztrák tüzérség nem tudta hatékonyan pusztítani állásaikat. 1849. augusztus 22-én az osztrákok robbanóanyaggal megpakolt, személyzet nélküli ballonokat juttattak el a szél segítségével Velence városa fölé, sikeresen bombázva a területet [4]. Habár napjaink drónjai és rakétái meglehetősen különbözők, történetük mégis szorosan összefűződik a korai útkeresés időszakában [3].

A mai drónok elődjének tekinthető eszközök alkalmazására a második világháborúban került sor, amelyek pilóta nélküli célrepülőgépek voltak. A Queen Bee névre hallgató robotrepülőgép volt az első korai UAV, amely már képes volt visszatérni az indítás helyére. Ezt a típust hadrendbe is állították a brit haderőben. Németország is használt hasonló eszközöket, elsősorban London bombázására. Az Fi 103-as típusú V-1 kódnevű robotrepülőgépek hatótávolsága elérte a 320 km-t, és 850 kg tömegű robbanószert is képesek voltak célba juttatni, irányításukat robotpilóta-rendszer végezte. Ezeket tartják az első manőverező robotrepülőgépeknek és ballisztikus rakétáknak.

1. ábra
MQ-1 Predator [29]

A technika fejlődése az 1970-es években érte el a valós idejű információk továbbításának lehetővé tételét, ezzel jelentősen megrövidítve az információk megszerzésének időtartamát. A felderítés sikerességét segítették még a radarbesugárzást jelző rendszerek, amelyek észlelték az esetleges vadászrepülőgépek és légvédelmi rakéták közeledését, és kitérő manőverrel, kondenzcsík gátló és elektronikai zavaró rendszerek segítségével próbálták meg elhárítani az ellenség támadását [4].

Az Öbölháború volt az első háború, amelyben már az informatikai eszközök jelentős szerepet játszottak elsősorban a felderítés, vezetés és döntéstámogatás terén. A háború során többféle drónt is alkalmaztak, amelyek a pontos felderítési adatok, célmegjelölési és tűzvezetési feladatok mellett komoly lélektani hatást is gyakoroltak az ellenséges iraki haderőre. Azonban a legnagyobb sikereket az úgynevezett okos bombák, a lézerirányítású bombák és cirkáló lőszerek[3] alkalmazása aratta [4]. A pilóta nélküli repülőeszközök területén igazi áttörést az 1990-es években sikerült elérni, amikor GPS-rendszereket is integráltak a fedélzetre [5].

A 2001. szeptember 11-i terrortámadás következtében indított terrorellenes műveletek hatalmas mérföldkőnek számítanak a hadviselésben. A konfliktusok változó természete és a modern technológiák terjedése egyre növekvő szerepet biztosít a harctéren az UAV-k számára. A terrorizmus globális terjedésével egyre égetőbbé vált a megfelelő fokú reagálóképesség mind nemzetközi jogilag, mind politikailag. A 2000-es évek elején az RQ[4]-1 Predatort AGM-114, Hellfire típusú lézerirányítású rakétákkal szerelték fel, amelyek eredetileg helikopterek részére gyártott, páncéltörő, levegő-föld osztályú rakéták voltak, majd átalakították őket, hogy precíziós csapásmérésre is alkalmasak legyenek. Felderítésre RQ-2 Pioneereket és RQ-7 Shadow drónokat használtak. Az amerikai légierő igényt tartott a Predator finomítására, így 2007-re a meglévő eszközök helyét elkezdték átvenni a Predator B-k, azaz az M[5]Q-9 Reaperek [6].

3. Második hegyi karabahi háború

Az első hegyi-karabahi háború 1988. február 20-án tört ki a *glasznoszty*[6] kezdetén, és 1994. május 12-éig tartott, amelynek oka az volt, hogy az első világháborút követően a régiót – amelynek mindkét állam számára kulturális és vallási jelentősége van – az Azerbajdzsáni Szovjet Szocialista Köztársasághoz csatolták az Örmény Szovjet Szocialista Köztársaság helyett. Hat évet követően a két posztszovjet állam közül Örményország kerekedett felül. Az elfoglalt területekről elüldözték azokat, akik nem menekültek el az azeri lakosok közül. Habár tűzszüneti megállapodás született, békeszerződést nem írtak alá a felek, így egy befagyott konfliktus alakult ki [7]. A területen pedig Örményország létrehozta a független Arcah Köztársaságot.

A vesztes háborút követően Azerbajdzsán védelmi költségvetésének növelésével – elérve a GDP 4,6%-át – párhuzamosan haderő-modernizációba kezdett, amelynek célja egy professzionális hadsereg kiépítése volt. Ebben Törökország segítette az azerieket. A modernizáció célja az aszimmetrikus fölény kialakítása volt az örmény hadsereggel szemben, amelynek középpontjában a parancsnoki és vezetési rendszer reformja, személyzet nélküli precíziós

[3] A köznyelvben öngyilkos vagy kamikaze drónoknak is nevezett fegyverek.
[4] R – Reconnaissance (felderítő), Q – UAV-t jelölő kód.
[5] M – Multirole (többfeladatú).
[6] A Szovjetunióban Mihail Gorbacsov által 1985-ben, a leningrádi beszéddel bevezetett új politikai stílus volt. Az orosz szó jelentése „nyíltság", a korlátozások feloldása.

csapásmérési képességek, nagy hatótávolságú tüzérségi eszközök, több vonalú légvédelmi rendszer, valamint a kiber- és információs hadviselési képességek kialakítása és beszerzése volt [7].

2011-től 2019-ig Azerbajdzsán 19 milliárd USD-t költött modern hadieszközökre, többek között 100 darab Orbiter 1K-ra és 50 darab Harop öngyilkos drónra. Ezalatt Jereván 4,8 milliárd USD-t fordított haditechnikai beszerzésekre, elsősorban másodvonalbeli orosz technikákat vásárolt [8].

Örményország az első háború megismétlésére készült, és korábbi győzelméből kiindulva „Maginot-vonal szindrómába" került, és a tűzszüneti vonal mentén épített ki fix védelmi állásokat, árokrendszereket, bunkereket.

2013-tól Azerbajdzsán rendszeres közös hadgyakorlatokat hajtott végre Törökországgal. 2020 augusztus 1. és 5. között szárazföldi, július 29. és augusztus 10. között pedig légi hadgyakorlatokat tartottak. Az utóbbit követően török eszközök és kezelőszemélyzet is maradt Azerbajdzsán területén [7], [8].

2020. szeptember elején Azerbajdzsán készen állt a „Vasököl Hadművelet" megindítására, és a háború kitörését megelőző hetekben már megkezdte az ehhez szükséges erők mozgósítását [27].

A háború előzményének tekinthető a 2020. szeptember 21–26. között megrendezett orosz stratégiai hadgyakorlat, amelyben örmény, belorusz, mianmari, pakisztáni és kínai katonák is részt vettek. Azerbajdzsán szeptember elején visszautasította a meghívást. A Kavkaz 2020 nevet viselő gyakorlat részeként Örményország területén is hajtottak végre műveleteket, amelyek fő eleme az UAS-ok elleni tevékenység volt.

Ami az erőviszonyokat illeti, a 2020-as *Military Balance* alapján az azeri hadsereg 66 950 fő aktív szolgálatban álló katonából állt, az örmény hadsereg 44 800 főből, és ehhez hozzáadható még a 20 000 fős karabahi hadsereg [10]. Így nem rendelkeztek az azeriek nagy létszámfölénnyel. A támadást szeptember 27-én a hajnali órákban indították meg, amikor az örmény hadsereg nagy része Karabah területétől távol helyezkedett el [11].

Az események szerint a hathetes háborút az azeri hadműveletek alapján három fő szakaszra lehet bontani.

Az első szakasz célja a kiemelkedő fontosságú katonai infrastruktúra és kommunikációs hálózatok zavarása, pusztítása volt. A háború kitörésének első napján, szeptember 27-én elpusztították az örmény légvédelem 50%-át és a tüzérség 40%-át. A háború második hetére a légvédelem már csak vállról indítható hordozható rakétákból állt.

Az örmények elsősorban a Bagramyan és Ohanyan vonalakra hagyatkoztak, az előbbi az első háború alatt épített bunkerekből és árokrendszerekből állt, az utóbbi pedig a tűzszüneti vonal mentén húzódó, aknazárral megerősített árok- és bunkerrendszer volt. Azonban a megfelelő álcázás hiánya miatt az azeri UAS-ok és repülőgépek segítségével az örmény védelmi rendszer könnyedén felderíthető célponttá vált, valamint török és azeri műholdakról is látható volt.

Első lépésként az azeri erők az örmény légvédelmi radar- és rakétarendszereket igyekeztek túlterhelni elektronikai zavarással, majd UAS-okkal végzett célfelderítést követően pilóta nélküli harci légi járművekkel[7] és öngyilkos drónokkal csapást mértek rájuk. 2020-ban Oroszországtól vásároltak An-2 típusú repülőgépeket, amelyeket átalakítottak távirányítású

[7] UCAV – Unmanned Combat Aerial Vehicle.

robotrepülőgépekké, robbanóanyaggal rakodták meg, és örmény légvédelmi állásokra vezették azokat [9], [11].

Azerbajdzsán néhány nap alatt megszerezte a légi uralmat [7]. Ez fordulópontot jelentett a háborúban, az azeri légi uralom mellett az örmények képtelenek voltak tovább tartani szárazföldi állásaikat.

Az azeri hadművelet második szakaszának célja az örmény célok felderítése, követése és pusztítása volt a kijelölt műveleti területen belül. Elsősorban a megmaradt légvédelmet, elektronikai hadviselési rendszereket, vezetési pontokat, tüzérségi és rakétaállásokat, páncélozott harcjárműveket és élőerőt pusztították UCAV-okkal mért csapásokkal.

A légvédelem, tüzérség és elektronikai hadviselési rendszerek megsemmisülését követően az örmény szárazföldi csapatok manőverező képessége lecsökkent, és a lokális ellentámadások indítása is korlátozott volt [7]. Amikor már a logisztikai ellátást és utánpótlást biztosító járműveket ért támadás, a védelem teljesen összeomlott. A csapatok támadása pedig teljes mértékben lerombolta az örmény haderő morálját.

A háború harmadik, utolsó szakaszában az azeriek a lehető legnagyobb területet igyekeztek megszerezni a nemzetközi nyomásra megkezdődött béketárgyalások lezárása előtt. Október végén a Lancsin-korridor megszerzése volt a következő azeri műveleti cél. A szabdalt hegyvidéki terep azonban a védelmi harcra berendezkedett örmény erőknek kedvezett, és a háború legvégéig meg tudták tartani állásaikat, a korridor az ellenőrzésük alatt maradt. Amikor az azeri vezetés látta, hogy nincs esélyük, Hadrut irányából indítottak offenzívát Susi városa felé, a főváros, Sztyepanakert irányába [9]. Susi mindkét állam számára kulturális és vallási jelentőségű település, amelyért komoly harcokat vívott a két ország, a hegyes területeken a keskeny utak mentén az örmény csapatok többször hajtottak végre sikeres rajtaütést a beérkező azeri harckocsikon, páncélozott szállító járműveken, irányítható páncéltörő rakétákkal és tüzérségi tűzzel. Október végén erdőtűz keletkezett a város körül, feltehetően az örmények így próbálták meg védeni állásaikat az azeri drónok felderítésétől. Azonban az azeri különleges erők november 4. és 6. között a kialakult ködben több irányból megközelítve beszivárogtak a városba [7]. Az örmények november 7-én adták fel a településért vívott harcokat és november 10-én fegyverszüneti megállapodást kötöttek, ekkor az örmény–karabahi erők már nem lettek volna képesek sokáig folytatni a háborút, amit a harcoló csapatok és a hátország lakossága elől is titkoltak [9].

A fegyverszünetet a kialakult *status quo* alapján kötötték, nem rendezték a fennmaradó vitás kérdéseket, ami további eszkalációhoz vezetett. A kiújuló harcoknak a bevonuló orosz békefenntartók vetettek véget, és a két települést fennhatóságuk alá vonták. A kilencpontos egyezmény az orosz békefenntartók mandátumát sem tisztázza részletesen, ami esetleges visszaélésekhez vezethet. Egy orosz–török bilaterális megállapodás alapján török katonák is tartózkodhatnak a térségben, egy közös fegyverszüneti ellenőrző központ működtetése által [9].

3.1. Drónok alkalmazása, következtetések

Az azeri beszerzések idejét vizsgálva megállapíthatjuk, hogy Baku 2010 környékén, majd a 2016-os fegyveres összeütközéseket követően indított nagyobb UAS-beszerzéseket. A 2020-as háború előtt néhány hónappal pedig a török Bayraktar TB2-k vásárlása történt. A médiában

a török drónok által végrehajtott precíziós csapások kaptak nagyobb visszhangot, azonban az izraeli beszerzések is jelentősen hozzájárultak az azeri aszimmetrikus fölény kialakításához.

Az aszimmetria a pilóta nélküli repülőrendszereken kívül a tüzérségi eszközök és harckocsik terén is mennyiségi és jelentős minőségi fölénnyel jelentkezett az azeri hadsereg részére. Fontos kiemelni, hogy Jereván nem rendelkezett UAV-ok ellen hatásosan alkalmazható légvédelmi rendszerekkel. A légvédelem olyan Sz-300P típusú rakétarendszerre támaszkodott, amelyet az orosz haderő már több mint 10 éve nem alkalmaz [9].

Az azeri hadsereg a hagyományos pilóta nélküli eszközök mellett az átalakított An-2-esekkel is növelni tudta fölényét, azok meglepetésszerű alkalmazásával sikeresen felderítettek több légvédelmi állást is, amelyekre ezt követően tüzet vezettek. Ami az UAV-okat illeti, bebizonyosodott, hogy a többcélú eszközök beszerzése a legelőnyösebb. A karabahi hadműveletek során az ISTAR[8]-műveletek mellett elektronikai hadviselésre, célmegjelölésre, csapásmérésre, közeli légi támogatásra és ellenséges légvédelem lefogására is alkalmazták őket. Továbbá a közzétett képi felvételeket és az eszközök puszta jelenlétét is pszichológiai hadviselésre és stratégiai kommunikációs eszközként is kiválóan használták.

Habár a legtöbb esetben harctámogató feladatokra alkalmazták a pilóta nélküli repülőeszközöket, a légierő legfőbb feladatára, a csapásmérésre is egyre növekvő arányban fordul elő használatuk. A modern háború megvívásában az álcázás és a rejtés nagy kihívást jelent a levegőben tartózkodó drónokkal szemben. Továbbá a szárazföldi eszközök páncélvédelme a precíziós csapások ellen is komoly problémát vet fel a jövő hadviselésére való tekintettel. A passzív védelmi módszerek mellett az aktív védelmet is modernizálni kell, hogy a szárazföldi erők mozgás- és manőverszabadsága megfelelően biztosítható legyen. Valamint rétegzett légvédelmi rendszer beszerzése és kiépítése szükséges, amely nagy, közepes és rövid hatótávolságú mobil légvédelmi eszközöket is magában foglal.

Az örmény vereségből következtetésképpen levonható, hogy a modern eszközök azok számára nyújtanak jelentős fölényt, akik a lehető leggyorsabban és -hatékonyabban képesek a gyakorlati használat mellett a doktrináikba is beilleszteni a drónok használatát. Az örmények 1989-es szovjet doktrína alapján vívták a háborút. Ezzel szemben Azerbajdzsán a 2010-es évek elején, amikor a drónbeszerzések történtek, könnyű vegyes rohamegységeket alakított ki [12].

Annak ellenére, hogy a háborút megelőző napokban az oroszokkal közös hadgyakorlaton a drónok elleni harcot gyakorolták, a hadszíntéren szinte meglepetésként érte őket az azeri UAS-tevékenység.

Az örmény stratégia az erődített védelmi vonal mellett az azeri hátország területén stratégiai jelentőségű célok támadására épített, nagy hatótávolságú tüzérségi eszközökkel és szükség esetén ballisztikus rakétával. Azonban az azeriek drónjaikkal precíziós csapásokat mértek több rakétaindító állás ellen is, ezzel keresztülhúzva az örmény stratégiai terveket [13].

A fentiek alapján megállapítható, hogy jelentős aszimmetrikus fölény esetén a légi uralom pilóta nélküli eszközökkel is kivívható és megtartható. A szárazföldi manőverekkel összhangban, azok támogatására, felderítésre és csapásmérésre is hatékonyan alkalmazható. Alkalmazásuk költséghatékony, és a pilóták élete sem kerül veszélybe. Mindemellett a valós idejű felvételek a vezetés támogatása mellett pszichológiai hadműveletekre is hatásosan felhasználhatók.

[8] Az ISTAR az a folyamat, amely integrálja a hírszerzési, megfigyelési, célpont-meghatározási és felderítési feladatokat. Ezáltal javítja a parancsnok helyzetfelismerő képességét, és ebből következően döntéshozatalát.

4. Orosz–ukrán háború

2014 februárjában az ukrán Janukovics-kormány elutasította az Európai Unió társulási egyezményét, és bebörtönözték az ellenzéki párt vezetőjét, Julia Timosenkót, amely döntések következtében kitört az Euromajdan forradalom. Egy átmeneti kormányt neveztek ki, és Janukovicsot eltávolították az állam éléről. Oroszország számára Ukrajna Nyugathoz való közeledése valós fenyegetéssé vált, ezért február 23-án megindították a Krím félsziget megszállását.

A megelőzőleg „kis zöld emberek"[9] által előkészített művelet gyors sikerrel járt, a márciusban kiírt népszavazást követően megtörtént a félsziget annektálása [14]. Majd Luhanszk és Donyeck területén törtek ki zavargások, amelyek következtében megalakult a *de facto* független Luhanszki és Donyecki Népköztársaság. A Donyec-medence területén egy évig tartó intenzív harcokat követően alacsony intenzitású állóháború alakult ki.

2019-ben megválasztották Volodimir Zelenszkijt Ukrajna elnökének, és 2020 júniusában az ország kibővített lehetőségek partnerségi státuszt kapott, ezzel hozzáférése biztosítottá vált a NATO interoperabilitási rendszeréhez [15]. Az ukrán politikai vezetés a 2020-as Nemzeti Biztonsági Stratégiában pedig a NATO-hoz csatlakozást jelöli meg célul. Ezt követően 2021-ben és 2022-ben újabb eszkalálódó harcok törtek ki a Donyecki régióban. 2021. október 26-án itt alkalmazta először Ukrajna a törököktől vásárolt Bayraktar TB2-drónokat, egy tüzérségi tüzelőállásra mértek csapást vele.

2. ábra
TB2 Bayraktar [30]

2021. december 17-én Oroszország közzétette követeléseit Ukrajnával szemben, amelyek között szerepelt egy jogi keretek között kötött egyezményre való igény, miszerint Ukrajna soha ne lehessen NATO-tag és a szövetség függessze fel katonai tevékenységeit Kelet-Európában és Ukrajnában. A NATO megerősítette keleti határait, erre válaszul Oroszország 8500 katonát helyezett fokozott készenlétbe egy esetleges európai művelet indítására. Az ukrán határ mentére települő csapatok felügyeletére, koordinálására és vezetésére létrehoztak két

[9] Az orosz légideszant-alakulatokra használt kifejezés.

összhaderőnemi hadseregcsoportot, amelyek alárendeltségébe tartoznak az orosz ellenőrzés alatt álló szeparatista területek haderői is [16]. Majd 2022 januárjában Oroszország a hidegháború óta legnagyobb hadgyakorlatát szervezte meg Fehéroroszországgal a fehérorosz–ukrán határhoz közel. Február 21-én Putyin elnök elismerte a Donyecki és Luhanszki Népköztársaság függetlenségét [17].

Február 24-én a kora reggeli órákban az orosz állami televízióban leadott felvételen Putyin bejelentette, hogy az orosz hadsereg egy speciális katonai műveletet kezd Ukrajna területén. Zelenszkij ukrán elnök hadiállapotot hirdetett, és lezárták az ukrán légteret.

Habár Oroszországban nincsen hadiállapot, csak részleges mozgósítás történt, az események megfeleltethetők a clausewitzi háború fogalmának: „A háború tehát az erőszak alkalmazása, aminek célja, hogy az ellenfelet saját akaratunk teljesítésére kényszerítsük" [18, p. 31]. Prof. Dr. Resperger István szerint két párhuzamosan folyó háborúnak lehetünk szemtanúi egy úgynevezett „puha", hibrid eszközökkel vívottnak az Amerikai Egyesült Államok és Oroszország között és egy kinetikusnak, amely Oroszország és Ukrajna között zajlik. Az eddigi eseményeket öt fázisra oszthatjuk, amelyek a következők: orosz invázió, kijevi kivonulás, donbászi műveletek, harkivi és herszoni offenzíva és a máig elhúzódó állóháború [25].

Oroszország egyértelműen korlátozott területszerző agresszióra készült, elsődleges célja a Donbász régió felszabadítása, a kormány megbuktatása és a Krím félszigettel szárazföldi kapcsolat kialakítása, a nagyobb városok elfoglalása és Novorosszija területének megszerzése.

Az orosz elnök bejelentését követően megkezdődött Ukrajna bombázása, valamint a Krím félsziget felől és a fehérorosz határon megtámadtak több határátkelőhelyet. Ezt követően indultak meg az orosz zászlóalj-harccsoportok [25]. Mindkét fél részéről nagyszabású információs és pszichológiai hadviselés kezdődött a közösségi médiában, rengeteg, sokszor megtévesztő videófelvétellel és fotóval találkozhatunk.

Az orosz erők célja Kijev körbezárása volt, és a Zelenszkij-kormányt egy bábkormánnyal akarták helyettesíteni. Azonban Kijevben nem várt ellenállásba ütköztek, valamint a hosztomeli reptér légiroham-művelete sem bizonyult sikeresnek. A kudarcokat követően az orosz erők kivonultak a fővárosból, később még külső kerületek irányából próbálkoztak támadás indításával, azonban nem értek el jelentős sikereket [16].

Az első szakaszt a gyors manőverek és a stratégiai jelentőségű terepszakaszok megszerzése jellemezte. Az orosz támadás eleinte nagy tempóval haladt, viszont a mennyiségi és minőségi hátrányban lévő ukránok sokkal jobban tudtak alkalmazkodni, mint arra bárki is számított [16]. Az orosz csapatok helyzetét egyaránt nehezítette az akadozó logisztikai ellátás, a kommunikációs és vezetési nehézségek. A „speciális katonai művelet" kezdete óta az ukránok védelmi képességeit növelte a nyugati országoktól kapott támogatás, mind haditechnikai eszközök, mind katonai kiképzés területén.

Április 13-án az ukrán haderő elsüllyesztette az orosz Moszkva nevű, Szlava-osztályú cirkáló hajót, ebben a műveletben TB2 Bayraktar típusú drónok is részt vettek. A hajó elvesztése és a légvédelemben szerzett veszteségek miatt júniusra az ukrán nagy hatótávolságú tüzérség a Kígyó-sziget elhagyására kényszerítette az orosz erőket. Mariupolban is véres harcok folytak, majd az Azovsztal üzem területén bekerített ukrán védők májusban megadták magukat.

Az orosz haderő a háború kezdetén a vártnál gyengébben teljesített. Elemzések alapján megállapítható, hogy a harctéren rendelkezésükre álltak a sikeres művelethez szükséges haditechnikai eszközök. A kezdeti kudarcok legfőbb okainak a katonák között uralkodó alacsony

morál, elégtelen kiképzettség, az összhaderőnemi műveletek nem megfelelő végrehajtása, valamint a hatalmas mértékű korrupció tekinthetők[10] [19].

Oroszország újra összpontosította erőit, hogy Donyeck és Luhanszk térségében további stratégiai jelentőségű városokat és infrastruktúrákat szerezzen meg. Ekkor úgy tűnt, Oroszország a veszteségei miatt nem képes több irányban is támadást indítani. A háború kezdeti szakaszától eltérően egy sokkal tradicionálisabb, konvencionális hadviselési mód bontakozott ki a Donbász régióban. A lassú előrehaladást intenzív harcok kísérték, tömeges orosz tüzérségi és rakétatámadásokkal. Ezen a hadszíntéren az orosz haderő elsősorban a Wagner-csoport,[11] valamint a Donyecki és Luhanszki Népköztársaság katonáira támaszkodott [16].

Május közepétől fokozatosan megjelentek a műveleti területeken a nyugati tüzérségi eszközök, amelyek hozzájárultak az ukrán hadsereg harci potenciáljának fenntartásához, így képesek voltak reagálni a jelentős tüzérségi fölénnyel rendelkező orosz erők csapásaira. Július végén megérkeztek az USA által biztosított páncélozott, önjáró rakéta-sorozatvetők és a nagy mozgékonyságú rakétatüzérségi rendszerek, amelyekkel jelentősen megnövekedett az ukrán tüzérség hatótávolsága és precíziós csapásmérő képessége.

Augusztusra az ukránok a védelmi harcból támadásba tértek át, az oroszok által elfoglalt területeken végrehajtott gerilla jellegű támadások formájában. Elsősorban a városi területek között húzódó logisztikai ellátási láncot pusztították rajtaütések, lesállások által. Ebben a szakaszban ismételten alkalmazták a Bayraktar drónokat. Az ukrán erők sikeresen szorították vissza az orosz erőket [16].

A téli időszakban állóháború alakult ki a két fél között, amelyben már kiegyensúlyozott létszámban, azonban orosz tüzérségi fölénnyel vesznek részt a felek. A kialakult helyzet hosszú távon Oroszország számára kedvező, ugyanis a nyugati szankciók és a mélyen gyűrűző korrupció, amelynek vélhető eredménye az offenzíva első heteit jellemző logisztikai nehézségek, ellenére is előnyösebb gazdasági helyzetben van, mint a gazdasági összeomláson és humanitárius krízisen átesett Ukrajna. A tavaszi-nyári hónapokban vélhetően mindkét fél támadó műveletekre készül, ehhez azonban az ukránok a további nyugati eszközök érkezését várják [20].

4.1. Drónok alkalmazása az ukrán hadszíntéren

Az elmúlt két évtized során a drónok a konvencionális hadviselés bevett részévé váltak. Azonban az ukrán–orosz háború eseményei alapján megállapíthatjuk, hogy az UAS-ok a modern konfliktusok során a kedvező helyzet kialakításához szükséges eszközök, de önmagukban nem elegendőek a győzelem megszerzéséhez. A nagy méretű UAV-ok, amelyek a terrorellenes műveletek ikonikus eszközeivé váltak, az ukrán harctér fölött nem bizonyultak kellően hatékonynak. Ennek oka, hogy egyik fél sem birtokol légi uralmat, így alkalmazásuk kockázatossá vált. Az ezekbe a kategóriákba tartozó eszközök már költségesebbek, így tömeges elvesztésük és pótlásuk jelentős gazdasági ráfordítást igényel [21].

Az orosz–ukrán háborúban a szárazföldi erők által üzemeltetett kisebb méretű drónok teljesen átalakították az alacsony légterek dinamikáját. Sok felvétellel találkozhatunk

[10] Elit, könnyű fegyverzettel rendelkező csapatok hajtottak végre olyan műveleteket, amelyekhez nem rendelkeztek sem felszereléssel, sem kiképzéssel (pl. városi harcok páncélos támogatás nélkül).

[11] 2014-ben létrejött orosz katonai magánvállalat, először a Krím félsziget annexiója során tűntek fel.

az interneten, amelyek azt bizonyítják, hogy az orosz és ukrán fél is nagy mennyiségben alkalmaz kereskedelmi forgalomban lévő, olcsón beszerezhető pilóta nélküli repülőeszközöket.

Oroszország és Ukrajna is egyaránt kapott drónadományokat a civil lakosságtól. Ezen adományok nagy részben kínai hobbi drónok, amelyekre kamerákat és különböző robbanóeszközöket szerelnek. Azonban kisebb teljesítményűek és sebezhetőbbek, mint az azonos kategóriájú katonai eszközök. Nemkinetikus, pszichológiai hatásuk viszont ugyanakkora, mint katonai megfelelőjüké [22].

3. ábra
Kvadkopterre szerelt MON-50 irányított repeszakna [31]

A 3. ábrán is egy ilyen eszköz látható, amelyre MON-50 típusú gyalogság elleni irányított repeszaknát erősítettek. Felderítés és tűzvezetés, tűzhelyesbítés mellett, ahogy azt a fényképes források is bizonyítják, csapásmérésre is használják őket. A kis méretű drónokat nagy mennyiségben vezetik a célra, ezek nehezen észlelhetők, és a rajban való alkalmazás miatt ha időben észreveszik azokat, akkor is elkerülhetetlen a pusztító hatás. Habár rajoknak nevezzük őket, ezek még nem képesek autonóm módon működni. A kis méretű UAV-ok jelentősen növelték a tüzérség műveleti tempóját, ami elsősorban az időérzékeny célok pusztítása során fontos tényező. Továbbá az öngyilkos drónok esetében az előre biztosított valós idejű felderítési adatok által a levegőben töltött idő csökken, és a precíziós csapások által a járulékos veszteség mértéke is kisebb [22], [23].

A civil lakosság mellett Ukrajna a nyugati államoktól is számos különféle katonai pilóta nélküli eszközöket kapott, mint például a Warmate, CyberLux K8, ALTIUS-600 [28]. Sok eszközt

még nem láthattunk hadszíntéren teljesíteni, így ez a gyártók számára is kiváló lehetőséget nyújt arra, hogy adatokat gyűjtsenek a további fejlesztésekhez.[12] A másik oldalról pedig a sikeresen kilőtt és hátrahagyott eszközök által a két fél információkat szerezhet egymás haditechnikájáról.

A clausewitzi „háborús köd felszállásának" is szemtanúi lehetünk, a valós idejű felvételek által az alegységek szintjéig biztosított a harchelyzet pontos ismerete. A csapatok képesek az ellenség mozgásának megfigyelésére, pozíciójuk meghatározására. Egy interjú során egy ukrán katona arról számolt be, hogy sok esetben az ellenséges drónpilóták „vadásznak" egymásra, ha megsemmisítik a másik fél eszközét vagy magát a pilótát, megfosztják az ellenséget a „szemétől" [24].

A háború első szakaszában az ukrán haderő a Törökországtól kapott Bayraktar drónokat alkalmazta, elsősorban orosz menetoszlopokra mértek vele csapást. Ekkor még ezekben az eszközökben látták az ukrán győzelem sikerének biztosítékát.

4. ábra
Shahed-136 [32]

A török katonai drónok ismételten a világsajtó főszereplői lettek, Ukrajnában pedig az ellenállás egyik jelképévé váltak. Egyes források szerint majdnem az összes eszközt elveszítették a későbbi harcok során, ennek oka a légi uralom már kifejtett hiánya. Mások szerint a típus eltűnésének az oka a török–orosz külkapcsolatokhoz vezethető vissza.

Annak ellenére, hogy Oroszország is rendelkezik a Bayraktarhoz hasonló képességű Orion UCAV-okkal, kevesebbszer emelkedtek a levegőbe, mint a török gyártmányúak. Ennek egyik oka feltehetően a nemzetközi szankciók miatt korlátozott gyártói kapacitás, ezért is

[12] Az Ukrajna által alkalmazott pilóta nélküli repülőeszközök között több csőből indítható típust is találhatunk. Ezen indítási mód során egy, az eszközre erősített csőből történik a drón felszállása, „kilövése". Mivel az indítás szinte bármilyen járműről – légi, szárazföldi, vízi – lehetséges, így a drágább haditechnikai eszközök megóvhatók az esetleges veszteségektől. A technológia a modern hadszíntéren, a multitérműveletek során a haderőnemek közti együttműködést fokozza, autonóm drónrajok indítására is alkalmas lehet a jövőben [34].

fordultak az iráni eszközbeszerzés lehetősége felé, és vásároltak Mohajer-6 drónokat, amelyeket tömegesen alkalmaznak különböző célok pusztítására is. Az első hónapokban az oroszok az Orlan-10 UAS segítségével hajtottak végre felderítő műveleteket, azonban a rendszer megbízhatatlanságából adódóan több esetben problémáik adódtak.

Az öngyilkos drónoknak köszönhetően a felek számára az arcvonalon túl is elérhetővé válnak akár a hátországi területek is. Így a tüzérségi eszközök hatótávolságán túl, olcsón képesek pusztítani az ellenség kritikus infrastruktúráját[13] [26]. Azonban ezek a drónok érzékenyek az elektromágneses zavarásra. Emellett többet sikeresen hatástalanítottak még becsapódás előtt légvédelmi rakétákkal, gépkarabélyokkal, gépfegyverekkel.

Habár légi uralom nélkül is váratlan és precíz csapásokat képes mérni egymásra a két ország, jelentős pusztító hatást elérve, ez nem elegendő területek megszerzéséhez. A kinetikus és nemkinetikus hatások ellenére a háború nem vívható meg a pilóta nélküli eszközökkel, azok elsősorban harctámogató feladatok betöltésére alkalmasak.

5. Összegzés

Ha összehasonlítjuk a két konfliktust, megállapíthatjuk, hogy a drónok modern hadviselésben betöltött szerepe függ az adott fegyveres összeütközés természetétől, valamint a légi helyzettől. Mégis napjaink hadműveleti területeinek jelentős szereplőjévé váltak.

Megállapítható, hogy légi uralom esetén kisebb méretű eszközök használata hatásosan támogathatja a szárazföldi erők harctevékenységét, jelentősebb anyagi veszteségek veszélye nélkül, a pilótákat és a drágább légi járműveket óvva. A második esettanulmány által bebizonyosodott, hogy a légi uralom hiányában a kisebb méretű UAS-ok alkalmazása válik célszerűvé, hiszen a repülési magasságuk alacsony, valamint könnyen és olcsón előállíthatók, beszerezhetők.

Kijelenthető, hogy a drónokat elsősorban harci támogató feladatokra alkalmazzák, főként ISTAR, támadó légi szembenállási, légi lefogási, és légi támadási műveletekben. Az elemzések alapján következtetésképpen levonható, hogy támadó műveletek során legtöbbször öngyilkos drónokat alkalmaznak.

Habár az UAV-k már évtizedekkel korábban megjelentek a harctereken, még mindig kezdetleges stratégiai dokumentumi háttérrel rendelkeznek. A haditechnikai fejlesztések mellett figyelmet kell fordítani a doktrínák modernizálására is, amire békeidőben van egy hadseregnek lehetősége. Ezt az örmény és azeri példa bizonyította.

A drónok a diplomácia és a külkapcsolatok egyik eszközévé váltak, mint más haditechnikai eszközök. Azonban az Ukrajnának szánt adományok alapján megállapítható, hogy olyan államok, akik nem ajánlanak fel kinetikus eszközöket, biztosítanak katonai pilóta nélküli légi járműveket. Ezzel jelentős segítséget nyújtanak az ukrán félnek, hiszen ahogy azt már az előzőekben kifejtettük, a felderítő UAS-ok által szolgáltatott valós idejű információk nagyban hozzájárulnak a sikeres területszerzéshez és a manőverszabadság szavatolásához. Tehát a drónok egyfajta egyensúlyozásra alkalmas eszköznek tekinthetők a külpolitikában.

[13] Oroszország öngyilkos drónokkal intézett támadást az ukrán energetikai infrastruktúrára, közel az ország felét sújtották áramkimaradások.

Következtetésként levonható, hogy hosszú távon várhatóan a többcélú eszközök fogják uralni a katonai drónok piacát. Továbbá a gazdasági érdekek szem előtt tartása végett feltehetően a NATO-tagállamok az észak-atlanti térségben előállított drónok beszerzését fogják választani, a térség gazdasági támogatása érdekében.

Bizonyított, hogy az egyszerűen, többféle platformról indítható, könnyen szállítható drónok iránti kereslet jelentős növekedése várható a közeljövőben, és leginkább a csőből indítható UAV-k felelnek meg e kritériumoknak. Ez a technológia megalapozza a jövőbe tekintő doktrínákban már célként megjelölt autonóm drónrajok létrehozását. Erre legalkalmasabbak a kis méretű, olcsó eszközök.

A pilóta nélküli légi járművek alkalmazása nemcsak egység, hanem alegység szinten is kritikus ponttá vált a modern hadviselésben, ezért a megfelelő know-how elsajátítása a stratégiai műveletekben részt vevőktől egészen harcászati szintekig alapvető képességgé kell hogy váljon.

Az UAS-ok által biztosított valós idejű információknak köszönhetően jelentősen megnövekedett a műveleti tempó, ami elsősorban a tüzérségi eszközök célokra való tűzkiváltásának az idejét csökkentette le, valamint az eszközökön keresztül a parancsnokok pontos információkkal rendelkeznek a harchelyzet alakulásáról.

Mindkét esettanulmány során felmerült a drónok elleni védelem kérdése. Megállapítható, hogy méreteikből adódóan a nagyobb pilóta nélküli eszközök ellen való védelem nem sokban különbözik a hagyományos légi járművekétől. Az orosz–ukrán háború tanulmányozása során kirajzolódott, hogy a kisebb méretű eszközök tömeges alkalmazásuk esetén viszont kihívást jelentenek a hagyományos légvédelem számára.

Radarkeresztmetszetük jelentősen kisebb, és földközeli magasságban repülnek, így a környezet hatására a szenzorok lefedettsége minimális, jelentősen csökken az ellentevékenység sikerének lehetősége. Összességében megállapítható, hogy ellenük a leghatékonyabb védekezés az elektronikai ellentevékenység és a rétegzett légvédelem. Azonban az elektronikai zavarás a saját kommunikációs és elektronikai rendszerek működésére is hatással lehet. A rétegzett légvédelmi rendszer az azt alkotó eszközök nagy fokú interoperabilitását igényli, és az alegységek számára is elérhető valós idejű információ szolgáltatását követeli meg. A pontvédelmi és egyéb hordozható légvédelmi eszközök alkalmazása, a hatékony légvédelmi rendszer kiépítése azonban jelentős anyagi forrásokat igényel, hiszen egy légvédelmi lövedék átlagosan drágább, mint a találat esetén általa elpusztított drón.

A publikáció elején feltett kérdéssel kapcsolatban (A drónok alkalmazása sorsdöntő fölényt jelent-e egy modern katonai konfliktus során?) a széles körű, nyílt forrású információgyűjtést és azok elemzését követően végzett esettanulmányok alapján megállapítható, hogy a nagy fokú proliferációja ellenére a drónok nem tekinthetők a jövő háborújának döntő haditechnikai eszközeinek, inkább a harctéri fölény és kedvező légi helyzet kialakítását támogatják. A harc megvívása és a területek megszerzése a szárazföldi erők feladata marad.

A témával kapcsolatosan számos, további kutatásokat igénylő, a hadviselés szempontjából releváns területtel találkoztunk. Ilyen a megfelelő haditechnika és a hadikultúra fejlődését lekövető stratégiai dokumentumok kidolgozása, valamint a drónok elleni hatékony és gazdaságos, rétegzett légvédelem kialakítása.

Felhasznált irodalom

[1] Szegedi P., *A pilóta nélküli repüléshez kapcsolódva… Tanulmány a pilóta nélküli légijárművek működésével és üzembentartásával kapcsolatban.* Szolnok, [k. n.], 2016.

[2] Palik M., *Pilóta nélküli légijármű rendszerek légi felderítésre történő alkalmazásának lehetőségei a légierő haderőnem repülőcsapatai katonai műveleteiben.* PhD-értekezés, Budapest, ZMNE, 2007.

[3] U. E. Franke, *The Unmanned Revolution. How Drones are Revolutionising Warfare.* DPhil Thesis, Oxford, New College, 2018.

[4] Palik M. szerk., *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek.* Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013.

[5] P. W. Singer, *Wired for War.* [h. n.], Penguin Books, 2009.

[6] R. Connnor, The Predator, a Drone That Transformed Military Combat. *National Air and Space Museum,* 2018. március 9. Online: https://airandspace.si.edu/stories/editorial/predator-drone-transformed-military-combat

[7] J. Antal, *7 Seconds to Die.* Havertown, Casemate, 2022.

[8] www.latimes.com/world-nation/story/2020-10-15/drones-complicates-wararmenia-azerbaijan-nagorno-karabakh

[9] Egeresi Z., Rácz A., Jójárt K., *Stratégiai helyzet Hegyi-Karabahban a 2020. őszi háború után.* Védelmi Tanulmányok 2022/1. Online: https://svkk.uni-nke.hu/document/svkk-uni-nke-hu-1506332684763/VT_2022_1_Egeresi_R%C3%A1cz_J%C3%B3j%C3%A1rt_Strat%C3%A9giai%20helyzet%20Hegyi-Karabahban_a%202020_%C5%91szi%20h%C3%A1bor%C3%BA%20ut%C3%A1n_full.pdf

[10] The International Institute of Strategic Studies, *The Military Balance,* 2020.

[11] Somogyi Z. M., „A második hegyi-karabahi háború katonai szemszögből (2.)," *Honvédségi Szemle,* 149. évf. 6. sz. pp. 60–76. 2021. Online: https://doi.org/10.35926/HSZ.2021.6.5

[12] Z. Amirkhanyan, „A Failure to Innovate: The Second Nagaorno-Karabakh War," *Parameters,* 52. évf. 1. sz. pp. 119–134. 2022. Online: https://doi.org/10.55540/0031-1723.3133

[13] B. Ho, „The Second Nagorno-Karabakh War Takeaways for Singapore's Ground Based Air Defense," *Journal of Indo-Pacific Affairs,* 2011. ősz, pp. 24–39.

[14] Rácz A., *Oroszország biztonságpolitikai törekvései a posztszovjet térségben.* Védelmi Tanulmányok 2020/3.

[15] Siposné Kecskeméthy K., „A NATO és Ukrajna stratégiai partnersége," *Honvédségi Szemle,* 150. évf. 5. sz. pp. 51–68. Online: https://doi.org/10.35926/HSZ.2022.5.4

[16] A. S. Bowen, *Russia's War in Ukraine: Military and Intelligence Aspects.* Congressional Research Service, 2022.

[17] N. Walker, *Conflict in Ukraine: A timeline (2014–present).* House of Commons Library, Commons Library Research Briefing, 2023.

[18] C. von Clausewitz, *A háborúról.* Budapest, Zrínyi, 2013.

[19] S. G. Jones, J. Thompson, R. McCabe, *Mapping Ukraine's Military Advances. CSIS,* 2022. szeptember 22. Online: www.csis.org/analysis/mapping-ukraines-military-advances

[20] Resperger I., Augusztusig tarthat a háború Ukrajnában? *YouTube,* 2023. március 2. Online: www.youtube.com/watch?v = m4W2rFEyl7k&t = 12s

[21] A. D. al-Garni, Drones in the Ukrainian War: Will They Be an Effective Weapon in Future Wars? *Rasanah,* 2022. augusztus 30. Online: https://rasanah-iiis.org/english/centre-for-researches-and-studies/drones-in-the-ukrainian-war-will-they-be-an-effective-weapon-in-future-wars%EF%BF%BC/
[22] D. Kunertova, „The War in Ukraine Shows the Game-changing Effect of Drones Depends on the Game," *Bulletin of the Atomic Scientists,* 79. évf. 2. sz. pp. 95–102. 2023. Online: https://doi.org/10.1080/00963402.2023.2178180
[23] D. Kunertova, „The Ukraine Drone Effect on European Militaries," *CSS,* 10. évf. 15. sz. pp. 1–4. 2022.
[24] www.pbs.org/newshour/show/how-ukrainian-drone-pilots-are-changing-thecourse-of-the-war-against-russia
[25] Resperger I., *Az orosz–ukrán háború hadműveletei katonai szemmel.* Ludovika Szabadegyetem előadás, 2022. szeptember 27.
[26] https://edition.cnn.com/2022/12/19/europe/ukraine-russia-kyiv-drone-strikes-mondayintl/index.html
[27] PMS Kohli, Col., *Drone Wars in Syria and Nagorno-Karabakh: Lessons Learnt.* Centre for Land Warfare Studies, Issue Brief 307. 2021. Online: www.claws.in/static/IB-307_Drone-Wars-in-Syria-and-Nagorno-Karabakh-Lessons-Learnt.pdf
[28] D. Hambling, Ukraine's Next-Generation Drone Fleet Is Packed With Upgrades. *Forbes,* 2023. március 1. Online: www.forbes.com/sites/davidhambling/2023/03/01/ukraines-next-generation-drone-fleet-enhances-capabilities/?sh = 74f2ae302b45
[29] C. Panzino, New in 2018: Air Force will officially retire MQ-1 Predator drone. *Air Force Times,* 2017. december 30. Online: www.airforcetimes.com/air/2017/12/30/new-in-2018-air-force-will-officially-retire-mq-1-predator-drone/
[30] Turkish UAV intrudes into Greek air space. *Ekhatimerini,* 2022. szeptember 3. Online: www.ekathimerini.com/news/1192505/turkish-uav-intrudes-into-greek-air-space/
[31] https://en.defenceua.com/news/fpv_drones_are_used_by_russians_too_and_they_have_some_ideas_to_take_note_of-6376.html
[32] Iranian 'Suicide Drones' Make Debut on Ukrainian Frontlines: Are Flying Wing Stealth Drones Next? *Military Watch Magazine,* 2022. szeptember 14. Online: https://militarywatchmagazine.com/article/iranian-suicide-drones-debut-ukraine
[33] G. S. Bawa, *The Design, Development and Testing of a Tube Launched UAV.* School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering Faculty of Engineering and Information Technologies University of Sydney, 2017.

Use of Drones in Modern Military Conflicts

Drone technology is present at most part of our everyday life and makes the research area of many disciplines such as logistics, politics, ethics, law, and so on. Unmanned aerial vehicles, which have been already present in the early 2000s in Afghanistan, fill an important part in modern military operations as well. With the headway of electronics, cyberspace and other autonomous systems, UAVs presence caused revolutionary changes in the modern operational areas. We made two case studies to represent the differences and similarities of the use of unmanned aerial systems in today's military conflicts. Do drones guarantee supremacy in modern warfare? Our aim was to

answer this question by analysing the nature and use of drones during the last century's conflicts that would affect the European military acquisitions.

Keywords: *Ukraine, Russia, Armenia, Azerbaijan, Nagorno-Karabakh, unmanned aerial vehicle, UAV, UCAV*

Kiss Beatrix hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék Bea9714@gmail.com orcid.org/0000-0002-9876-6760	Beatrix Kiss Student University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aerospace Controller and Pilot Training Bea9714@gmail.com orcid.org/0000-0002-9876-6760
Dr. Palik Mátyás katonai repülési dékánhelyettes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék palik.matyas@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2304-372X	Mátyás Palik, PhD Vice-dean for Military Aviation, Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aerospace Controller and Pilot Training palik.matyas@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-2304-372X

A 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosító számú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg.

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 131–139. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.10

Dikácz Csaba

Bombák Berlinre, 1940. június 7–8.

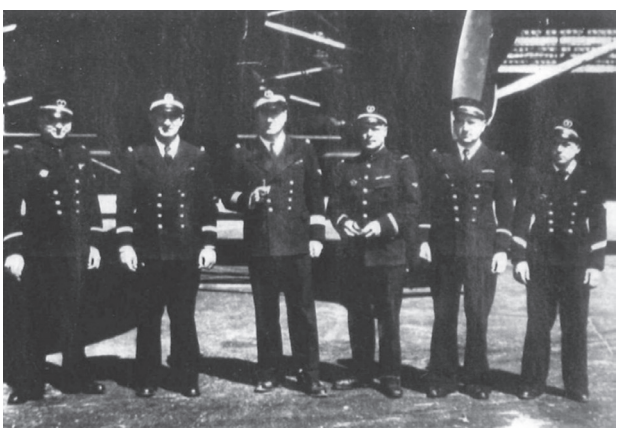
Adalékok Berlin első szövetséges bombázásához

A cikk a repüléstörténet egyik kevésbé ismert légi eseményének, a hitleri Németország fővárosa, Berlin első – a francia haditengerészeti légierő részéről történő – bombázásának körülményeit, meglepetésszerű és vakmerő végrehajtását és az azt lehetővé tevő nagy hatótávolságú Farman bombázó géptípusát mutatja be.

Kulcsszavak: *második világháború, légierő, bombázás, Franciaország, Berlin, légvédelem*

1. Bevezetés

Ha egy kvízműsorban megkérdeznék, vajon hogyan kapcsolódik össze Jules Verne francia író és Berlin, Németország fővárosa, akkor valószínűleg kevés versenyző tudná a helyes választ. Azok közül is, akik jól ismerik a második világháború történetét, kevesek számára ismert egy, a francia haditengerészeti légierőhöz kapcsolódó esemény.



1. ábra
A „Jules Verne" legénysége [4]

A második világháború történetéből általában úgy ismeretes, hogy a hitleri Németország fővárosának, Berlinnek első bombázását 1940. augusztus 25-ről 26-ra virradó éjszaka – egy Londont előző éjszaka ért, valószínűsíthetően tévedésből bekövetkezett német bombatámadásra

válaszul – a Királyi Légierő (Royal Air Force – RAF) bombázói hajtották végre.[1] Ezzel szemben azonban az „elsőbbség" a francia tengerészeti légierő *(Aéronautique Navale)* kötelékébe tartozó, tengerentúli repülésekre használt polgári utasszállítóból bombázóvá átalakított, a híres francia regényíró nevéről „Jules Verne"-re keresztelt Farman NC. 223.4 repülőgépet vezető Henri-Laurent Daillière korvettkapitányt és legénységét[2] illeti [7, p. 452].

2. Előzmények

1940. május 10-én kezdetét vette a „Fall Gelb", azaz a német támadás Hollandia, Belgium, Luxemburg és Franciaország ellen.

Ugyanezen a napon került sor a német légierő, a Luftwaffe Párizs elleni első, közel 300 repülőgéppel végrehajtott bombázására a 28. Bombázóezred *(Kampfgeschwader 28)* részéről *(Operation Paula).* A több száz polgári áldozatot követelő támadásért a franciák bosszút kívántak állni [4]. A francia légügyi minisztérium parancsot küldött a Farman bombázókkal Bordeux-ban állomásozó Daillière századosnak Berlin mielőbbi bombázására. Habár első hallásra igen kockázatos, mondhatni öngyilkos küldetésnek tűnt, Daillière rövid időn belül megtervezett egy meglepetésszerű támadást, amelyet a típus egyetlen erősségére, a kivételes hatótávolságára épített.

3. A támadás

Június 7-én kora délután 15:30 körül,[3] a Bordeaux melletti Mérignac repülőteréről körülbelül 18 000 l üzemanyaggal feltöltve, továbbá a 8 db 250 kg-os, valamint 80 db 10 kg-os gyújtóbombával a fedélzetén, 6 fős személyzettel felszállt a „Jules Verne". Ezt követően északi irányban haladva az atlanti partok mentén repült, majd az Angol (La Manche) csatornánál keleti irányban a belga, holland és északnémet partvonalat követve, a légvédelem figyelmét elkerülendő alacsony magasságon érte el az Északi-tengert.

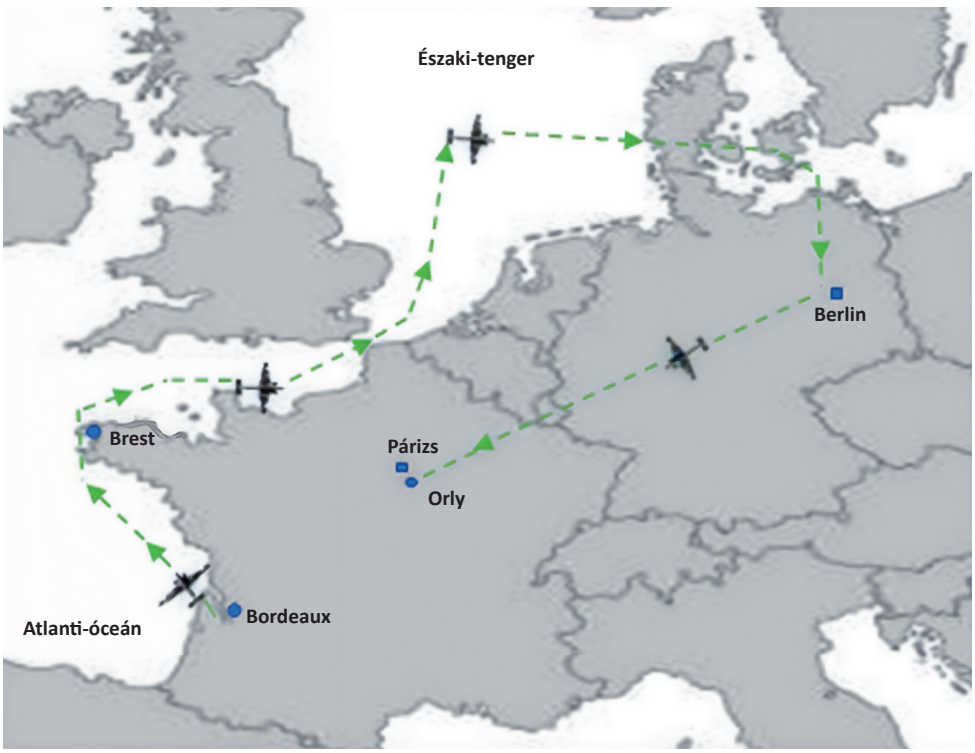
Az április óta németek megszállta Dánia déli részén keresztül átrepültek a Balti-tenger felé, végül Stettinnél (ma Szczecin, Lengyelország) déli irányba fordulva célba vették a Harmadik Birodalom fővárosát. Bár a háborús állapotokra tekintettel a gép személyzete egyfajta navigációs kihívásra számított az elsötétítés miatt, legnagyobb meglepetésükre a horizonton feltűnő főváros fényárban úszva fogadta „kéretlen látogatóit". A németek nyilvánvalóan nem számítottak ellenséges támadásra, legkevésbé talán a Balti-tenger irányából. A bombázó valamikor éjfél környékén, a felhők borította Berlin keleti külvárosához érve és megpillantva Tempelhof reptérének fényeit – a német légvédelem megtévesztésére – leszállást szimulált, majd északi irányba, Tegel felé vette az irányt. Mintegy 350 km/h sebességgel, mindösszesen 100 m magasan repülve perceken belül elérték a Berlin északi

[1] Az első nagyobb, 82 közepes bombázóból álló kötelékkel végrehajtott tömeges bombatámadásra Winston Churchill brit miniszterelnök személyes parancsára került sor.

[2] Névsor (balról jobbra): Corneillet altiszt fedélzeti mérnök, Comet zászlós navigátor, Daillière korvettkapitány gépparancsnok, Yonnet törzsőrmester pilóta, Scour altiszt rádiós és Deschamps altiszt géppuskás-bombázó.

[3] A felszállási időt annak megfelelően választották meg, hogy a cél (Berlin) fölé tervezetten, valamikor az éjszaka közepén érkezzenek.

külvárosában, Pankow kerületben található Siemens-Werke üzemét, ahol útjára indították a negyedtonnás bombákat. A bombázás technikai feltételeiről P. Comet navigátor így számolt be később: „Készen álltam a bombázásra, amikor észrevettem, hogy a célzóberendezés nem megfelelően került beszerelésre, ezért orromat a pilótafülke üvegére tapasztottam." Eközben Corneillet és Deschamps az utasok számára kialakított ajtón keresztül kézzel dobálták ki a több tucat gyújtóbombát, és – a történet szerint – Corneillet cipőjét is, Hitlernek címzett „jókívánság" kíséretében.



2. ábra
A repülés útvonala [6]

A bombák becsapódásai nyomán megszólaltak a légoltalmi szirénák, életre kelt a meglepetéséből ébredő berlini légvédelem. A koordinálatlan elhárító tüzet és a kereső reflektorok fénycsóváit összezavarandó, ahelyett, hogy újra északra fordultak volna, délnyugat felé vették az irányt. Végül minden viszontagság ellenére, jelentős károsodás nélkül, biztonságosan elérték a francia határt, majd a háborús övezeten átrepülve június 8-án reggel, közel 3000 mérföldet (kb. 4828 km) megtéve, 13 és fél órányi repülést követően épségben leszálltak a Párizs melletti Orly repülőtéren. Daillière és legénysége kimerülten, de feladatukat teljesítve annál boldogabban, elégedetten fogadhatták feletteseik gratulációit.

3. ábra
Berlin első bombázása (Roy Grinnel festménye) [8]

4. A repülőgép

A Farman és Hanriot repülőgépgyár 1936-ban kezdett el dolgozni egy nagy hatótávolságú bombázó, az F.223 építésén, amely a francia légierő számára készült 24 db F.222 továbbfejlesztett változatának tekinthető. Bár még csak a tervezőasztalon létezett ez a régi formatervezésű típus, a légügyi minisztérium ennek ellenére egy prototípust rendelt az Air France légitársaság részére, hogy ezzel tudjon majd menetrend szerinti járatként közlekedni Párizs és New York között (az Azori-szigetek érintésével). A bombázó terve – néhány változtatással – megfelelőnek tűnt a nagy távolságú polgári légi közlekedéshez.

Az F-APUZ lajstromot kapott F.223.1 megnevezésű civil prototípus tesztrepülései 1937. június 12-én kezdődtek meg. A „nem túl formatervezett" gép kialakítása a kilenc példány legyártása során alapvetően nem változott; egyfedelű (monoplán), felső szárnyú, kúpos törzsű, külső merevítésű, dupla függőleges vezérsíkkal. A külső merevítésű szárnyak alá párban egy-egy 720 LE teljesítményű Hispano-Suiza 12 hengeres soros motort szereltek. A törzsben elhelyezett tartályaiban 3091 gallon (kb. 14 000 l) üzemanyagot tudott befogadni, aminek köszönhetően a gép – kortársaihoz képest – kirívóan magas, közel 5000 mérföldes (kb. 8047 km) hatótávolsággal rendelkezett. Bár 1937 szeptemberében az ismert francia pilóta, Paul Codos vezette repülőgép részt vett az Istres–Damaszkusz–Párizs-útvonalon zajló légi versenyen, a mindösszesen 233 mérföld/óra (kb. 375 km/h) sebességével utolsóként ért célba. Azonban a következő hetekben a rakomány nagyságával rekordot állított fel az ilyen távolságú szállításban.

4. ábra
Az NC 223.4 (felül) és az NC 223.3 (alul) közötti különbség [9]

A Laurent Guerrero névre keresztelt géppel Codos és legénysége 1937. november 20-án 2 nap, 10 h és 41 min alatt elrepült Istres-ből Chile fővárosába, Santiagóba. A nagy távolságú szállítási képességét bizonyítva az Air France átvette a gépet észak-atlanti viszonylatú postaszállításokra. Kisebb változtatásokkal három gépet rendeltek. A Laurent Guerrero 1938 szeptemberéig teszt- és képzési célokra szolgált.

Az Air France három F.2230 (később NC.2230) jelölésű szállítógépet rendelt transzatlanti utakra. Az elsőként elkészült, az F-AQJM lajstromot viselő példány 1938. április 28-án teljesítette első repülését. Ez hasonló volt a bombázó változathoz, de a teherszállítás miatt meghosszabbított és kiszélesített törzzsel rendelkezett. 1939 elején a típus új motort, négy, egyenként 920 LE-s Hispano-Suiza 12Y-38/39-et kapott. Az új típusmegjelölése NC.223.4 no. 01. A módosított gép először 1939. március 15-én emelkedett a levegőbe. A típus másik két példánya szintén abban az évben készült el. A három gép a Camille Flammarion (polgári lajstromjele F-AJQM), a Jules Verne (polgári lajstromjele F-ARIN), és a Le Verrier (polgári lajstromjele F-AROA) neveket kapta.

A katonai változat egy prototípusának, az F.223.01-nek az első repülésére 1938. január 18-án került sor. Habár hasonló volt a korábbi változatokhoz, ezt 4, egyenként 1100 LE-s Hispano-Suiza 14 AA csillagmotor hajtotta. Amikor azonban ezek a motorok nem váltak be, lecserélték őket 910 LE-s, soros elrendezésű Hispano-Suiza 12Y-29 motorokra [1]. 1938. október 15-én a gép az NC 223.3 jelölést kapta. A motor hűtési problémái mellett egy leszállás közben bekövetkező baleset 1939. március végéig késleltette a tesztrepülések befejezését. Franciaország 15 ilyen típusú gép legyártására kötött szerződést, azonban 1940 májusáig csupán 9 darabot adtak át. Egyiküket sem vetették be Európában.

A három gép tesztrepüléseit a világháború kezdetén fejezték be. A Camille Flammarion azonnal a francia haditengerészethez került nagy hatótávolságú felderítési feladatokra, Daillière százados parancsnoksága alatt. 1939. október 10-én Bordeux-ból Dakarba repült,

majd folytatta a felderítést a dél-atlanti térségben. A repülés hivatalosan egy Dél-Amerikába vezető kereskedelmi út volt, valójában azonban keresték a német zsebcsatahajót, az Admiral Graf Spee-t és az Admiral Scheer kísérő cirkálót, akik a szövetségesek hajóira vadásztak.

Október közepén, egy üzemanyag-feltöltést követően felszállás közben a gép balesetet szenvedett, de kijavították, és november 13-án visszatérhetett Párizs-Orly repülőterére. Ezután mindhárom NC.223.4 példány a Daillière parancsnoksága alatt álló, a francia haditengerészet Brest közelében található Lanvéoc-Poulmic tengerészeti bázisról üzemelő B5 századába került, ahol nagy hatótávolságú felderítő járőrgépként alkalmazták őket. A Jules Verne első harci bevetésére április kezdetén került sor konvojkísérési feladat formájában, majd 1940. május 6. után megkezdték alkalmassá tételét a bombázófeladatokra. A módosítás során mintegy 4000 l befogadására alkalmas további üzemanyagtartályokat, 2 t teherbírású, 8 rombolóbomba rögzítésére szolgáló bombatartót, védelmi fegyverzetként a szárny mögötti hátsó toronyban, a gép jobb oldalán egy 7,5 mm-es „Darne" mozgatható géppuskát, valamint a törzs alsó részén és a szárnyakon fekete álcafestést kaptak az éjjeli „lopakodás" érdekében [6].

A Jules Verne első bombázóbevetését 1940. május 13-ról 14-re virradó éjszaka, az előrenyomuló német csapatok lassítása céljából az aacheni rendezőpályaudvar és maastrichti vasúti csomópont elleni támadással teljesítette, majd bevetései az azt követő napokban is tovább folytatódtak, a hollandiai Flessingue-ben és Middleburgban található célok ellen. Május 26-án egy Dunkerque felé tartó német katonai konvojt támadtak, jelentős károkat okozva. Június 3-án, különleges feladatként, a fedélzetén Franciaország nemzeti aranytartalékát szállító, Pasteur nevű utasszállító hajót és az Emilé Bertin cirkálót kellett Martinique-ra kísérnie. 1940. június 6-án áttelepült a Bordeaux melletti Mérignac repülőterére, ahonnan elindult másnap a korábban részletezett bevetésére a Harmadik Birodalom fővárosa fölé.

A szerencsés visszaérkezést követően pihenésre és a gép karbantartására nem sok idejük maradt, mivel az új parancs szerint június 10-ről 11-re virradó éjszaka – az előzővel közel azonos útvonalon repülve, a parthoz közel eső – a rostocki Heinkel műveket kellett bombázniuk, amit bár komolyabb sérülésekkel, de ugyancsak sikeresen teljesítettek. Két nappal ezután – az olasz hadüzenetet követően – már a Velence melletti Porto Marghera finomítóit támadták, majd a rákövetkező napon Livornót bombázták. A bombázásokon kívül – mindkét esetben – röplapokat is szórtak Rómára [5].

A sikeres bevetések június 18-án befejeződtek. A június 22-én megkötött fegyverszünetet követően – mivel Bordeaux is a német megszállási zónába került – június 24-én mindhárom Farman (NC 223.4) gépet átrepülték a meg nem szállt Toulouse-ba. 1940. augusztus 7-én a B5 századot – amelynek kötelékébe a Jules Verne is tartozott – feloszlatták, és a gépet a provence-i Marignane-ba „rejtették", ahol Daillière parancsba adta a gép megsemmisítését, amennyiben a németek megjelennének.

Maga Daillière hősi halált halt egy Glenn-Martin 167A3 típusú géppel végrehajtott felderítő repülés során 1942. október 11-én a Sierra Leone-i Freetown felett. A volt francia gyarmat, a mai Szenegál fővárosában, Dakarban temették el.

A gépek sorsa a háború folyamán végül a következőképpen alakult. A Camille Flammarion egy futómű-károsodást eredményező, 1941. január 19-én bekövetkezett balesetet követően Bejrútban a „földön ragadt". A Le Verrier olasz vadászrepülők áldozatává vált 1940. november 27-én, úton Szíria felé [2].

A fent részletezett repüléstörténeti eseményt végrehajtó Jules Verne-t végül – a szövetségesek 1942. novemberi, észak-afrikai partraszállását követően, a Vichy-területek német

megszállására indított művelet megindulása után – a francia ellenállás borította lángba, hogy az ne kerüljön a németek kezére.

5. Zárszó

A Berlin elleni támadás katonai értelemben vett eredménye (az okozott anyagi kár) viszonylag csekély volt, de a repülőgép legfőbb erényére (nagy hatótávolság) és a legénység bátorságára épülő merész tervezésen alapuló, a meglepetésre épülő lélektani (sokk)hatás sikert hozott a repülés végrehajtóinak.[4]

Különösen igaz ez a megállapítás annak fényében, amit még a háború előtt Hermann Göring, Németország légügyi minisztere magabiztosan (hencegve) kijelentett: „Ha egyetlen bomba is a Birodalomra hullana, a nevemet Maierre változtatom!" Ez minden ellenkező értelmezéssel szemben nem egy antiszemita kijelentésnek tekinthető, hanem arra utalt, hogy a Maier gyakori név volt (különösen Bajorországban), így személyes jelentőségét csökkentené a felkínált névváltoztatással. Ezért a német propagandaminisztérium által felügyelten megjelenő német híradásokban légi támadási gyakorlatként szerepelt az akció, leplezve ezzel az események valódi okát, s vele együtt a német légvédelem kudarcát.

5. ábra
Berliniek vizsgálnak egy bombatölcsért 1940-ben a Brandenburgi kapu közelében [2]

Ezzel szemben – érthető okból – a francia sajtóban erről a veszélyes, bár szimbolikus jelentőségű küldetésről megjelenő híradások valószínűleg kielégítették a francia katonai és politikai vezetés bosszúvágyát. A francia admiralitás a támadást követő napon kiadott közleményében egy nagy hatótávolságú bombázó kötelékkel Észak-Berlin ipari negyede ellen végrehajtott

[4] Hasonló hatást váltott ki az amerikai légierő 1942 áprilisában Tokió ellen végrehajtott első légitámadása (az ún. Doolittle akció), amelyre a Pearl Harbour elleni támadás bosszújaként tekintettek.

akcióról számolt be, a közvélemény számára így vált ismertté a valóságban csupán egy bombázógéppel, Daillière parancsnok és személyzete által végrehajtott bátor tett [3, p. 80]. Szimbolikus jelentőségén túl azonban a bombázás a háború menetét nem befolyásolta, a német hadigépezet villámháborúban lerohanta a Benelux-államokat és Franciaországot, rövidesen horogkeresztes zászló került a párizsi Diadalívre.

EN PAGE 2 :
Le Carnet de « Figaro »
Les informations étrangères.
Les Spectacles.
9 JUIN 1940
L'AÉRONAUTIQUE NAVALE
bombarde les usines des faubourgs
DE BERLIN
L'Amirauté française communique :
Une escadrille de l'aéronautique navale a bombardé dans la nuit du 7 juin certaines usines des faubourgs de Berlin. Tous les appareils sont rentrés à leur base.

The Sun
AIR RAID ON BERLIN
ITALY'S ENTRY IN WAR JUNE 13 OR 14 SEEN
Formal Announcement by Mussolini Is Not Expected Until Fascist Legions Have Been Flung Against French.
FRENCH ATTACK SUBURBS; GERMAN ARMIES ADVANCE
Nazis Gain Along Coast and Down Valley of Oise, but Paris Reports Line Holds and Tanks Are Being Isolated.
HOW THE BATTLE OF FRANCE PROCEEDS
BULLETIN

6. ábra
A támadásról tudósító szövetséges napilapok (*Le Figaro* francia [balra] és a *The Sun* brit lap [jobbra])

Felhasznált irodalom

[1] Wikipedia, *Hispano-Suiza 12Y.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Hispano-Suiza_12Y

[2] G. Sweeting, Target Berlin: The First Air-Raid on the German Capital. *Historynet,* 2017. január 23. Online: www.historynet.com/target-berlin-the-first-air-raid-on-the-german-capital.htm.

[3] J. Piekalkiewicz, *The Air War 1939–1945.* Dorset, Blandford Press, 1985.

[4] Les Marins français Bombardaient Berlin. *Berlin Luft Terror,* 2017. május 1. Online: www.berlinluftterror.com/blog/les-marins-francais-bombardaient-berlin

[5] F. R. Kirkland, French Air Strength in May 1940. *Air Power History,* Spring 1993, 40. évf. 1. sz. p. 26.

[6] The French Bomb Berlin: June 7-8, 1940. *Two Voyagers,* [é. n.]. Online: http://twovoyagers.com/blinkynet.net/wwii/verne.html.

[7] A. D. Harvey, „The French Armée de l'Air in May-June 1940: A Failure of Conception," *Journal of Contemporary History,* 25. évf. 4. sz. pp. 447–465. 1990. Online: https://doi.org/10.1177/002200949002500404

[8] 10 Obscure Air Attacks, *Hush Kit,* 2020. december 2. Online: https://hushkit.net/2020/12/02/9-bombing-raids-mishaps-you-probably-havent-heard-of/

[9] https://ostfront.forumpro.fr/t3924-l-incroyable-epopee-du-jules-verne

Bombs on Berlin, 7–8 June, 1940 – The Circumstances of This Daring Action

In this article I would like to introduce the first allied bombing against the capital of the Third Reich, Berlin in early June 1940 by a French Navy Aviation unit. Beside the chronological description of the bombing operation, I will show the type and the characteristics of the bomber that has been transformed from a civilian version with a long range and finally the history (fate) of the combat versions.

Keywords: *World War 2, air forces, France, Berlin, air defence*

Dikácz Csaba alezredes
osztályvezető
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Tanfolyamszervező Intézet

dikacz.csaba@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-7729-7733

Lt. Col. Csaba Dikácz
Head of Department
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Course Management
dikacz.csaba@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-7729-7733

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 141–160. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.11

Antal Péter, Péni Tamás, Tóth Roland

Autonóm kvadkopterek modellezése, identifikációja és geometriai szabályozása agilis manőverezéshez

A cikk egy több lépésből álló eljárást mutat be beltéri kvadkopter dinamikus mozgásmodelljének megalkotására, a modellben lévő fizikai paramétereinek identifikációjára, illetve a modellre épülő pályakövető szabályozás megtervezésére. Az eljárás célja, hogy meggyorsítsa egy új kvadkopterkonstrukció üzembe helyezését, azaz a drón minél rövidebb idő alatt váljon képessé agilis manőverek precíz végrehajtására. A modellezés és szabályozótervezés elméleti hátterének rövid bemutatása után a javasolt konkrét eljárás lépéseit egy valós kvadkopter példáján mutatjuk be. A módszer sikerességét valós repülési tesztekkel vizsgáljuk és értékeljük.

Kulcsszavak: *kvadkopter, dinamikai modell, paraméteridentifikáció, nemlineáris irányítás, beltéri navigáció*

1. Bevezetés

A kvadkopterek folyamatos fejlődése az elmúlt évek során azt eredményezte, hogy ma már számos területen alkalmazzák őket, mint például felderítés mentőakciók során, kamerafelvételek készítése hírközlés céljából, illetve mezőgazdasági monitorozás. Alkalmazási területeik folyamatos bővülésével a kvadkoptereknek egyre összetettebb képességekkel kell rendelkeznie, mint agilis manőverezés akadályok közötti szűk helyeken, kooperáció több drónnal, emberekkel való együttműködés, illetve akrobatikus manőverek bemutatása. A komplex képességek elsajátítását és a széles körű alkalmazhatóságot segíti a kvadkopterek moduláris felépítése is, hiszen az egyes komponensek (motorok, forgószárnyak, akkumulátor, érzékelők) kiválasztását az elvégzendő feladathoz lehet igazítani. Agilis manőverezéshez erős motorok és kis tömeg szükséges, ekkor azonban jellemzően csökken a repülési üzemidő. Ezzel szemben mezőgazdasági monitorozásnál fontos, hogy minél tovább tudjon repülni a drón egy akkumulátorral, viszont jellemzően kevésbé van szükség gyors, pontos manőverek végrehajtására.

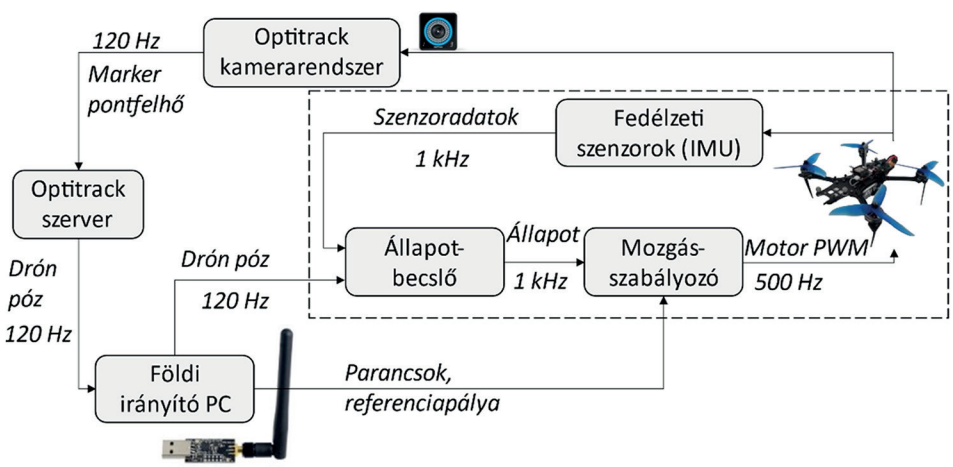
Jelen munka célja, hogy bemutassa egy új, részben ismeretlen paraméterekkel rendelkező kvadkopter modellezését, paraméteridentifikációját és szabályozását annak érdekében, hogy a járművel minél gyorsabb manővereket lehessen végrehajtani, minél precízebb pályakövetés mellett. Fontos célkitűzés, hogy minél kevesebb idő alatt, minél kevesebb szakértői tudás hozzáadásával lehessen elvégezni az egyes lépéseket, így egy új kvadkopterkonstrukciót minél rövidebb idő alatt lehessen üzembe helyezni. A munka beltéri kvadkopternavigációra

fókuszál, ahol adott egy külső pozícionáló rendszer és limitáltak a környezeti hatások, így ideális körülmények között tesztelhetők új irányítási algoritmusok.

Agilis manőverek végrehajtásához szükséges, hogy a drón fizikai képességeit teljes mértékben ki tudjuk használni. Erre csak olyan szabályozási algoritmusok képesek, amelyek a drón teljes működési tartományán érvényes, nemlineáris dinamikus modelljén alapulnak. A legelterjedtebb irányítási módszerek, (PID, LQR), a kvadkopter munkapont körül linearizált modelljét használják, így nem képesek a teljes működési tartományon garantálni az elvárt stabilitást és szabályozási teljesítményt [1], ezért ezeknél komplexebb irányítási stratégiára van szükség. Ilyen algoritmusok tervezéséhez jól használhatók nemlineáris irányítási módszerek, amilyen az irodalomban széles körben alkalmazott geometriai szabályozás [2].

2. Beltéri navigációs rendszer és az egyedi tervezésű drón

Az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratóriumának AIMotionLab tesztkörnyezete azért jött létre, hogy különböző autonóm mobilis robotok (földi és légi járművek) pályatervezési és szabályozási algoritmusait hatékonyan lehessen fejleszteni, implementálni és tesztelni. A beltéri navigációs rendszer felépítését az 1. ábrán látható blokkséma mutatja be.

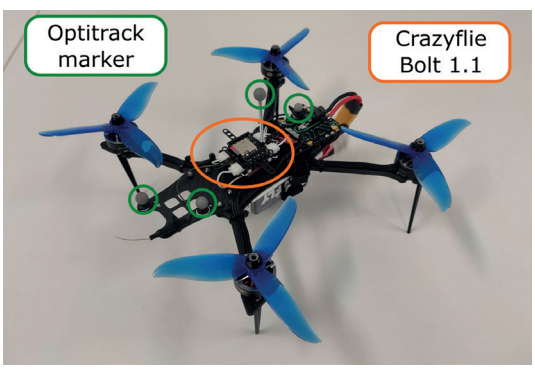


1. ábra
AIMotionLab tesztkörnyezet összeállítása autonóm kvadkopterek beltéri navigációjához [a szerzők]

Beltéri agilis manőverezéshez szükséges pozícionálásra több megoldás is alkalmazható. Ezeknek egyik változata, ahol a szenzor a kvadkopteren helyezkedik el, mint például az *optical flow* alapú lokalizáció, illetve fedélzeti kamerák elhelyezése kiegészítve egyidejű lokalizáció és térképezés (SLAM) algoritmussal. A fedélzeti szenzorokkal megoldható lokalizáció megbízhatósága és pontossága azonban messze elmarad a külső pozicionáló rendszerekétől, amelyekre példa az ultraszélessávú (UWB), WiFi alapú, kódolt fény alapú és infrakamera alapú megoldások. Ezek közül mi a legutóbbit választottuk, pontossága és megbízhatósága miatt.

A lokalizációra tehát Optitrack mozgáskövető *(motion capture)* rendszert alkalmazunk 14 db Prime 13 infrakamerával, amely milliméter alatti pontosságot biztosít a kvadkopterre rögzített markerek pozíciójának meghatározásakor az erre kialakított 3 × 3 × 2 m nagyságú, téglatest alakú repülési térben [3]. A kameraképeket egy szerver számítógép dolgozza fel, amely kiszámolja a drón pozícióját és orientációját (vagyis a pózt), és továbbküldi a földi irányítást végző számítógépnek. Ez a számítógép valós időben kommunikál a drónnal rádiókapcsolaton keresztül, és 120 Hz frekvenciával továbbítja a mérési adatokat, illetve igény esetén egyéb parancsokat (például fel- és leszállás, referenciapálya). Az Optitrack méréseit egy állapotbecslő algoritmus egyesíti a fedélzeti szenzor méréseivel, majd ezt használja fel a mozgásszabályozó algoritmus ahhoz, hogy előállítsa a motorok bemeneteként szolgáló PWM- (impulzusszélesség-moduláció) jeleket.

A földi irányításra alkalmazott számítógépen a Skybrush Server elnevezésű drónmenedzsment-szoftver fut az általunk fejlesztett bővítménnyel kiegészítve [4]. Ez a keretrendszer felelős az Optitrack mérések továbbításáért, és a magas szintű irányításért. Utóbbi magában foglalja a referenciapályák feltöltését, fel- és leszállási parancsok kiadását, biztonsági funkciókat (egyes belső állapotok ellenőrzésén keresztül), illetve a beágyazott fedélzeti számítógépen futó program fordítását és feltöltését. Az asztali számítógép és a kvadkopter közötti kommunikáció a Crazyradio egységen keresztül történik, CRTP *(Crazy RealTime Protocol)* alkalmazásával [5].



2. ábra
Bumblebee kvadkopter fényvisszaverő markerekkel felszerelve [a szerzők]

Jelen munka során a 2. ábrán látható, saját fejlesztésű, Bumblebee névre keresztelt kvadkopter példáján keresztül mutatjuk be a modellezési, paraméteridentifikációs és szabályozási eljárásokat. A kvadkopter alapját egy egyedi tervezésű 250 mm széles karbonszálas váz adja, ehhez van rögzítve a 3 cellás LiPo akkumulátor, illetve 4 db GEPRC GR2306.5 2450KV BLDC motor, amelyeknek mindegyike DALProp Dydlone T5045C Pro forgószárnnyal van felszerelve. A kvadkopter komponenseit úgy választottuk ki, hogy a jármű képes legyen megemelni legalább 250 g hasznos terhet, és egy frissen feltöltött akkumulátorral legalább 10 percig tudjon folyamatosan repülni. A repülésszabályozó rendszer egy Crazyflie Bolt 1.1 egységen fut, amely fel van szerelve egy inerciális mérőegységgel, amely tartalmaz 3 szabadságfokú gyorsulásmérőt és giroszkópot [5]. A kvadkopter tervezésénél azért esett a választásunk

a Crazyflie Bolt egységre, mert korábban több kutatást és fejlesztést is végeztünk Crazyflie 2.1 kvadkopterekkel, amelyek megegyező fedélzeti egységgel vannak felszerelve (ezzel kapcsolatban több publikáció is született, például [6], [7]). Az inerciális szenzor mellett a Bolt egység rendelkezik két mikrokontrollerrel: egy STM32F405 futtatja az állapotbecslő és szabályozó algoritmusokat, egy nRF51822 pedig a földi irányító számítógéppel való rádiós kommunikációt és a komponensek közötti villamos teljesítmény elosztását végzi.

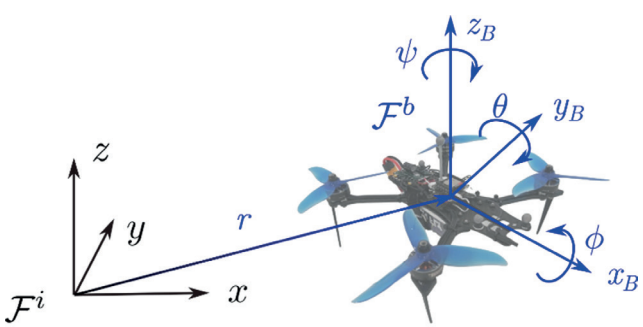
3. Kvadkopter modellezése

3.1. Felhasznált koordináta-rendszerek

A kvadkopter dinamikai egyenleteinek felírásához két koordináta-rendszert alkalmazunk. Az első a világ koordináta-rendszer, amelyet $\mathcal{F}^{\mathrm{i}}$ jelöl, és statikus a kvadkopter környezetéhez képest, a második pedig a kvadkopter tömegközéppontjához rögzített, amelyet $\mathcal{F}^{\mathrm{b}}$ jelöl. A két koordináta-rendszer közötti transzformációt egy transzláció és egy rotáció kombinációjával írjuk le, amelyeket $r \in \mathbb{R}^3$, illetve $R \in \mathrm{SO}(3)$ jelöl, ahol $\mathrm{SO}(3)$ a 3×3 méretű speciális ortogonális mátrixok csoportja. E csoport elemeivel térbeli forgatást lehet leírni, ezért rotációs mátrixoknak nevezzük őket, amelyekre igazak a következő tulajdonságok:

$$RR^{\mathrm{T}} = I \qquad \det(R) = 1 \tag{1}$$

ahol I a 3 dimenziós egységmátrix, $\det(\cdot)$ pedig a determinánst jelöli. A 3D térbeli eltolás és forgatás kombinációjával létrejött transzformációkat a speciális euklideszi csoport [SE(3)] tartalmazza, amely a kvadkopter konfigurációs sokaságaként is értelmezhető. A koordináta-rendszerek és a köztük lévő eltolás vektorának illusztrációja a 3. ábrán látható.



3. ábra
A modell leírásához alkalmazott koordináta-rendszerek és a kvadkopter forgási szögeinek ábrázolása
[a szerzők]

A kvadkopter orientációja az $\mathcal{F}^{\mathrm{b}}$ koordináta-rendszerben leírható a 3. ábrán szemléltetett dőlési *(roll, ϕ),* bólintási *(pitch, θ)* és legyezési *(yaw, ψ)* szögekkel, amelyeket *Euler-szögeknek* nevezünk, vektorukat $\lambda = [\phi \quad \theta \quad \psi]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^3$ jelöli. A későbbiekben tárgyalt dinamikai egyenletek

és szabályozótervezés szempontjából előnyösebb azonban a koordináta-független rotációs mátrix alkalmazása. A forgatási mátrix $\mathcal{F}^{\mathrm{i}}$-ből $\mathcal{F}^{\mathrm{b}}$-be felírható a három Euler-szöggel való egymás utáni forgatások kompozíciójaként:

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}} &= \mathrm{Rot}(x,\phi)\mathrm{Rot}(z,\theta)\mathrm{Rot}(z,\psi) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_\phi & S_\phi \\ 0 & -S_\phi & C_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & -S_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ S_\theta & 0 & C_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\psi & S_\psi & 0 \\ -S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & C_\theta S_\psi & -S_\theta \\ C_\psi S_\phi S_\theta - C_\phi S_\psi & C_\phi C_\psi + S_\phi S_\theta S_\psi & S_\phi C_\theta \\ S_\phi S_\psi + C_\phi C_\psi S_\theta & C_\phi S_\theta S_\psi - C_\psi S_\phi & C_\phi C_\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

ahol $C_\phi = \cos(\phi)$, $S_\phi = \sin(\phi)$, és hasonlóan a többi szög esetében. A rotációs mátrix (1) egyenletben leírt tulajdonságaiból következően a forgatási mátrix $\mathcal{F}^{\mathrm{b}}$-ből $\mathcal{F}^{\mathrm{i}}$-be kifejezhető a következő egyenlettel:

$$R_{\mathrm{b}}^{\mathrm{i}} = \left(R_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}\right)^{-1} = \left(R_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}\right)^{\mathsf{T}} \tag{3}$$

A továbbiakban az $R = R_{\mathrm{b}}^{\mathrm{i}}$ jelölést alkalmazzuk a könnyebb átláthatóság érdekében.

3.2. Mozgásegyenletek

A kvadkoptert egy merev testként modellezzük a 3D térben, amely állandó tömeggel és geometriával rendelkezik, külső erőként pedig a gravitáció hat rá. A kívánt mozgás eléréséhez a forgószárnyak által generált felhajtóerőt használjuk ki, ami a négy elektromos motorra kapcsolt feszültség következtében jön létre. A forgószárnyak szögsebessége (ω_i) és felhajtóereje (f_i) közti összefüggés a következő egyenlettel írható le:

$$f_i = c\omega_i^2, \qquad i \in \{1,2,3,4\} \tag{4}$$

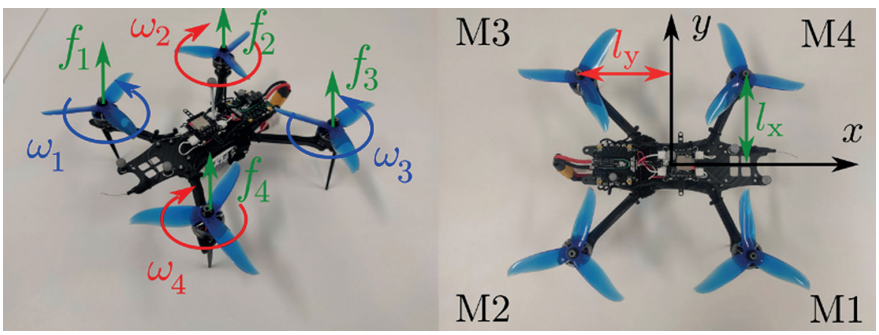
ahol *c* a felhajtóerő-tényezőt *(thrust coefficient)* jelöli. A felhajtóerőn kívül mindegyik forgószárny generál nyomatékot az $\mathcal{F}^{\mathrm{b}}$ koordináta-rendszer függőleges tengelye körül, amelynek értéke szintén négyzetes összefüggés eredményeként számítható:

$$\tau_{\mathrm{z},i} = b\omega_i^2, \qquad i \in \{1,2,3,4\} \tag{5}$$

ahol *b* az ellenállás tényezőt (*drag coefficient*) jelöli. A négy forgószárny által generált felhajtóerő és nyomaték átszámolható az $\mathcal{F}^{\mathrm{b}}$ koordináta-rendszer függőleges tengelye felé mutató erő és három tengelye körüli nyomaték komponensekké a következő összefüggésekkel:

$$
\begin{aligned}
F &= f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \\
\tau_x &= l_x(f_3 + f_4 - f_1 - f_2) \\
\tau_y &= l_y(f_2 + f_3 - f_1 - f_4) \\
\tau_z &= b(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2)
\end{aligned}
\tag{6}
$$

ahol l_x, l_y rendre az egyes forgószárnyak x és y tengelyektől való távolságát jelöli az $\mathcal{F}^b$ koordináta-rendszerben, a 4. ábrának megfelelően.



4. ábra
A forgószárnyak szögsebességének és az általuk kifejtett felhajtóerő irányának ábrázolása [a szerzők]

A kvadkopter dinamikai modelljét a Newton–Euler-egyenletekkel írhatjuk le a következő alakban [8]:

$$
\begin{aligned}
m\ddot{r} &= -mge_3 + FRe_3 \\
J\dot{\omega} &= \tau - \omega \times J\omega \\
\dot{R} &= R\hat{\omega}
\end{aligned}
\tag{7}
$$

ahol m a jármű tömege, g a gravitációs gyorsulás, $r \in \mathbb{R}^3$ és $R \in \mathrm{SO}(3)$ a korábban bevezetett pozícióvektor és rotációs mátrix, $e_3 = [0 \quad 0 \quad 1]^T$, J a kvadkopter inerciamátrixát jelöli, ω pedig a szögsebességét $\mathcal{F}^b$-ben felírva. A kalappal jelölt leképezést az $\{(\hat{\cdot}) : \mathbb{R}^3 \to \mathrm{SO}(3) \mid \hat{x}y = x \times y\}$ kifejezés definiálja, ahol $x, y \in \mathbb{R}^3$. A dinamikai modell bemenetei a korábban bevezetett függőleges irányú erő $F \in \mathbb{R}$ és három tengely körüli nyomaték $\tau = [\tau_x \, \tau_y \, \tau_z]^T \in \mathbb{R}^3$.

3.3. Aktuátormodell

Ahogy a 2. fejezetben említettük, a fedélzeti szabályozó kimenete minden motor számára egy PWM jel, amely azt adja meg, hogy a tápfeszültségnek mekkora részét kapcsoljuk az egyes motorokra. Az eddigiekben bemutatott modell a forgószárnyak szögsebességét használja fel a mozgásegyenletek bemeneteiként alkalmazott erő- és nyomatékkomponensek számításához, így az aktuátormodell a PWM és a szögsebesség kapcsolatát hivatott leírni.

Kefe nélküli egyenáramú (BLDC) motor modellezésével foglalkozik a [9] doktori értekezés, ebben a dinamikai egyenletek a következők:

$$\begin{aligned} J_{\mathrm{m}}\dot{\omega}_{\mathrm{m}} &= -k_{\mathrm{m}}\omega_{\mathrm{m}} + \tau_{\mathrm{e}} - \tau_{\mathrm{m}} \\ \tau_{\mathrm{e}} &= k_{\mathrm{q},0} i_{\mathrm{a}} - k_{\mathrm{q},1} i_{\mathrm{a}}^2 \\ U &= k_{\mathrm{e}}\omega_{\mathrm{m}} + R_{\mathrm{a}} i_{\mathrm{a}} \end{aligned} \tag{8}$$

ahol J_{m} a forgórész tehetetlenségi nyomatéka, k_{m}, k_{e}, $k_{\mathrm{q},0}$,$k_{\mathrm{q},1}$ konstansok, R_{a} az armatúra-ellenállás, i_{a} az armatúraáram, τ_{e} az indukált nyomaték, τ_{m} a terhelés nyomatéka, U pedig a bemeneti feszültség, amelynek számítása a PWM értékből és a maximális tápfeszültségből: $U = U_{\max} \cdot PWM$. A motor szögsebességét itt ω_{m} jelöli, hiszen az előző fejezettel ellentétben csak egy motor viselkedését írják le az egyenletek. A további fejezetekben azonban az előzőekhez hasonlóan az adott motor sorszáma ($i \in \{1,2,3,4\}$) szerepel az alsó indexben.

A (8) kifejezés első egyenletével leírt dinamika kis méretű BLDC-motorok során nagyon gyors a bemenet változásához képest, ezért ezt elhanyagoljuk. A második és harmadik egyenletek statikus függvénykapcsolatot írnak le a bemeneti feszültség (így a PWM) és a motor szögsebessége között, amit általánosan jelölhetünk a következő összefüggéssel:

$$\omega_{\mathrm{m}} = f_{\mathrm{m}}(U, \vartheta) \tag{9}$$

A statikus f_{m} karakterisztika realizációját és ϑ-val jelölt paramétereinek meghatározását az 5. fejezetben fogjuk részletesen bemutatni. A kvadkopter modelljének összes paraméterét – amelyeknek identifikációjára szükség van a szabályozó algoritmusok implementációjához – az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

A kvadkoptermodell paraméterei, amelyek egy új konstrukció esetén ismeretlenek [a szerzők]

Paraméter	Jelölés	Mértékegység
Tömeg	m	kg
Inerciamátrix	J	kgm^2
Rotortáv	l_x, l_y	m
Ellenállás-tényező	b	$\mathrm{Nms}^2/\mathrm{rad}$
Felhajtóerő-tényező	c	$\mathrm{Ns}^2/\mathrm{rad}$
Aktuátorparaméterek	ϑ	–

4. Geometriai szabályozás

4.1. Áttekintés

A kvadkopterek dinamikája – ahogyan azt az előző fejezetben bevezettük – alapvetően instabil, ezért szükség van egy alsó szintű szabályozóra, amely a megfelelő motorfeszültségek beállításával egyrészt stabilizálja a járművet, másrészt biztosítja az előírt referenciapálya követését. Ez az úgynevezett alsó szintű *(low-level)* szabályozás egy széles körben kutatott téma, számos eredménnyel. A legegyszerűbb és leginkább elterjedt megoldás a lineáris időinvariáns (LTI) szabályozók alkalmazása, amilyen például a PID és az LQR [1]. E szabályozó algoritmusok tervezésénél a bevezetett nemlineáris dinamikai egyenleteket linearizáljuk egy munkapont közelében (ez jellemzően a lebegési állapot), majd erre az LTI rendszerre szisztematikusan

tudunk szabályozót konstruálni és a paramétereit behangolni. Ennél valamivel komplexebb módszer a linearizálás visszacsatolással *(feedback linearization),* ahol a dinamikus modelldifferenciálás simaságát kihasználva állapotvisszacsatolás segítségével integrátorsorrá alakítható a rendszer, így szintén alkalmazható az LTI szabályozótervezés folyamata [10].

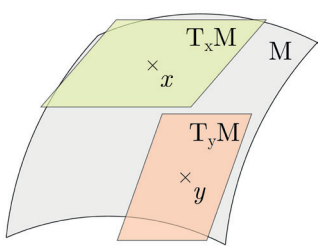
Az eddigiekben felsorolt alsó szintű szabályozó algoritmusok viszonylag könnyen és gyorsan implementálhatók, azonban hátrányuk, hogy egyrészt nem garantálják a stabilitást a kvadkopter teljes működési tartományára, másrészt pedig legtöbbször nem képesek gyors, agilis referenciapályák precíz követésére (legfeljebb sok hangolással és szakértői tudás felhasználásával). Annak érdekében, hogy ezeket a hátrányokat kiküszöböljük, egy geometriai szabályozót mutatunk be ebben a fejezetben [2] alapján. A geometriai szabályozó tervezése közvetlenül a kvadkopter konfigurációs sokaságán $[\mathrm{SE}(3)]$ van végrehajtva, ezzel a pályakövetési hibajelek exponenciális konvergenciáját éri el a teljes működési tartományon (nagy bedőlési szögek esetén is), így biztosítja a nagy sebességű, agilis manőverekhez szükséges teljesítményt.

4.2. Differenciális simaság

A 3.2. fejezetben bemutatott dinamikai modell alulaktuált, mivel 6 szabadsági foka van és csupán 4 bemenete. A szabályozás során azonban kihasználjuk, hogy a modell differenciálisan sima (differentially flat), ami azt jelenti, hogy az összes állapot és beavatkozó jel kifejezhető az úgynevezett differenciálisan sima kimenetek időbeli deriváltjaiból [11]. A (7) egyenletek esetén a differenciálisan sima kimenetek a legyezési szög, illetve a pozíció 3 koordinátája (a levezetés megtalálható többek között a [12] irodalomban), vagyis a tervezés során elegendő az $x_\mathrm{d}(t)$, $y_\mathrm{d}(t), z_\mathrm{d}(t), \psi_\mathrm{d}(t)$ referenciapályákat megtervezni, ezek egyértelműen meghatározzák az összes további állapot trajektóriáját.

4.3. Szabályozó algoritmus

A geometriai szabályozó tervezésekor a cél egy referenciapozíció és -orientáció követése, amelyeknek jelölése $r_\mathrm{d}(t) = [x_\mathrm{d}(t), y_\mathrm{d}(t), z_\mathrm{d}(t)]^\top$, illetve $R_\mathrm{d}(t) \in \mathrm{SO}(3)$, azonban az időfüggés explicit jelölését a levezetés során elhanyagoljuk a könnyebb átláthatóság érdekében.

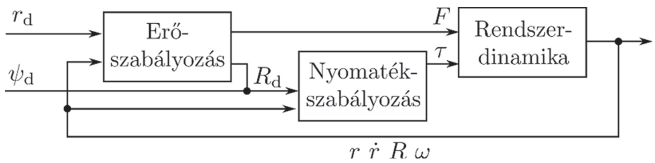


5. ábra

Az M sokaság ábrázolása két érintőterével: T_xM az x pontban és T_yM az y pontban. Az ábra szemlélteti, hogy egy T_xM-beli vektort át kell transzformálni T_yM érintőtérbe ahhoz, hogy azokkal műveleteket lehessen végezni [13]

A pályakövetési hibajeleket a pozíció és sebesség esetén az állapot és a referenciajel különbségeként definiáljuk:

$$\begin{aligned} e_{\mathrm{r}} &= r - r_{\mathrm{d}} \\ e_{\mathrm{v}} &= v - v_{\mathrm{d}} \end{aligned} \tag{10}$$



6. ábra
A geometriai szabályozó blokkdiagrammja (a szerzők [2] alapján)

Az orientáció és a szögsebesség esetében úgy választjuk meg a hibajelek számítási módját, hogy azok a konfigurációs sokaság [amely ez esetben $\mathrm{SO}(3)$] érintőterének elemei legyenek minden időpontban. Ehhez bevezetjük a következő orientációs hibafüggvényt:

$$\Psi(R, R_{\mathrm{d}}) = \frac{1}{2}\mathrm{tr}\left(I - R_{\mathrm{d}}^{\top} R\right) \tag{11}$$

ahol $\mathrm{tr}(\cdot)$ a mátrix nyomát *(trace)* jelöli és I a 3×3 méretű egységmátrix. A hibafüggvény lokálisan pozitív definit $R_{\mathrm{d}}^{\top} R = I$ azon környezetében, ahol az aktuális és a referenciaorientáció eltérése kisebb, mint π. Felhasználva a $-\frac{1}{2}\mathrm{tr}(\hat{x}\hat{y}) = x^{\top} y$ azonosságot, a hibajel deriváltja a következő kifejezéssel írható fel:

$$\mathrm{D}_{\mathrm{R}}\Psi(R, R_{\mathrm{d}}) \cdot R\hat{\eta} = \frac{1}{2}\left(R_{\mathrm{d}}^{\top} R - R^{\top} R_{\mathrm{d}}\right)^{\vee} \cdot \eta \tag{12}$$

ahol $\delta R = R\hat{\eta}, \eta \in \mathbb{R}^3$ a forgatási mátrix variációja, és a $(\cdot)^{\vee}$: $\mathrm{SO}(3) \to \mathbb{R}^3$ operátor a korábbiakban bevezetett kalap operátor inverzét jelöli. Ezek alapján az orientációs hibát az alábbi képlettel adjuk meg:

$$e_{\mathrm{R}} = \frac{1}{2}\left(R_{\mathrm{d}}^{\top} R - R^{\top} R_{\mathrm{d}}\right)^{\vee} \tag{13}$$

Az aktuális és a referencia forgatási mátrixok érintővektora, azaz $\dot{R} \in \mathrm{T}_{\mathrm{R}}\mathrm{SO}(3)$ és $\dot{R}_{\mathrm{d}} \in \mathrm{T}_{\mathrm{R}_{\mathrm{d}}}\mathrm{SO}(3)$ különböző érintőtérben van értelmezve (ahogy azt az 5. ábra szemlélteti), ezért közvetlenül nem összehasonlíthatók a szögsebesség hibavektorának számításához. Annak érdekében, hogy ezt el tudjuk végezni, $\dot{R}_{\mathrm{d}}$ deriváltat áttranszformáljuk $\mathrm{T}_{\mathrm{R}}\mathrm{SO}(3)$ érintőtérbe a következő kifejezés felírásával:

$$\dot{R} - \dot{R}_{\mathrm{d}}\left(R_{\mathrm{d}}^{\top} R\right) = R\hat{\omega} - R_{\mathrm{d}}\hat{\omega}_{\mathrm{d}} R_{\mathrm{d}}^{\top} R = R(\omega - R^{\top} R_{\mathrm{d}}\omega_{\mathrm{d}})^{\wedge} \tag{14}$$

Ez alapján már tudjuk definiálni a szögsebesség hibavektorát, a következő kifejezéssel:

$$e_{\omega} = \omega - R^{\top} R_{\mathrm{d}}\omega_{\mathrm{d}} \tag{15}$$

A hibajelek felhasználásával a 3.2. fejezetben bevezetett erő és nyomaték beavatkozó jeleket a következő formában tudjuk szabályozni:

$$\begin{aligned} F &= (-k_{\mathrm{r}}e_{\mathrm{r}} - k_{\mathrm{v}}e_{\mathrm{v}} - mge_3 + m\ddot{r}_{\mathrm{d}})^{\top}Re_3 \\ \tau &= -k_{\mathrm{R}}e_{\mathrm{R}} - k_{\omega}e_{\omega} + \omega \times J\omega - J(\hat{\omega}R^{\top}R_{\mathrm{d}}\omega_{\mathrm{d}} - R^{\top}R_{\mathrm{d}}\dot{\omega}_{\mathrm{d}}) \end{aligned} \tag{16}$$

ahol k_{r}, k_{v}, k_{R}, $k_{\omega} \in \mathbb{R}$ ennek a modell alapú szabályozónak az erősítései. Az így definiált úgynevezett geometriai szabályozó [2] biztosítja, hogy a pályakövetési hibajelek zérus egyensúlyi pontja exponenciálisan stabil, feltéve, hogy a referenciapálya teljesíti a következő követelményeket:

$$\|-mge_3 + m\ddot{r}_{\mathrm{d}}\| < B \tag{17}$$

ahol B egy pozitív konstans, a kezdeti feltételekre pedig igaz, hogy

$$\begin{aligned} F &= (-k_{\mathrm{r}}e_{\mathrm{r}} - k_{\mathrm{v}}e_{\mathrm{v}} - mge_3 + m\ddot{r}_{\mathrm{d}})^{\top}Re_3 \\ \tau &= -k_{\mathrm{R}}e_{\mathrm{R}} - k_{\omega}e_{\omega} + \omega \times J\omega - J(\hat{\omega}R^{\top}R_{\mathrm{d}}\omega_{\mathrm{d}} - R^{\top}R_{\mathrm{d}}\dot{\omega}_{\mathrm{d}}) \end{aligned} \tag{18}$$

ahol ψ_1 egy felhasználó által választott konstans, $\lambda_{\min}(J)$ pedig az inerciamátrix legkisebb sajátértékét jelöli. A hibajelek exponenciális stabilitásának és konvergenciájának bizonyítása megtalálható a [2] irodalomban.

Ahogy a 4.2. fejezetben említettük, a kvadkopter dinamikai modellje differenciálisan sima, ezért elegendő a pozíció és a legyezési szög referenciapályáját megtervezni. A szabályozó algoritmusban felhasznált referenciaorientációs mátrix $R_{\mathrm{d}} = [r_1, r_2, r_3]$ a differenciálisan sima kimenetekből a következő módon fejezhető ki:

$$\begin{aligned} r_1 &= r_2 \times r_3 \\ r_2 &= \frac{r_3 \times [\cos\psi_{\mathrm{d}}, \sin\psi_{\mathrm{d}}, 0]}{\|r_3 \times [\cos\psi_{\mathrm{d}}, \sin\psi_{\mathrm{d}}, 0]\|} \\ r_3 &= \frac{-k_{\mathrm{r}}e_{\mathrm{r}} - k_{\mathrm{v}}e_{\mathrm{v}} + mge_3 + m\ddot{r}_{\mathrm{d}}}{\|-k_{\mathrm{r}}e_{\mathrm{r}} - k_{\mathrm{v}}e_{\mathrm{v}} + mge_3 + m\ddot{r}_{\mathrm{d}}\|} \end{aligned} \tag{19}$$

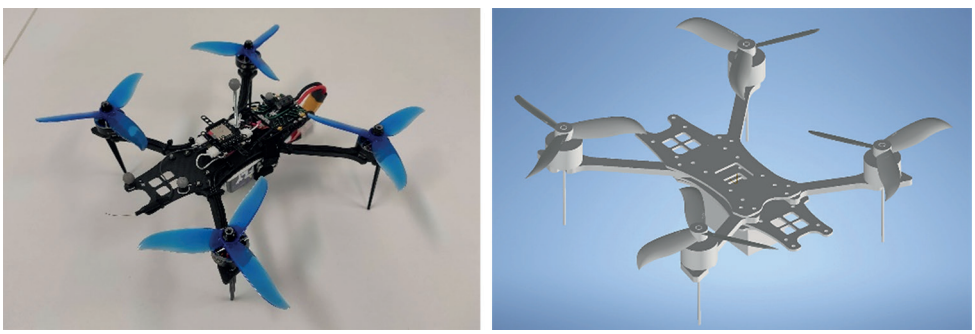
Az így számított referencia forgatási mátrix harmadik oszlopvektora, vagyis r_3 mindig az előírt erő bemenet irányába mutat (amerre a forgószárnyak felhajtóerőt képesek generálni), r_2 mindig merőleges a többi két oszlopvektorra, r_1 pedig a jármű haladási irányát fejezi ki.

5. Paraméteridentifikáció

Az előző fejezetben bemutatott geometriai szabályozó algoritmus függ az aktuális kvadkopter fizikai paramétereitől, ebből következően a stabilitás és az elvárt szabályozási teljesítmény csak akkor garantálható, amennyiben e paraméterek numerikus értéke ismert. Az összes identifikálandó paramétert az 1. táblázatban gyűjtöttük össze.

5.1. Tömeg és inercia

A jármű tömegének mérését egyszerű mérleg használatával végeztük el, ami $m = 0{,}605$ kg-ra adódott. Az inerciamátrix megállapítása ennél jóval bonyolultabb, hiszen közvetlen méréséhez dinamikai vizsgálatok szükségesek. Ilyen mérési elrendezésre számos példa található az irodalomban (lásd [14], [15]), azonban ezeknek az elvégzéséhez speciális felszerelés és mérőeszközök szükségesek. Egy másik elterjedt módszer a jármű számítógépes modelljének (CAD) elkészítése, hiszen a modern CAD-szoftverek képesek az egyes komponensek fizikai paraméterei alapján kiszámítani az összeállított merev test inerciáját. Mi az utóbbit választottuk, hiszen egyrészt gyorsabb és költséghatékonyabb a végrehajtása, másrészt pedig az elkészített CAD-modell később használható szimulációkra is.



7. ábra
A Bumblebee kvadkopter és az elkészített CAD-modell [a szerzők]

Az elkészült 3D modell a 7. ábrán látható, a valós kvadkopter mellett. A jármű komponensei közül a karbonszálas váznak, a forgószárnyaknak és az akkumulátornak ismert a pontos geometriája és tömege, így ezek egy az egyben kerültek a modellbe. A BLDC-motorokat hengergeometriával közelítettük, tömegük pedig ezeknek is ismert. A 3D modellben nem szerepelnek a hardverek kábelei és az Optitrack mozgáskövetéshez használt markerek, azonban ezeknek a tömege elhanyagolható, így az inerciát is nagyon kis mértékben befolyásolják. A pontos méretek és tömegek (sűrűségek) megadása után a CAD szoftver képes az inerciamátrix számítására, amelynek numerikus értéke esetünkben a következőnek adódott:

$$J_{\mathrm{CAD}} = \begin{bmatrix} J_{\mathrm{xx}} & J_{\mathrm{xy}} & J_{\mathrm{xz}} \\ J_{\mathrm{yx}} & J_{\mathrm{yy}} & J_{\mathrm{yz}} \\ J_{\mathrm{zx}} & J_{\mathrm{zy}} & J_{\mathrm{zz}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1590{,}5 & -3{,}14 & -0{,}135 \\ -3{,}14 & 1481{,}3 & -49{,}18 \\ -0{,}135 & -49{,}18 & 2768{,}4 \end{bmatrix} \mathrm{kgmm}^2 \tag{20}$$

Mivel a jármű geometriája közel szimmetrikus, a diagonális elemek 2–3 nagyságrenddel nagyobbak a többinél, így utóbbiakat gyakran 0-val közelítjük.

5.2. Bemeneti paraméterek

A kvadkopter dinamikus modell bemeneteinek az $[F\ \tau^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ vektort tekintjük, ahogy a 3.2. fejezetben leírtuk. Ezzel szemben, ahogy a 2. fejezetben említettük, a motorokat impulzusszélesség-moduláció (PWM) jellel vezéreljük, amely egy kitöltési tényező, vagyis azt adja meg, hogy

a tápfeszültségnek mekkora részét kapcsoljuk az egyes motorokra. Ahhoz tehát, hogy a (16) egyenletekkel leírt szabályozó algoritmust a valós rendszeren implementáljuk, szükség van a PWM–erő és PWM–nyomaték összefüggések meghatározására. Ezen összefüggések részben adottak (4) és (5) egyenletekkel, azonban ekkor még mindig szükség van a felhajtóerő-tényező és az ellenállás-tényező mérésére, valamint a PWM és a motor szögsebessége közötti kapcsolat ismeretére. A következő alfejezetek során ezeket az összefüggéseket tárgyaljuk.

5.2.1. PWM–szögsebesség

A PWM–szögsebesség karakterisztikát a (9) egyenlettel írjuk le, amihez $\vartheta = [\vartheta_1 \quad \vartheta_2]^\top$ paramétereket használjuk. Ahogy az inerciamátrix meghatározásánál, a további paraméterek mérésénél is cél volt minél egyszerűbb módszerek és minél kevesebb műszer alkalmazása annak érdekében, hogy a tárgyalt eljárásokkal egy új kvadkopter paraméterei gyorsan és egyszerűen becsülhetők legyenek. Jelen esetben a motor szögsebességének mérésére külső szenzort lehetne alkalmazni (például tachométert), azonban enélkül is lehetséges a becslése. A legtöbb kvadkopter-összeállításban szereplő BLDC-motor adatlapján szerepel egy KV rövidítéssel jelölt mérőszám, amely azt jelzi, hogy 1 V (volt) feszültségnövekedés esetén mennyivel nő a motor fordulatszáma. Az általunk alkalmazott motor adatlapján 2450 KV szerepel [16].

A PWM–szögsebesség karakterisztikát emellett jellemzi, hogy a motor egy adott PWM_0 küszöbérték alatt nem kezd el forogni, ezért a lineáris karakterisztika csak efölött érvényesül. A küszöbérték meghatározásához addig növeltük a PWM-jelet, amíg el nem kezdett forogni a motor, ennek értéke $\mathrm{PWM}_0 = 0{,}0305$. Ezzel felírható a karakterisztika becslése:

$$\begin{aligned}
\omega_i &= \vartheta_1 + \vartheta_2 \cdot \mathrm{PWM}_i \\
\frac{\partial \omega_i}{\partial U_i} &= 2450 \frac{\mathrm{rpm}}{\mathrm{V}} \\
\frac{\partial \omega_i}{\partial \mathrm{PWM}_i} &= 2450 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{U_{\max}}{\mathrm{PWM}_{\max}} = 2450 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{16.8}{1} \frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}} = 4310{,}17 \frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}} = \vartheta_2 \\
\vartheta_1 &= -\mathrm{PWM}_0 \cdot \vartheta_2 = -0{,}0305 \cdot \vartheta_2 = -131{,}538 \frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}} \\
\omega_i &= -131{,}538 + 4310{,}17 \cdot \mathrm{PWM}_i
\end{aligned} \tag{21}$$

ahol $i \in \{1,2,3,4\}$ az adott motor indexe, $\mathrm{PWM}_i \in [0,1]$ a PWM jel, ω_i a motor szögsebesség, $U_{\max} = 16{,}8\ \mathrm{V}$ pedig a maximális tápfeszültség.

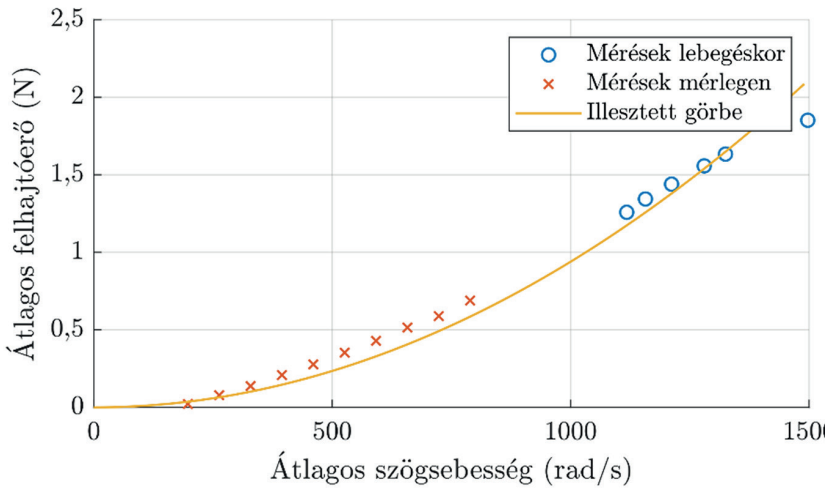
5.2.2. Szögsebesség–felhajtóerő

A szögsebesség–felhajtóerő karakterisztika mérése azt adja meg, hogy adott erőbemenetet hogyan tudunk realizálni a forgószárnyak szögsebességének beállításával. Az összefüggés meghatározásához két mérési eljárást alkalmaztunk:

1. Különböző súlyokkal felszerelve lebegési állapotban rögzítettük a PWM-jeleket, a felhajtóerő pedig ekkor ismert: $f_i = mg/4$ az összes forgószárnyra.
2. Mérlegre helyeztük a kvadkoptert, és mind a négy motorra ugyanakkora PWM-jelet kapcsoltunk, amelynél még nem száll fel a jármű, majd így rögzítettük a mérleg által

mért tömeget. Ekkor a felhajtóerő: $f_i = (m - m_s)g/4$, ahol m_s a mérleg által kijelzett tömeg értéke.

A PWM-jeleket szögsebességgé a (21) összefüggéssel alakítottuk át. Fontos megjegyezni, hogy az 1. módszerhez szükség van egy szabályozóra, amellyel képes a drón lebegni egyhelyben. Erre egy PID-szabályozót alkalmaztunk, amely beépített funkcióként elérhető a Crazyflie Bolt 1.1 fedélzeti számítógépre [5]. Ezzel ugyan lebegni képes a drón, gyors manőverek végrehajtására azonban nem alkalmas.



8. ábra
Szögsebesség–felhajtóerő karakterisztika: a (4) egyenlettel leírt négyzetes összefüggés jól illeszkedik a mérési adatokhoz [a szerzők]

A mérési eredmények a 8. ábrán láthatók. A tengelyeken átlagos értékek szerepelnek, hiszen lebegés során a szabályozó által kiadott pillanatnyi PWM-jelek eltérhetnek az egyes motoroknál, de átlagban a gravitációt fogják csupán kompenzálni. Sárgával látható a (4) egyenlet alapján illesztett görbe, amelynek alakja a következő:

$$f_i = c\omega_i^2 \tag{22}$$

vagyis a felhajtóerő-tényező értéke $c = 9{,}3945 \cdot 10^{-7}\mathrm{Ns}^2/\mathrm{rad}$. Ebből kifejezhető a PWM felhajtóerő-karakterisztika is:

$$\begin{aligned} f_i &= c(\vartheta_1 + \vartheta_2 \mathrm{PWM}_i)^2 = c\vartheta_1^2 + 2c\vartheta_1\vartheta_2\mathrm{PWM}_i + c\vartheta_2^2\mathrm{PWM}_i^2 \\ f_i &= 0{,}0163 - 1{,}065\ \mathrm{PWM}_i + 17{,}453\ \mathrm{PWM}_i^2 \end{aligned} \tag{23}$$

ahol ϑ_1 és ϑ_2 értéke adott a (21) egyenletekben.

5.2.3. Szögsebesség–nyomaték

A bemeneti paraméterek közül csupán a szögsebesség–nyomaték karakterisztika leírása maradt hátra, amelyet nominálisan az (5) egyenlet jellemez. Az ellenállás-tényező méréséhez felhasználjuk a (7) kifejezés második egyenletének harmadik komponensét, ami a következő alakban írható fel:

$$J_{zz}\dot{\omega}_z = \tau_z - \left(J_{yx}\omega_x^2 + J_{yy}\omega_x\omega_y + J_{yz}\omega_x\omega_z - J_{xx}\omega_x\omega_y - J_{xy}\omega_y^2 - J_{xz}\omega_y\omega_z\right) \tag{24}$$

A mérés során a kvadkopter referenciapozícióját konstans értéken tartjuk, referenciaorientációjának pedig a következő pályát írjuk elő:

$$\phi_d(t) = 0,\ \theta_d(t) = 0,\ \psi_d(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\alpha t^2 & t \in \left[0, \frac{T}{2}\right) \\ -\frac{1}{2}\alpha(t-T)^2 & t \in \left[\frac{T}{2}, T\right] \end{cases} \tag{25}$$

Könnyen belátható, hogy az ilyen alakban felírt legyezési szög referenciagyorsulásának abszolút értéke állandó, $\left|\ddot{\psi}_d(t)\right| = \alpha$. A (25) egyenlettel adott referenciaorientáció pontos követését feltételezve a (24) egyenlet zárójelben lévő tagja zérus, jobb és bal oldala pedig szakaszonként konstans, csupán előjelet vált a mérési időintervallum felénél. Az egyszerűsítéseket elvégezve és a (6) kifejezés negyedik egyenletét behelyettesítve:

$$J_{zz}\dot{\omega}_z = \tau_z = b(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) \tag{26}$$

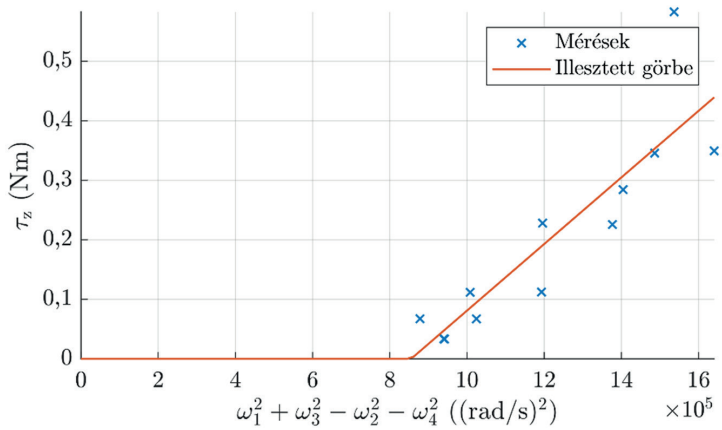
Ahol J_{zz} a korábbiakból ismert, $\dot{\omega}_z$ mérhető a kvadkopter fedélzeti giroszkóp jelének feldolgozásával, a forgószárny szögsebességek pedig számíthatók a motor PWM jelei (21) felhasználásával.

A mérési eredmények a 9. ábrán láthatók, ahol különböző pontokhoz különböző α értékek tartoznak $\psi_d(t)$ előírásánál. Az ábráról jól látszik, hogy ez esetben a (26) egyenlet nem illeszkedik elég jól a mérésekhez, azonban kiegészítve egy konstans eltolással már jól le tudjuk írni a viselkedést. Az így kapott karakterisztika a következő:

$$J_{zz}\dot{\omega}_z = \tau_z = b_1(\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) + b_2 \tag{27}$$

ahol az együtthatók numerikus értékei $b_1 = 5{,}5939 \cdot 10^{-7}$ és $b_2 = -0{,}4785$. Ezzel az irányításhoz szükséges összes fizikai paramétert meghatároztuk. Az alkalmazott eszközök és algoritmusok

lehetővé teszik az eljárás alkalmazását más (például kisebb és nagyobb méretű) kvadkopterek esetén is, ami alátámasztja a bemutatott módszerek gyakorlati hatékonyságát.



9. ábra

Szögsebesség–nyomaték karakterisztika: a (26) egyenlettel leírt összefüggés kiegészítendő egy konstans eltolással [a szerzők]

6. Szabályozó paraméterek meghatározása

A modell paraméterein kívül a szabályozási teljesítmény függ a (16) egyenletekben bevezetett konstansoktól is. Az ugyan ellenőrizhető a [2] irodalomban található eredmények alapján, hogy adott értékekre stabil lesz-e a szabályozó, azonban arra nincsen útmutatás, hogy milyen értékekre lesz optimális a zárt szabályozási kör teljesítménye valamilyen performancia-specifikációra vonatkozóan (például pályakövetési hiba minimalizálása). Emiatt a szabályozó paramétereit repülési tesztek alapján hangoljuk be.

Ahogy a 6. ábrán látható, a geometriai szabályozó kéthurkú struktúrával rendelkezik, ahol a belső hurok az orientáció- (nyomaték-) szabályozás, a külső pedig a pozíció- (erő-) szabályozás. Az algoritmus felépítéséből adódóan a külső hurok csak akkor hangolható, amennyiben a belső hurok már stabilan működik. Ebből kiindulva először az orientációszabályozás hangolását végeztük el, utána pedig a pozíciószabályozását.

6.1. Orientációszabályozás

Az orientációszabályozás (16) kifejezés második egyenlete által adott, ahol az első két tag visszacsatolást, a második kettő pedig előrecsatolást valósít meg. A hangolható paraméterek a visszacsatoló tagok együtthatói, vagyis $k_R, k_\omega \in \mathbb{R}$. Hasonlóan a [9] doktori értekezésben bemutatott eljáráshoz, egy gömbcsuklóhoz rögzítettük a kvadkoptert annak érdekében, hogy a rotációs alrendszert szétcsatoljuk a transzlációs alrendszertől. A mérési elrendezés a 10. ábrán látható: az állványhoz van rögzítve a gömbcsukló, amelyhez egy saját tervezésű 3D nyomtatott elemen keresztül csatlakozik a kvadkopter.

A kialakított elrendezésnek köszönhetően biztonságosan tesztelhető a működés különböző paraméterek beállítása esetén. Számos k_R, k_ω kombináció kiértékelése után arra az eredményre jutottunk, hogy a

$$k_R = 0{,}6; \quad k_\omega = 0{,}15 \tag{28}$$

paraméterek esetén legjobb a szabályozó teljesítménye. A kísérletekről készült videó elérhető a https://youtu.be/9r_j21rd800 linken keresztül.

10. ábra

Mérési elrendezés az orientációszabályozás paramétereinek meghatározásához [a szerzők]

6.2. Pozíciószabályozás

Stabil orientációszabályozással már tesztelhető a pozíciószabályozás is, amely (16) kifejezés második egyenletével adott, paraméterei pedig $k_r, k_v \in \mathbb{R}$. Ez esetben szintén fontos a gyors beállás, azonban legfontosabb a precíz pályakövetés, amit egy előírt referenciapálya mentén tudunk kiértékelni. A paraméterek hangolásához a 12. ábra felső részén, zölddel jelölt, módosított hélix alakú referenciapályát írtuk elő. Méréseket 4 paraméterkombináció esetén végeztünk, amelyeknek értéke:

$$\begin{bmatrix} k_r \\ k_v \end{bmatrix} \in \left\{ \begin{bmatrix} 4 \\ 2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 6 \\ 3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 8 \\ 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 10 \\ 5 \end{bmatrix} \right\} \tag{29}$$

Kezdeti vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy a $k_r/k_v = 2$ arány alkalmazásával jó eredmény érhető el, így a bemutatott 4 esetben ezt rögzítettük. A mérési eredmények a 12. ábrán láthatók, ahol a bejárt térbeli pályákat és a követési hiba komponenseinek időfüggését ábrázoltuk. Az ábráról leolvasható, hogy a szabályozó paraméterek értékének növelésével csökken a pályakövetési hiba abszolút értéke. Ezt az észrevételt numerikusan is megvizsgáltuk, kiértékelve az egyes hibajelek négyzetes középértékét, amelynek számítása:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} |x_i|^2} \tag{30}$$

ahol N az x vektor elemeinek száma, x_i pedig a vektor elemeit jelöli. Ahogy a 2. táblázatban látható, a legkisebb négyzetes középértékű hibajeleket a $k_r = 10$, $k_v = 5$ paraméterek esetén kaptuk, ez összhangban van a 12. ábra tanulságaival is. A kísérlet elvégzéséről videófelvétel is készült, ami elérhető a https://youtu.be/9r_j21rd800 linken.

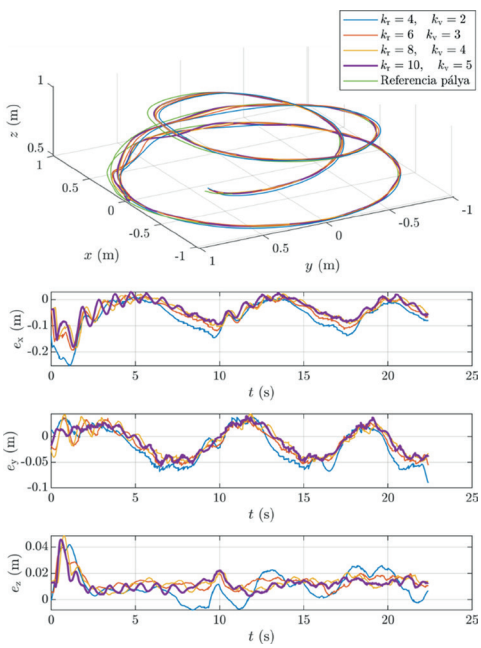
2. táblázat

Pályakövetési hibajelek négyzetes középértéke, a mértékegység mindegyik esetben méter [a szerzők]

k_r	k_v	$e_{x,RMS}$	$e_{y,RMS}$	$e_{z,RMS}$
4	2	0,0878	0,0384	0,0147
6	3	0,0662	0,0301	0,0151
8	4	0,0562	0,0281	0,0147
10	**5**	**0,0533**	**0,0275**	**0,0133**

11. ábra

Pillanatkép a pozíciószabályozás paramétereinek meghatározásához végzett repülési teszt közben [a szerzők]



12. ábra

Pályakövetés ábrázolása 4 különböző szabályozóparaméter-kombináció esetén. A felső ábrán a térbeli pálya látszik, az alsó ábrán pedig a pályakövetési hibák $\left(e_r = [e_x \; e_y \; e_z]^T\right)$ *értéke* [a szerzők]

7. Konklúzió

Munkánk célja az volt, hogy kidolgozzunk egy eljárást, amelynek alkalmazásával minél gyorsabban lehet egy új, ismeretlen paraméterekkel rendelkező kvadkopterrel agilis manővereket végrehajtani és pontos referencia-pályakövetést megvalósítani. A fejlett mozgásszabályozó algoritmusok a jármű dinamikai modelljén alapulnak, ezért először levezettük a kvadkopter mozgásegyenleteit. Annak érdekében, hogy nagy sebességű manővereket tudjon végezni a drón nagy bedőlési szögekkel, bemutattunk egy nemlineáris geometriai szabályozó algoritmust, amely a jármű teljes működési tartományán biztosítja a stabilitást.

A bemutatott algoritmusok valós drónon való implementációjához szükség volt a modell paramétereinek identifikációjára, amit részben CAD-modell készítésével, részben pedig mérésekkel végeztünk el. Végül repülési teszteket végeztünk a szabályozó paraméterek meghatározásához, és bemutattuk, hogy a javasolt eljárással precíz pályakövetést tudunk elérni, néhány centiméteres átlagos követési hibával.

Felhasznált irodalom

[1] L. M. Argentim, W. C. Rezende, P. E. Santos, R. A. Aguiar, „PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform," in *Proc. of the International Conference on Informatics, Electronics and Vision,* pp. 1–6, 2013. Online: https://doi.org/10.1109/ICIEV.2013.6572698

[2] T. Lee, M. Leok, N. H. McClamroch, „Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3)," in *Proc. of the 49th IEEE Conference on Decision and Control,* pp. 5420–5425, 2010. Online: https://doi.org/10.1109/CDC.2010.5717652

[3] NaturalPoint, Inc., *Optitrack.* Online: https://optitrack.com/

[4] CollMot Robotics Ltd., *Skybrush Suite.* Online: https://skybrush.io/

[5] Bitcraze AB, *System overview.* Online: www.bitcraze.io/documentation/system/

[6] P. Antal, T. Péni, R. Tóth, „Backflipping with Miniature Quadcopters by Gaussian Process Based Control and Planning," *IEEE Transactions on Control Systems Technology,* pp. 1–12. 2023. Online: https://doi.org/10.1109/TCST.2023.3297744

[7] P. Antal, T. Péni, R. Tóth, „Nonlinear Control Method for Backflipping with Miniature Quadcopters," *IFAC-PapersOnLine,* 55. évf. 14. sz. pp. 133–138. 2022. Online: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.595

[8] R. Mahony, V. Kumar, P. Corke, „Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control of Quadrotor," *IEEE Robotics & Automation Magazine,* 19. évf. 3. sz. pp. 20–32. 2012. Online: https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2206474

[9] M. Bisheban, *Geometric Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle in Wind Fields.* Doktori értekezés, George Washington University, 2019.

[10] D. Lee, S. Sastry, „Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter," *International Journal of Control, Automation and Systems,* 7. évf. 3. sz. pp. 419–428. 2009. Online: https://doi.org/10.1007/s12555-009-0311-8

[11] M. J. Van Nieuwstadt, R. M. Murray, „Real Time Trajectory Generation for Differentially Flat Systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control,* 8. évf. 11 sz. pp. 995–1020. 1998. Online: https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)58016-7

[12] D. Mellinger, V. Kumar, „Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors," in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation,* pp. 2520–2525. 2011. Online: https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5980409
[13] P. Antal, *Development of Efficient Control Methods to Support Agile Maneuvering of Autonomous Quadcopters.* Diplomaterv, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2022.
[14] J. Förster, *System Identification of the Crazyflie 2.0 Nano Quadrocopter.* Szakdolgozat, ETH Zürich, 2015.
[15] Z. Mustapa, S. Saat, S. H. Husin, T. Zaid, „Quadcopter physical parameter identification and altitude system analysis," in *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications,* pp. 130–135. 2014. Online: https://doi.org/10.1109/ISIEA.2014.8049885
[16] GEPRC, *GR2306.5 2450KV BLDC motor.* Online: https://geprc.com/product/geprc-gr2306_5-1350kv-1850kv-2450kv-motors/

Modelling, Identification and Geometric Control of Autonomous Quadcopters for Agile Manoeuvring

This paper presents a multi-step procedure to construct the dynamic motion model of an autonomous quadcopter, identifies the model parameters, and design a model-based nonlinear trajectory tracking controller. The aim of the proposed method is to speed up the commissioning of a new quadcopter design, i.e., to enable the drone to perform agile manoeuvres with high precision in the shortest time possible. After a brief introduction of the theoretical background of the modelling and control design, the steps of the proposed method are presented using the example of a real, self-developed quadcopter platform. The performance of the method is tested and evaluated by real flight experiments.

Keywords: *quadcopter, dynamic model, parameter identification, nonlinear control, indoor navigation*

Antal Péter
doktori hallgató
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet
Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium
antalpeter@sztaki.hu
orcid.org/0000-0002-3911-246X

Péter Antal, MSc
PhD student
Institute for Computer Science and Control
Systems and Control Laboratory
antalpeter@sztaki.hu
orcid.org/0000-0002-3911-246X

Dr. Péni Tamás tudományos főmunkatárs Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium peni@sztaki.hu orcid.org/0000-0002-1440-4263	Tamás Péni, PhD Senior Research Fellow Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory peni@sztaki.hu orcid.org/0000-0002-1440-4263
Dr. Tóth Roland tudományos főmunkatárs Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium egyetemi docens Eindhoven University of Technology Department of Electrical Engineering Control Systems Group tothroland@sztaki.hu orcid.org/0000-0001-7570-6129	Roland Tóth, PhD Senior Research Fellow Institute for Computer Science and Control Systems and Control Laboratory Associate Professor Eindhoven University of Technology Department of Electrical Engineering Control Systems Group tothroland@sztaki.hu orcid.org/0000-0001-7570-6129

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik Gaál Botondnak a repülési tesztek során nyújtott segítségét. A publikációban szereplő kutatást az ELKH SZTAKI az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében (RRF-2.3.1-21-2022-00002), valamint az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat támogatásával (SA-77/2021).

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 161–168. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.12

Horváth Gábor

A helyszíntől független katonai repülőtéri irányítás optikai rendszerének javasolt verifikációs kerete

Attól függetlenül, hogy polgári vagy katonai felhasználásról beszélünk, a helyszíntől független repülőtéri irányítás legfontosabb komponense a mozgókép-információt szolgáltató optikai rendszer. Ennélfogva elengedhetetlen, hogy ez a rendszer megfelelő mértékben visszatükrözze a telepítési helyszín, valamint az alkalmazói sajátosságok ötvözetéből készült specifikus elvárásokat. Jelen publikáció keretében javasolt verifikációs eljárásrend ezen elvárások katonai keretrendszerét hivatott biztosítani.

Kulcsszavak: *légiforgalmi irányítás, távoli toronyirányítás, helyszíntől független toronyirányítás*

1. Bevezetés

Jelen tanulmány annak a kutatómunkának a legújabb eredménye, amelynek folyamatában lefektettem a helyszíntől független katonai repülőtéri irányításhoz (Mil-rTWR) szükséges optikai rendszerre vonatkozó minimális teljesítménystandardok keretrendszerét [1], bemutattam a kapcsolódó SESAR[1]-tapasztalatokat [2], és felvázoltam a rezilienciára fókuszáló katonai alkalmazásban rejlő lehetőségeket [3]. Mindezek figyelembevételével fontos, hogy az olvasó a kifejtendő verifikációs keretrendszert az előbb felsorolt előzmények kontextusában vizsgálja, hiszen az ezekben meghatározott posztulátumok (például általános rendszerleírás, a rendszer céljának meghatározása, a rendszer elemei stb.) ismerete elengedhetetlen, hogy az alább kifejtett gondolatokat helyesen értelmezzük.

Az informatikai fejlesztésekből kiindulva a verifikáció lényege, hogy a rendszer megfeleljen a meghatározott követelményeknek és specifikációknak. Ennek a tevékenységnek a keretében főleg annak vizsgálatára kerül sor, hogy a kifejlesztett termék megfelelően működik-e és a tervezett funkciókat képes-e biztosítani. Ennélfogva a verifikáció során a rendszer teljesítményét és hatékonyságát célszerű tesztelni és értékelni, ezáltal maximalizálva a tervezhető beválás hatékonyságát.

A telepítési helyszín, valamint az alkalmazói sajátosságok ötvözetéből készült specifikus Mil-rTWR elvárások megfelelő visszatükrözése céljából először keretbe foglalom az interoperabilitási követelményeket, valamint a rendszer elérhetőségével és a szolgáltatás folytonosságával

[1] Single European Sky ATM Research.

összefüggő igényeket. Ezt követően bemutatom az általam javasolt verifikációs eljárás keretrendszerét, majd végül az üzemeltetési megfontolásokkal foglalom össze a leírtakat.

2. Interoperabilitási követelmények kerete

Minden helyszíntől független repülőtéri irányítói rendszer esetében biztosítani kell, hogy szükség szerint az alkalmazó által meghatározott funkciók működőképes állapotban rendelkezésre álljanak. Jelenleg azonban nem ismerünk olyan rendszert, ahol a működőképesség feltétel nélkül és állandó jelleggel biztosítható, emiatt és a megfelelő intézkedések meghozatala érdekében gondoskodni kell arról, hogy az üzemeltető – és szükség esetén az operatív alkalmazó – figyelmét a rendszer felhívja annak rendellenes működésére és a hibás funkcionalitásra. Az ezekre adandó válaszintézkedéseket határozhatjuk meg az interoperabilitási követelmények keretében, amely általános esetben kezeli (1) a rendszerintegritással, (2) a rendszer rendelkezésre állásával és a szolgáltatás folytonosságával, valamint (3) a szinkronizáció tárgykörével összefüggő kérdéseket.

2.1. Rendszerintegritás

Az rTWR rendszer alapvető funkcióját tekintve információt szolgáltat, amely alapján a légiforgalmi irányító biztosítja az illetékességi körzetében közlekedő légi járművek biztonságos, rendszeres, gyors és hatékony áramlását. Ennélfogva a rendszerintegritás keretének meghatározása során közel azonos szempontok játszanak majd szerepet a biztonságcentrikus polgári és a műveletcentrikus katonai megközelítés esetében is, hiszen mindkét szemlélet alapján kritikus, hogy az rTWR rendszer által szolgáltatott információk integritása ne sérüljön, vagy ha sérül, arról tudomást szerezzen az alkalmazó és az üzemeltető. Ennek alapján a rendszerintegritással összefüggő keret meghatározásakor a biztonságra épülő, vagy a műveleti logika által meghatározott prioritásnak megfelelően biztosítani kell, hogy az rTWR optikai rendszer:

- szükség esetén képes legyen megjeleníteni az összes kapcsolódó alrendszer és adatforrás valós időbeli státuszát;
- (tanulóalgoritmusai) útján meghatározza, hogy az adott meghibásodás befolyásolja-e a teljes rendszer alaprendeltetéséből adódó feladatellátást;
- szüntesse meg a meghibásodott alrendszerből származó adatok felhasználását;
- redundáns alrendszer meghibásodása és a tartalék alrendszer működőképessége esetén biztosítsa a kieső adatokat;
- valós időben jelenítse meg a rendszerintegritást vizsgáló szubrutin kompromittálódását és/vagy a funkció elvesztését.

2.2. Rendelkezésre állás és a szolgáltatás folytonossága

Mivel sok esetben a légiforgalmi szolgáltatások biztosítása nem különíthető el diszkrét időszakokra, így egy helyszíntől független repülőtéri irányítói szolgáltatást biztosító rendszerrel szemben jogosan merül fel az az elvárás, hogy garantálja a folyamatos üzemszerű rendelkezésre

állást. Ennélfogva az általános informatikai megközelítésből ismert rendelkezésre állásnak és a szolgáltatás folytonosságának koncepcióját nem célszerű külön értelmezni, ha egy rTWR rendszerről van szó. További fontos kiegészítés, hogy meg kell különböztetni a rendszer eredendő (Ai) és üzemi (Ao) rendelkezésre állását. Előbbi a mérnöki tervezésből vezethető le, míg az utóbbi az üzemeltetés milyenségét (például logisztikai ellátottság, karbantartási feladatok ellátása) fogja visszatükrözni. Ezek kiszámítására az 1. táblázatban szereplő képletek alkalmazása javasolt.

1. táblázat
Az eredendő és az üzemi rendelkezésre állás kalkulációja [4]

Vizsgálat tárgya	Vizsgálat képlete	Vizsgálat eredménye
eredendő rendelkezésre állás	$Ai = \frac{MTBCF}{MTBCF + MTTR}$	A tervezés során elért megbízhatóság és karbantarthatóság szintje, illetve a gyártási folyamat pontossága.
üzemi rendelkezésre állás	$Ao = \frac{MTBM}{MTBM + MDT}$	Ai eredménye + a karbantartás-menedzsment kvalitása, javításhoz szükséges elemek rendelkezésre állása, rendelési/szállítási idők stb.

Rövidítések kifejtése:
- MTBCF (Mean Time Between Critical Failures): a kritikus meghibásodások között átlagosan eltelt idő;
- MTTR (Mean Time To Repair): a tervezésnek megfelelő funkcionalitás eléréséhez szükséges átlagos javítási idő;
- MTBM (Mean Time Between Maintenance): a karbantartások között átlagosan eltelt idő;
- MDT (Mean DownTime): kiesések átlagos ideje, ami magában foglalja a karbantartások és a javítások elvégzésének tényleges idejét, valamint figyelembe veszi az ezekhez szükséges személyi és anyagi feltételek rendelkezésre állásához szükséges időt.

Az 1. táblázatban szereplő képletekkel összefüggésben ökölszabályként elfogadhatjuk, hogy (1) az Ai és Ao értéket minden rTWR alrendszer (például képalkotó egységek, adatkapcsolat, megjelenítő elemek) vonatkozásában külön meg kell határozni, (2) Ai és Ao soha nem vehet fel 0 és 1 értéket, de (3) a vizsgált (al)rendszer rendelkezésre állása annál jobb, minél jobban közelít a megadott képlet szerint számított érték 1-hez, (4) MTBCF és MTBM értékek egyedi vizsgálata esetén a nagyobb érték a jobb, (5) MTTR és MDT értékek egyedi vizsgálata során az alacsony érték a jobb.

2.3. Szinkronizáció

Egy rTWR rendszer esetében döntő szerepe van az egyes komponensek közötti kommunikációs folyamatok összehangolásának, vagyis a szinkronizációnak. Ennek révén a rendszert alkotó szenzorok, adatkapcsolatok, valamint megjelenítő és vezérlő elemek az operatív követelményeknek megfelelő időkeretben látják el feladataikat. Ehhez elengedhetetlen, hogy minden különböző alrendszer által szolgáltatott adatcsomag pontos és egymással összehangolt időbélyeggel rendelkezzen, miközben törekedni kell – az általános jelátvitelre vonatkozó fizikai törvényszerűségek figyelembevétele mellett – a késleltetés minimalizálására is.

3. Verifikációs keret

Jelen tanulmány szempontjából a verifikációs keret lefektetése során a legfontosabb, hogy meghatározzuk azokat az általános megfontolásokat, amelyek mentén felépíthetők a katonai

feladatok támogatására fejlesztett rTWR optikai rendszerek tesztelését és ellenőrzését biztosító mechanizmusok. Ez a folyamat alapvetően – de ahogy azt a 3. táblázatból láthatjuk nem egészében – a verifikáció négy, részben hierarchikus elvek alapján felépített fundamentumának alkalmazására épül, amelyek sorban a következők: megtekintés, demonstráció, teszt és az értékeléssel egybekötött elemzés [5]. Megtekintés során az értékelő – a meghatározott követelmények sorvezetőjét alkalmazva – szemrevételezi azokat az elemeket, amelyek a rendszert alkotják. Ezt követően a demonstráció keretében a rendszertől elvárt alapvető kezelhetőség ellenőrzésére, míg a tesztelés alkalmával egy előre meghatározott forgatókönyv szerinti vizsgálatra kerül sor. Végül az alkalmazói jóváhagyás és/vagy a technológiai megfelelőség irányelvei alapján végrehajtott elemzésben megállapítják, hogy az adott (al)rendszer jelen formájában milyen mértékben képes eleget tenni a meghatározott elvárásoknak.

Mindezek figyelembevételével meg kell adnunk – a lehető legobjektívebb mérési eljárást lehetővé tevő – azon referenciateszteknek a sorát, amelyekkel ellenőrizhetjük a rendszer működőképességét és funkcióit. Ezeknek azonos logika mentén kell felépülniük, és ezt a tesztleírásoknak is vissza kell tükrözniük, így ezek esetében az adott teszt célját visszatükröző rövid, tömör elnevezést kell alkalmazni. Ezt követi az adott teszt pontos és részletes célmeghatározása, majd leírjuk a végrehajtási környezetet, megadjuk az alkalmazott mérési paramétereket és eszközöket, illetve megszabjuk a végrehajtás menetét és az eredmények dokumentálásának módját is. Erre elsősorban a tesztek reprodukálhatósága, másodsorban az egyértelműség követelménye miatt van szükség. Arra azonban törekedni kell, hogy az egyes tesztek biztosítsák a különböző környezeteket és változatokat lekövetni képes rugalmasságot. Ezek alapján az alábbi általános megközelítést javaslom alkalmazni az egyes rTWR optikai rendszerelemekre specializált tesztek elkészítése során:

- rögzítsük a teszt pontos idejét, a résztvevők körét és feladataikat;
- rögzítsük a végrehajtani tervezett teszt típusát és az alkalmazott metodikát;
- rögzítsük az összes tesztelni kívánt berendezés egyedi azonosítóját, funkcióját és konfigurációját;
- ellenőrizzük a környezeti feltételeket, és határozzunk meg több jól elkülöníthető vizuális referenciapontot;
- győződjünk meg arról, hogy a tesztelni kívánt elemet az előírásoknak megfelelően installálták;
- rögzítsük a teszteredményeket;
- az elvárható mértékben szűrjük ki a helytelen adatokat és eredményeket.

3.1. Észlelés, felismerés és azonosítás példa-referenciatesztje

Egy helyszíntől független katonai repülőtéri irányítói szolgáltatás biztosításához szükséges optikai rendszer verifikációja során – a Johnson-kritériumra építkező – észlelésre, felismerésre és azonosításra (DRI[2]) vonatkozó követelmények segítségével a legcélszerűbb egy példa-referenciatesztet szemléltetni, mivel ennek segítségével nemcsak az egyes alrendszerek funkcionalitásáról, de azok interdependenciájáról is képet kaphatunk. Jelen alfejezet címét egyben tekinthetjük a teszt célját visszatükröző rövid, tömör elnevezésnek is. A teszt célja,

[2] *Detection, Recognition, Identification.*

hogy megállapítsuk az egyes közepes és könnyű légi járművek, valamint gépjárművek és személyek különböző, operátor által felügyelt területre – vagyis a légiforgalmi irányító illetékességi körzetére – vetített DRI-értékét. A mérések vonatkozásában a következő környezeti referenciaparamétereket határozzuk meg: a megvilágítás 10 000 lx vagy több, a látástávolság 15 000 m vagy több, az égbolt színhőmérséklete ~5 000 K. A mért DRI-értékek regisztrációját a 2. táblázat hivatott biztosítani.

2. táblázat
DRI példatáblázat [1]

			Panorámakamera			PTZ kamera		
Felügyelt terület	**Célpont**	**Célpont mérete (m)**	**D (m)**	**R (m)**	**I (m)**	**D (m)**	**R (m)**	**I (m)**
Végső megközelítési szakasz	Közepes légi jármű	7,0 × 7,0 × 27,0						
Forgalmi kör	Könnyű légi jármű	3,0 × 3,0 × 9,0						
Futópálya	Gépjármű	2,5 × 1,5 × 4,0						
Gurulóút	Személy	1,7 × 0,5 × 0,5						

Ez a teszt természeténél fogva nem hajtható végre az érintett légiforgalmi irányító állomány nélkül, vagyis a teszt során nagy hangsúlyt kap az alkalmazói jóváhagyás. Ez megköveteli az eljárásrend további specifikálását, így az alkalmazói jóváhagyás feltételrendszerének felvázolását:

- a teszt során a repülőtérre jellemző forgalmi elemeket jelenítsék meg;
- az alkalmazói jóváhagyásba bevont állomány rendelkezzen a repülőtérre vonatkozó érvényes légiforgalmi irányító szakszolgálati engedéllyel, egy tesztet egyszerre legalább két megfigyelővel hajtsunk végre;
- a megjelenített mozgóképet az előírásoknak megfelelő távolságból kell megtekinteni;
- rögzítsék a megjelenített mozgóképet;
- opcionálisan a megjelenített mozgóképpel korreláló rádiókommunikációt azzal egy időben játsszák le;
- a megfigyelők által szolgáltatott meghatározott célpontokra vonatkozó észlelés, felismerés és azonosítás időpontjait és/vagy időbélyegeit rögzítsék, majd ennek alapján;
- határozzák meg az egyes DRI-értékeket (méterben kifejezve).

Ez az eljárásrend lehetővé teszi, hogy – az elemzés elvégzéséhez szükséges – pontos adatokkal töltsük fel a 2. táblázatot.

3.2. A verifikációs eljárások összefoglaló áttekintése

Egy verifikációs eljárás során számos tényezőt kell figyelembe venni annak érdekében, hogy a vizsgált rendszerről, főleg annak képességeiről és funkcionalitásáról helyes képet kapjunk és ennek alapján a megfelelő következtetéseket vonjuk le. Annak ellenére, hogy jelen publikáció kerete nem teszi lehetővé – és valójában nem is célja –, hogy minden (al)rendszer minden forgatókönyvét részletesen felvázolja, de az irányadó gondolatok támogatása érdekében

bemutatom az rTWR optikai rendszer vonatkozásában mérvadónak tekintett verifikációs technikákat összefoglaló 3. táblázatot.

3. táblázat
Verifikációs eljárások összefoglaló áttekintése [a szerző]

Verifikációs technika	Alkalmazás	Ismertetés
megbízhatósági előrejelzés és modellezés	tervezés legkorábbi szakaszától a teljes életcikluson át	Magában foglalja a rendszer blokkdiagramjának értékelését, valamint az egyes javítási adatokból és komponenshibákból táplálkozó rendelkezésre állás szimulációját. Az így kapott modellt a rendszer életciklusa során meghatározott időközönként felül kell vizsgálni.
(általános) kockázatelemzés	tervezéskor	A tervezési szakaszban számos kvalitatív és kvantitatív kockázatértékelés végezhető el, mint például: • meghibásodások és azok hatásainak elemzése, hogy beazonosíthatóvá váljanak a gyakori meghibásodásra hajlamos, valamint a kritikus fontosságú komponensek (képet adhat a redundancia mértékéről is); • hibafaelemzés mint egyfajta top-down megközelítést alkalmazó penetrációs teszt.
karbantarthatósági elemzés	tervezéskor	A rendszer egészének és az egyes alkotóelemeknek a vizsgálata a karbantarthatóság szempontjából, ami magában foglalja a humán faktort is.
szoftverbiztonsági elemzés	szoftverfejlesztéskor	A rendszer egészének és az egyes alkotóelemeknek a vizsgálata szoftverbiztonsági szempontból (NATO STANAG 4452 és/vagy EUROCAE ED-153 figyelembevételével).
kibervédelmi kockázatelemzés	szoftverfejlesztéskor és opcionálisan a teljes élettartamon keresztül	A rendszer egészének és az egyes alkotóelemeknek a vizsgálata kibervédelmi szempontból. A kibervédelmi kockázatelemzéssel kapcsolatban célszerű megfontolni az időszakos felülvizsgálatokat (pl. ISO/IEC 27005:2022 és/vagy ANSI/ISA-62443-3-2-2020).
megbízhatósági vizsgálat	fejlesztéskor és opcionálisan a teljes élettartamon keresztül	A megbízhatósági vizsgálattal pontosítható a megbízhatósági előrejelzés. Ennek egyik legjobb eszköze a laboratóriumi alkalmazásból ismert rendszerélettartam-tesztek, amelyek arra törekednek, hogy szimulálják az életciklus egy részére (vagy egészére) vetített környezeti körülményeket. Ezáltal beazonosíthatóvá válnak az elöregedésből és a környezeti hatásokból származó általános problémák.
jóváhagyói/megfelelőségi teszt	fejlesztéskor és telepítéskor	Ennek segítségével ellenőrizhető, hogy a rendszer működőképessége és funkcionalitása megfelel-e a követelményt támasztó elvárásainak.

A 3. táblázat elkészítése során figyelembe vettem a Európai Repülésbiztonsági Ügynökség által közzétett releváns dokumentumokban foglalt útmutatásokat [6], [7], az általánosan alkalmazható verifikációs eljárások összefoglalását [5], valamint felhasználtam a SESAR PJ.05-02 *(multiple remote tower module)* projekt kapcsán megszerzett tapasztalataimat.

4. Összefoglalás

A modern kori haditechnikai fejlesztések metodikája nem sokban különbözik az alapvetően polgári célokat szolgáló kutatás-fejlesztések eljárásrendjétől [8], ráadásul egyes esetekben

nemcsak az adott eszköz elvi felépítése, de még bizonyos komponensei is komoly hasonlóságot mutathatnak. Ezt a megállapítást jól példázza az rTWR technológia, amelynek az általános polgári megközelítés értelmében meghatározott célja, hogy – bizonyos tekintetben és mértékben – felülmúlja a konvencionális irányítótornyokból biztosított szolgáltatás minőségét [9]. Ezzel párhuzamban a katonai célú alkalmazásba vétel akkor válik célszerűvé, hogyha a technológia érettségi szintje garantálja a szolgáltatás rezilienciájának növelését és a műveleti képességek skálájának fokozását. Az előbbiekben meghatározott két célszerűségi feltételt valamilyen formában mérhetővé kell tenni, és ennek lehet egyik eszköze a jelen tanulmányban ismertetett verifikációs keretrendszer. Ennek összeállításakor arra törekedtem, hogy (1) kellő mértékben specifikus legyen és így visszatükrözze az rTWR elvi felépítését és az optikai rendszer célját, miközben (2) elegendő rugalmasságot tesz lehetővé, aminek eredményeként lehetővé válik a katonai műveletek jellegzetességének – mint például a stacioner és fix telepítésű variációk különbözőségeinek – beágyazása.

A felvázolt verifikációs struktúra alapján megalkotott, egyben konkrét, helyfüggetlen toronyirányító rendszer értékelésére készített vizsgálat során törekedni kell arra, hogy az eredmény a lehető legegyértelműbben támogassa a katonai célú alkalmazásba vétellel összefüggő döntéshozatali folyamatot. Ezzel a megoldással gyakorolhatjuk azt az innovatív szemléletmódot, amellyel felépíthető a korszerű adaptív légierő.

Felhasznált irodalom

[1] Horváth G., „A helyszíntől független katonai repülőtéri irányításhoz szükséges optikai rendszerre vonatkozó minimális teljesítménystandardok keretrendszere," *Repüléstudományi Közlemények,* 34. évf. 2. sz. pp. 37–51. 2022. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2022.2.4

[2] Horváth G., „A helyszíntől független repülőtéri irányítás katonai alkalmazhatóságának vizsgálata a kapcsolódó SESAR-projekt tapasztalatainak tükrében," *Repüléstudományi Közlemények,* 34. évf. 2. sz. pp. 95–106. 2022. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2022.2.8

[3] Horváth G., „A helyfüggetlen toronyirányítás, mint a reziliens katonai légiforgalmi szolgáltatás eszköze," *Haditechnika,* 57. évf. 2. sz. pp. 68–72. 2023. Online: https://doi.org/10.23713/HT.57.2.13

[4] J. Manary, *Operational Availability Handbook.* Rome, NY, Reliability Analysis Center, 2004.

[5] K. Meade, S. Rosenberg, *A Practical Guide to Adopting the Universal Verification Methodology* (UVM), 2. ed. San Jose, California, Cadence Design Systems, 2013.

[6] European Aviation Safety Agency, *Technical and operational requirements for remote tower operations.* 2017. Online: www.easa.europa.eu/downloads/44661/en

[7] European Aviation Safety Agency, *Guidance Material on the implementation of the remote tower concept for single mode of operation.* 2015. Online: www.easa.europa.eu/downloads/18782/en

[8] Porkoláb I., Hennel S., Hegedűs E., „Modernizáció és innováció (1.): A megnövekedett sebességű haditechnikai kutatás-fejlesztés erősödő szerepe a modern katonai stratégiában egy amerikai példa alapján," *Honvédségi Szemle,* 149. évf. 2. sz. pp. 14–26. 2021. Online: https://doi.org/10.35926/HSZ.2021.2.2

[9] Z. Yongli, Y. Zhengning, Z. Liang, „Analysis of Remote Tower System," in *Proc. of IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology,* 2020. Online: https://doi.org/10.1109/ICCASIT50869.2020.9368521

A Proposed Framework for Verifying the Optical System of Location-Independent Military Aerodrome Control

Irrespective of the context, be it civilian or military application, the pivotal element in achieving aerodrome control that transcends geographical boundaries is the optical system responsible for capturing and relaying dynamic visual data. Thus, it is imperative for this system to accurately align with the distinct requirements of the deployment site and the amalgamation of user attributes. The proposed verification process, outlined within this publication, aims to establish a structured framework to address the military requirements.

Keywords: *air traffic control, remote tower control, location-independent tower control*

Horváth Gábor
főtiszt
Honvédelmi Minisztérium
Állami Légügyi Főosztály
Légiforgalmi Felügyeleti Osztály
horvath.gabor3@hm.gov.hu
orcid.org/0000-0002-2939-1426

Gábor Horváth, MSc
Senior ATM Officer
Ministry of Defence
State Aviation Department
ATM Supervisory Division
horvath.gabor3@hm.gov.hu
orcid.org/0000-0002-2939-1426

Jelen mű a Kulturális és Innovációs Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 169–184. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.13

Dinh-Dung Nguyen, Utku Kale, Muhammed Safa Baş, Munevver Ugur, Tahir Hikmet Karakoc, Dániel Rohács

Fundamental Elements of Drone Management Systems in Air Traffic Planning

Drones or Unmanned Aerial Systems (UAV – Unmanned Aerial Vehicles or UAS – Unmanned Aerial Systems) are vehicles that can fly without the need for a pilot or passengers. Drones can be controlled remotely through radio waves or independently (with a previously determined route). The amount of documented accidents involving the hazardous use of drones has risen significantly due to the increased usage of drones. To perform and increase the use of drones in air traffic management (ATM), especially in smart city planning, a variety of regulations and management procedures will be implemented.

This paper aims to propose management rules or regulations for drones in smart city transportation management and some approaches related to drone management and drone control. To present controlling approaches through the parameters in mathematical modelling for drones, we need a control rule, data gathering from the surroundings (usage of GIS), and a dynamic model of drones, and to present controlling and managing it with the help of a drone-following model based on a dynamic model of drones.

Keywords: *UAV, drones, ATM, drone management*

1. Introduction

Recently, the world's leading scientists and high-tech pioneers have announced their intention to develop and manufacture a wide range of affordable small controlled from a distance or self-managed flying vehicles known as drones (unmanned aerial vehicles/systems – UAV, UAS, including even small pilotless air vehicles, or air taxis). A variety of UAVs (unmanned aerial vehicles) have been widely exercised in both civil and military services, resulting in excellent utilisation efficiency [1], [2], [3]. Moreover, drones are expected to serve as a vital part of the smart city with several use cases, including transportation [4], medical [5] and agricultural industries[6], in addition to military applications.

In addition to this, a severe obstacle prevents the instantaneous integration of drones into present operations, particularly in smart city designs, where mobility is a crucial consideration [7], [8]. The current air traffic management systems (ATM) are not able to manage the indicated number of UAVs that operate at lower altitudes in the urban region

between tall and large structures and complex environmental circumstances due to 1. system capacity and limitations; 2. necessary workforce; 3. predicted income and expenses; and 4. required duration of system development [9], [10].

The order to enable drones to operate on a routine schedule is an essential aspect of the air transportation strategy in urban areas. It is also critical to design methodologies that solve these technical problems with a specific legislative framework and establish management systems for securely operating operations, both in the air and on the ground. The identifying method of the mathematical model can be used to synthesise higher-quality control systems in this case. Furthermore, drone-following models defining the one-by-one following process of drones in interflow traffic are required for the examination of the security and safety of drones in air traffic as well as the creation of smart transportation systems.

Finding a mathematical model of a UAV is one of the most important aspects of drone design. It confirms that the mathematical model of the control object recognition method has seen significant development in recent years, which is critical for the development of a high-quality automatic control system for drones. This method allows us to efficiently determine the mathematical model object, whose control is based on data from input and output signals to the controller object.

When the number of drones grows, serious incidents might occur in the airspace, even in relatively harmless scenarios. Whereby it necessitates the development of a drone management system, which is a component of the overall unmanned traffic management system (UTM) that ensures safe, environmentally friendly, efficient and long-term transportation in urban/city regions. These sub-systems work simple; however, they have quick interconnections with air traffic management systems, allowing them to perform tasks such as sharing airspace, detecting and resolving conflict/obstacles, and determining optimal trajectory control. New modes of transportation, such as urban air transportation (drones, air taxis), must now be incorporated into the overall transportation management system and coordinated with other autonomous vehicles.

GIS is also one of the essential parts of the drone management system. The GIS operators or authorities have to notify the drone air traffic management headquarters of scheduled flights and the estimated locations before the flights. The automated centre creates the route for a specific flight in a 3D virtual channel optimised by using a GIS map and creates a slot depending on other people's trajectories and surrounding information. The procedure should be restarted if the drone passes the available slot. The flight of the drone is completely automated, yet it constantly assesses its location potential for conflict and adjusts its speed to the actual flight circumstances. Drones are tracked through GPS and GIS mapping, using active intelligence surveillance and reference points in the buildings.

Moreover, an essential part of the drone management system is the usage of drone-following models that describe the one-by-one tracking of drones through traffic flows. Drone-following models work by calculating the acceleration of the drone based on the differences in velocities and distances between the drone in consideration and the drone in front of it (SD models). Furthermore, the Markov drone-following is an enhanced technique based on a stochastic diffusion process of speed decisions estimation. When SD models are no longer sufficient, this model is applied. The Markov drone-following model can assess conditions that are only manageable by advanced controllers.

The focus of this research is to propose methods for identifying parameters in a mathematical model of a drone as a control object, as well as to merge drone management and control systems. To provide a drone management system and their transportation, particularly in smart cities, operational concepts for drone operations in urban areas must be presented, including airspace design, recommended airway construction and critical safety standards. For route planning and information collection of drones usage of GISs, drone-following models are also required to analyse drone traffic safety and develop an intelligent transportation system. The two main drone-following models discussed in this study are the SD models and the Markov drone-following model.

2. Parameters of mathematical model of drones

Theoretically, identifying an unknown drone parameter may be accomplished in two ways: one, by directly calculating the geometry of the drone, and the other, by analysing the flight data. The first technique demands complex mathematical and physical computations with a high processing workload; however, the second technique requires a simple algorithm that produces more precise results than the first technique.

The least-squares error method is an identification method utilised in this research. It is a technique that enables determining the mathematical model of an object with high efficiency, with those of the control based on data from input and output signals to the controlling object (based on a recognition algorithm that is being used to determine a drone). As follows, precisely: The mathematical model simulates, then data is gathered in order to carry out the identification. The identification results are then assessed by comparing the pattern model to various input signals.

Additionally, drones, particularly quadrotors, were developed to be hand-operated, thus distinguishing input and output data using onboard sensors to establish the mathematical model would build a somewhat realistic, more accurate mathematical model using the modelling method. Furthermore, the approach of the least-squares error method is simple to comprehend and implement, and it allows for the computation of variables, resulting in a mathematical model of a controlled element that is generally accurate.

Before applying the mathematical model identification, we must start with building a basic control system, so this can allow the collection of the input and output signals of the system. Then, we can fully carry out the mathematical model identification. The identifying process should be carried out several times in various flight conditions, then perform calibration parameters. The aim of mathematical model identification is to ensure with the impact of noise, different signal types change input signals and the output signals of the recognition models should continuously be aware of the output signals of the model. As a result, the mathematical model can detect and characterise the movements of the drone along with its channels with high precision.

3. Drone management systems

The growing number of drones offers significant issues in aviation, particularly in air traffic control. As a result, different operational characteristics must be developed to protect daily flights in terms of safety and implementation by operators. The suggestion of UAV traffic management systems (UTM) is to assist in the successful completion of the flight and effective control of overall air traffic. A system such as this might be controlled to improve the separation between UAVs and aircraft that have been used on regular flights, as well as traffic flow order in extremely low-level airspace regions. Because of the data it receives, this system operates independently of air traffic management systems (ATMs). Moreover, because drones fly in 3D space, they are affected by strong gusts of wind flow. Isolation from structures and air turbulence is a problem that is more complicated than it is for road vehicles.

Drone management is divided into six categories, each of which is based on a systematic concept:

- non-detected objects: those that do not occur on the surveillance screen;
- detected objects: those that do occur on the surveillance screen, although this is uncertain if they are passive, non-cooperating, or demonstrate non-relevant targets, like birds;
- semi-active or simple cooperative objects: which give the operation centre minimum partial relevant data;
- active or cooperative objects or service providers: those submit data on the objects located in the urban setting; accessible data should also include data on the vehicle type, its identification number, load, current position, intention and the final route;
- connecting vehicles that cooperate and coordinate their motions passively or actively, e.g. flying in order, or utilising conflict prediction, management and solution, based on relevant data being presented;
- contract-based drones with certain preferences that are contract-based and therefore must pay for the service offered.

Management and control of air traffic and the flights for drones or groups of drones are in high demand. Drones could be programmed to follow predetermined paths or corridors. Sensor fusion, fixed trajectory flowing models, centralised dynamic sectorisation, active management, real-time GIS support, preset flight configurations such as flight drone-following models, coordinated manoeuvres, active disaster detection and resolution, and formation flights should all be used to assist and guide the drone operation. Drones flying in city areas are likely to operate at lower heights and between structures in the sky, going to create a lot of turbulence, which is generated in effect separation from constructions by wind (flow). Consequently, particular approaches of automation, such as vehicle following models, are possibly drastically dissimilar and unlikely in vehicle and drone traffic. Thereby, flying across a tight gap is one of the most difficult autonomous drone control challenge. It necessitates the drone passing through the centre with its level aligned with the positioning of the gap, reducing the possibility of a crash. The one-by-one following drone method in "narrow corridors" between the residences without the need for a conventional planning and control piping system is one solution for this issue.

Moreover, one of the fundamental properties of the drone management system is sensor fusion tools which are unmanned systems based on sensor arrays that collect information of themselves and sensors that detect the surroundings. Radar systems and vision cameras are examples of sensors that perceive their environment and detect objects in their range of perception. In addition, these sensors have Lidars, a remote sensing method that provides information about the obstacles around the surrounding of a drone. The sensor system does some signal processing to reduce nuisance alarm, including identification, segmentation, classification, labelling, and, in some cases, simple tracking.

Various research looks into flight planning involving environmental uncertainties, specific aggressive manoeuvres, and flights with low altitude (backstepping route-following control, barometric altimeter monitoring fault diagnosis technique utilising neural feedforward systems, PID). Controller with multi-loop design, infrared camera and beacon systems, path planning, and route following may be improved by feedback linearisation control-oriented algorithms, non-linear guiding regulations, or carrot-chasing geometric algorithms. Drones ought to maintain predetermined paths, routes, or corridors inside the aviation data network. The exact location and mobility of drones can be measured in the surroundings using sensors installed in metropolitan areas.

Another significant factor of the drone management system is the obstacle avoidance method. Drone flights require a collision avoidance system to maintain airspace security, particularly for autonomous drones flying in busy airspace used with other aircraft. The obstacle model is one of the essential components of drone simulation tools. Consider that every other obstacle is represented by a cylinder with a radius $r_{B,l}$ and a centre $C_{B,l}$ (Figure 1). The surfaces of cylinders could also be used to provide obstacle avoidance constraints. At the flying altitude, the safe distance $d_{s,l}$ from the same obstacle l is evaluated precisely from the cylinder centre toward its surface.

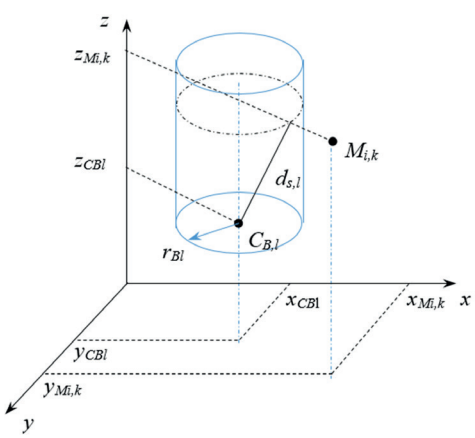


Figure 1.
Representation of the obstacle avoidance method [20]

The landing approach is also one of the most crucial components of the flight since it ensures that the UAV lands safely at the designated position. The phases of a standard landing process

are as follows: flying against the wind, descending and slowing down. Several elements, however, may affect this process, including wind turbulence, general aerodynamic force, engine traction force and propeller reaction moment. The landing regions are determined and calculated using analytical methods and the solution of the 'aircraft's equations of motion. The intended landing orbit is predicted based on the landing zones, enabling the UAV to land precisely at the intended location.

4. GIS applications in UAV

Since the 18th century industrial revolution, urban planning and urbanisation problems have occurred due to the rapid increase in the global population and the concentration of the inhabitants for some locations [11]. For policymakers, this unnatural rapid urbanisation has caused substantial environmental and social problems [12]. Modelling and simulation technologies are critically efficient instruments for delving into the dynamics of urban development and facilitating growth management planning. As a result, monitoring and modelling city expansion is a critical component for avoiding future difficulties [13], [14].

Every city is a complex system. Geographical information systems combine all spatial and non-spatial information in a single system. While providing consistency in the analysis of geographical data, it establishes various connections and relationships between events depending on geographical proximity and ensures that all stakeholders access this data and analysis under a single platform. GIS can integrate spatial data with other data sources. Web scenes provide a realistic perception by showing geographic data and events in three dimensions. All geographic layers can be mapped with three-dimensional symbology, which performs the generation and presentation of GIS maps on the computer.

Urban life requires a high level of understanding and solutions to the challenges faced by the society in that city. It is one of the high-tech application areas where large amounts of data are needed. Big data means that complex urban systems face some challenges; they are large amounts of data with a variety of characteristics that have the ability to make new theories and approaches for investigating interconnections between the social, biophysical and other industrial fields [15], [16], [17], [18].

In GIS, area data are usually represented by mosaicking, and object data by topological vector data. Mosaic, which is formed by the coming together of surrounding cells, is of three types: square cells, hexagonal cells and triangular cells. However, all cells have the same shape and size within themselves. Each cell is assigned a value and these values are related to all other cell values. The tessellation process takes place in many GIS software with different names such as raster or raster map. The size of a single raster cell is called raster resolution. The structure formed by these cells is called a grid.

Drones can follow fixed trajectories or predefined corridors. For this, real-time GIS support is one of the requirements. Thus, active conflict/obstacle detection and problem resolution can be achieved. GIS support can be provided by 3D modelling.

The digital terrain model represents the geographical structure or the real terrain in the area. In other words, it enables the structure of the land to be expressed digitally in all aspects, such as elevation, slope, aspect direction, drainage, etc. In this way, sustainable GIS mapping support can be obtained for integration into transportation systems in smart cities.

High-resolution maps are the cornerstone of evaluating urban footprints by integrating them into global settlement models. In the last ten years, rapid progress has been made in the providence of this spatial information. The following covers a compilation of specific datasets, which has great importance, with GIS-based information in the field of urbanisation:

- Global Map: A global map is a collection of mapping software that covers the entire globe and precisely represents the condition of the terrain and the surroundings on a global scale. It was established with the help of National Geospatial Information Authorities (NGIAs) from all around the world. With a minimum surface resolution of 1 km for raster data and a ratio of 1: 1,000,000 for vector data, the Global Map offers eight main map concepts.
- These concepts are: 1. Transportation; 2. Boundary; 3. Drainage; 4. Population Centres; 5. Height; 6. Flora; 7. Land Cover; 8. Land use.
- Gridded Population of the World (GPW): The population density of past, current and projected raw population statistics are included in this collection from NASA's socioeconomic data and processing centre. The purpose of the GPW is to provide a geographically disaggregated population layer that may be used with datasets from sociological, economic and Geoscience departments, as well as satellite data. These data are accessible to research, spatial decision-making and communication on a worldwide scale.
- World Bank Geodata: A huge spectrum of World Bank databases, including economic and educational datasets, have been transformed to KML format in this data.
- Global Management Fields: These are the database sections of low-level information belonging to administrative fields such as countries and provinces. Version 3.6 was released in 2018, version 4 in December 2021. Researchers can collect geographical information from every nation, which contains 386,735 administrative locations.
- Armed Conflict Location and Incident Dataset: Updated constantly, starting from 1997 to the present time, this dataset contains all documented conflict incidences information of 50 developing countries.
- Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP): It is a data set containing information about rural and urban population balances, taken from NASA's socioeconomic data and application centre.
- Open Street Map (OSM): Worldwide landmarks, infrastructures, roads, streets, ship routes, etc. It is crowdsourced data that contains much important information.
- Geohive8: Ordnance Survey Ireland has made Geohive8 available for easy accessibility to 'public spatial data', which covers demographic and county data. 'It is not in GIS data format, but' it is simple to convert from CSV format [19].

5. Drone-following models

The drone-following models stand as a significant part of the drone management system. They are models that calculate the acceleration of the drone based on the velocities and distances between the particular drone and with the drone that is leading. Drone-following models are being designed for the purpose of building speed profiles close to the actual situation, the capacity to produce actual traffic flows, steady awareness of traffic conditions, modelling of traffic situations noticed by varying configurations of drones and control system variables, and the ability to implement them in traffic control systems (Figure 2).

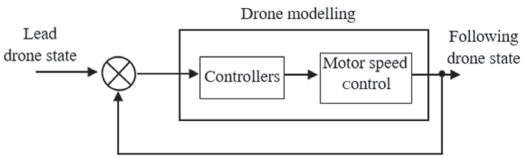


Figure 2.
Representation of a general frame for drone-following models [8]

The following formula is the general equation for the drone-following models:

$$\ddot{X}_n(t+T) = \lambda \frac{\left[\dot{X}_n(t)\right]^p}{\left[X_{n-1}(t) - X_n(t)\right]^q}\left[\dot{X}_{n-1}(t) - \dot{X}_n(t)\right]$$

Parameter p stands for speed and parameter q stands for distance headway, $[X_{n-1}(t)-X_n(t)]$: relative distance between the two *(n-1)th* and *nth* drones.

If the equation is to be applied in a simulation process, the gap among consecutive recalculations of acceleration, speed and position should be a small proportion of response time. This requires the storage of a large amount of statistical information. Furthermore, the parameter looks likely to be independent of any identifiable controller or drone features.

The formula was developed by putting limits on the controller and the functionality of the drone and then using those constraints to compute a speed limit for the fellow drone. It is considered that the velocity of the pursuing drone is adjusted by a controller in order for the drone to prevent accidents so when the leading drone is suddenly stopped. This model has two following characteristics: The pursuing drone will speed up if the leading drone speeds up as well. And if the speed of the leading drone decreases and since the gap between two drones becomes shorter, the following drone will decelerate as well to keep a steady long distance.

Firstly, the drone-following techniques are effective on the concept of maintaining a safe distance depending on the relative velocity (SD models). As a result of this technique, linear models were developed, in which the controller of the pursuing drone adjusts the accelerator to maintain relative speed with the leading drone. The SD models can be used to simulate traffic conditions in a number of different ways. They do, however, have two limitations: the constants used in the drone models are generally derived from real traffic scenarios and sustaining controller quality, since SD models are having difficulties adjusting for advanced controllers. The Markov chain process is an advanced model which is based on an estimate of the stochastic diffusion process of speed determination. The inputs of the controllers receive the appropriate adjustments in velocity from speed variations and relative distance differences between the drones. This method is more comprehensive than the SD models because the Markov chain process can work with extreme situations.

6. Results

The main findings from the simulation analysis of various drone management system applications are presented in this section.

6.1. Experimental result of the difference between real-desired trajectories

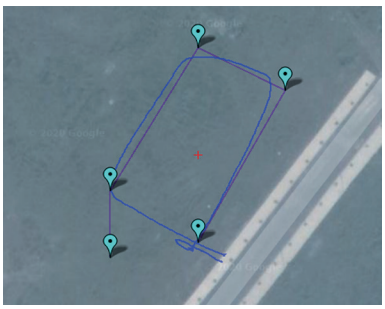


Figure 3.
Blue line – real trajectory/Purple line – requested trajectory [21]

In the simulation, drones flying in an urban environment were controlled using a cloud-based method in research studies, which included the physical, cloud and control aspects. Figure 3 shows the outcome of the experiment. The drone was originally put in a rest position. Once a drone receives a GCS signal, it takes off on a mission to arrive at the waypoints that have been specified. The results reveal that the desired and actual courses mostly coincide with each other. The difference between the two trajectories demonstrates the GPS location since the drone obtains the GPS location data.

6.2. Calculation result of desired orbit landing for a drone

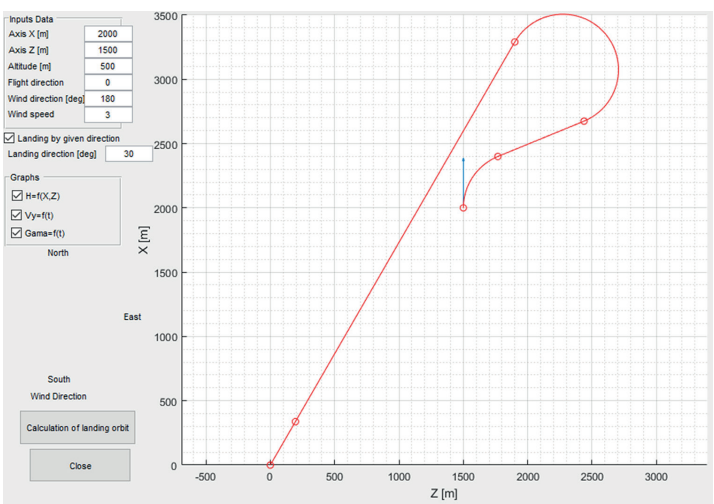


Figure 4.
Required landing course of a drone [21]

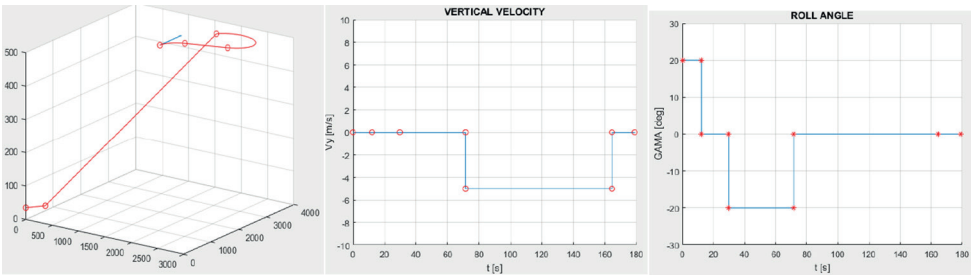
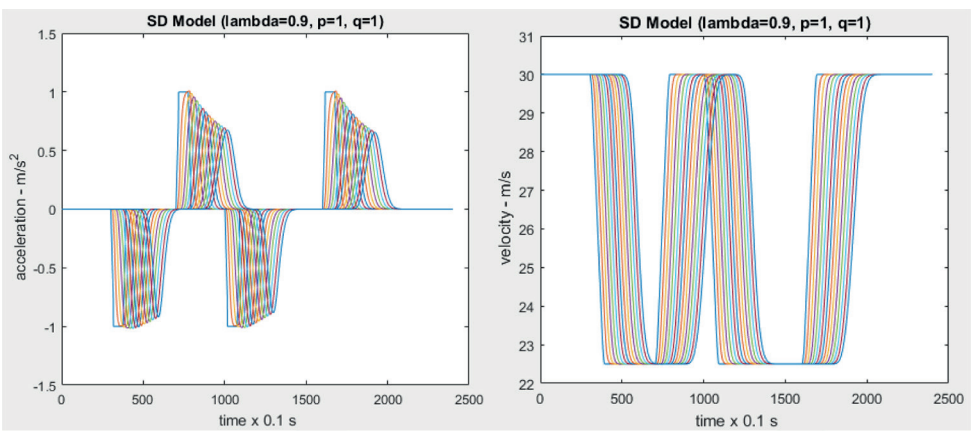


Figure 5.
The altitude, vertical velocity and roll angle change when a UAV gave an instruction to land [21]

The ideal landing orbit is calculated based on the landing zones to provide the landing of a drone precisely to the target location. Figures 4 and 5 demonstrate the simulation outcomes for a drone landing in the indicated direction.

6.3. Simulation Result of SD and Markov Models



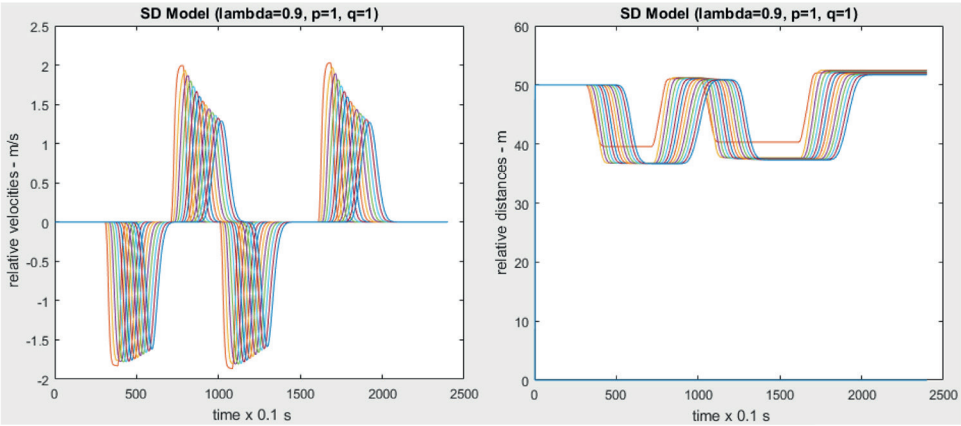
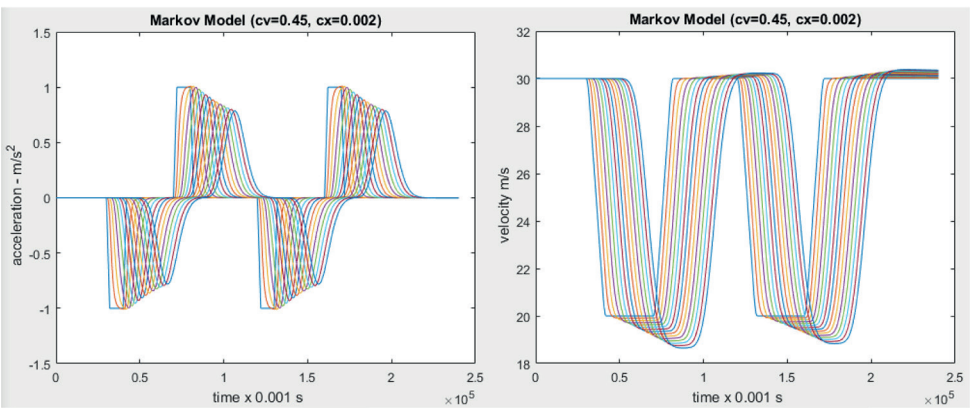


Figure 6.
Simulation result of the SD model [8]



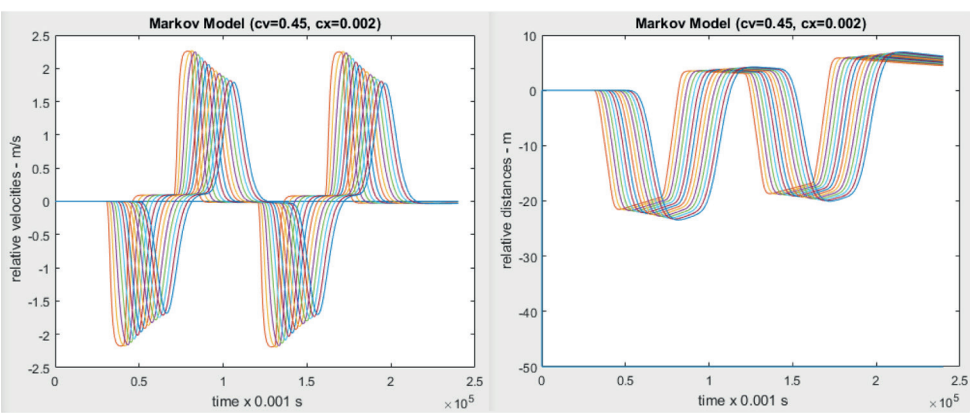


Figure 7.
Simulation result of the Markov model [8]

In general, it can be seen, the SD and Markov models are mostly identical. The SD model reacts faster towards changes in patterns of the first drone, however, the dynamics of movement of the preceding drone allow the conditions to stabilise more steadily. The Markov models, on the other hand, consider the factors in the relative distance between the drones. As a result, the leading velocity of the drone increases or decreases more than the velocity of the following drone. This indicates that variations in relative distances between drones are substantially lower than when SD models are used.

The improved Markov model is considered to be more precise in the case of drone movement in significant turbulent air and separated wind flow from infrastructure, and it can be used in areas where positioning problems of GPS have emerged, particularly when making comparisons and collaborations with GPS techniques or ultrasonic sensors, etc.

7. Conclusion

In the future, drones are anticipated to play an important role in almost every field which is essential for humans. For implementing drone usage in the future, drone management systems are needed, and this system should be applied from urban areas to airspace design. Applications of drone control systems need municipalities to embrace large-scale drone operation programs, and drone systems must be secure, reliable, resilient and sustainable. Thus societies can adopt these new devices more smoothly. Some regulations, designs and equations for establishing an environment that is safe and secure for aviation purposes of drone operations quality and stability standards are investigated in this study.

There are three major issues that need to be solved about the management of drones:

- design of flight networks (using GIS systems for data collecting), including a safety net of planned flight paths;
- defining fundamental legal requirements for traffic flow (like separation requirements) and path of the flight (trajectory);
- establishing a number of methods and solutions enabling secure flight conditions (like detection and resolutions of the conflict, group flights, drone-following models, etc.).

In this research paper, assembling drone management systems including the drone flow methodologies with parametric mathematic models has been suggested. To accomplish this purpose, we first offer parameters of the mathematical model of drones, particularly in quadrotors. Afterward, we presented several methods for designing and operating drone management systems, for instance, obstacle avoidance, the desired trajectory following management and the required landing trajectory. To add, we proposed GIS usage for data collection and trajectory planning of the drone operations. Finally, one of the key parts of the drone management system, drone-following models with SD methods and Markov chain process to create safe flying conditions.

References

[1] R. Loh, Y. Bian and T. Roe, 'UAVs in Civil Airspace: Safety Requirements'. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,* Vol. 24, no 1. pp. 5–17. 2009. Online: https://doi.org/10.1109/MAES.2009.4772749

[2] W. W. Greenwood, J. P. Lynch and Z. Dimitrios, 'Applications of UAVs in Civil Infrastructure'. *Journal of Infrastructure Systems,* Vol. 25, no 2. 2019. Online: https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000464

[3] P. S. Ramesh and J. V. Muruga Lal Jeyan, 'Comparative Analysis of the Impact of Operating Parameters on Military and Civil Applications of Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV)'. *AIP Conference Proceedings,* Vol. 2311, no 1. 2020. Online: https://doi.org/10.1063/5.0033989

[4] R. Kellermann, T. Biehle and L. Fischer, 'Drones for Parcel and Passenger Transportation: A Literature Review'. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* Vol. 4. 2020. Online: https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100088

[5] J. C. Rosser Jr., V. Vignesh, B. A. Terwilliger and B. C. Parker, 'Surgical and Medical Applications of Drones: A Comprehensive Review'. *JSLS, Journal of the Society of Laparoscopic and Robotic Surgeons,* Vol. 22, no. 3. 2018. Online: https://doi.org/10.4293/JSLS.2018.00018

[6] M. R. Dileep, A. V. Navaneeth, S. Ullagaddi and A. Danti, *A Study and Analysis on Various Types of Agricultural Drones and its Applications.* 2020 Fifth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN). pp. 181–185. 2020. Online: https://doi.org/10.1109/ICRCICN50933.2020.9296195

[7] A. G. Foina, R. Sengupta, P. Lerchi, Z. Liu and C. Krainer, *Drones in Smart Cities: Overcoming Barriers through Air Traffic Control Research.* 2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS). pp. 351–359. 2015. Online: https://doi.org/10.1109/RED-UAS.2015.7441027

[8] N. D. Dung, 'Developing Models for Managing Drones in the Transportation System in Smart Cities'. *Electrical, Control and Communication Engineering,* Vol. 15, no 2. pp. 71–78. 2020. Online: https://doi.org/10.2478/ecce-2019-0010

[9] I. A. Wilson, *Integration of UAS in Existing Air Traffic Management Systems Connotations and Consequences.* 2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS). pp. 2G3-1–2G3-7. 2018. Online: https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2018.8384851

[10] C. Ramee and D. N. Mavris, *Development of a Framework to Compare Low-Altitude Unmanned Air Traffic Management Systems.* AIAA Scitech 2021 Forum. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2021. Online: https://doi.org/10.2514/6.2021-0812

[11] J. A. Akintunde, E. A. Adzandeh and O. O. Fabiyi, 'Spatio-temporal Pattern of Urban Growth in Jos Metropolis, Nigeria'. *Remote Sensing Applications: Society and Environment,* Vol. 4. pp. 44–54. 2016. Online: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.04.003

[12] M. Farooq and M. Muslim, 'Dynamics and forecasting of population growth and urban expansion in Srinagar City – A Geospatial Approach'. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* Vol. XL-8. pp. 709–716. 2014. Online: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-709-2014

[13] M. A. Dereli, M.A. Uğur, N. Polat and M. Yalçın, *Spatio-Temporal Analysis of Urban Expansion Using Remote Sensing Data.* 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017, Albena, Bulgaria. 2017. Online: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35243.34084/1

[14] C. Ö. Kivilcim and Z. Duran, 'Impact of Rapid Urbanization on the Morphology of Historical Istanbul: Uskudar District Case Study'. *Fresenius Environmental Bulletin,* Vol. 24, no 1. pp. 14–18. 2015.
[15] N. Kaya, Ö. Turan and T. H. Karakoç, 'Parametric Study of Exergetic Sustainability Performances of a High Altitude Long Endurance Unmanned Air Vehicle Using Hydrogen Fuel'. *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 41, no 19. pp. 8323–8336. 2016. Online: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.007
[16] M. Herold, J. Scepan and K. Clarke, 'The Use of Remote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses'. *Environment and Planning,* Vol. 34, no 8. pp. 1443–1458. 2002. https://doi.org/10.1068/a3496
[17] T. McPhearson, S. T. A. Pickett, N. B. Grimm, J. Niemelä, M. Alberti, T. Elmqvist, Ch. Weber, D. Haase, J. Breuste and S. Qureshi, 'Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities'. *BioScience,* Vol. 66, no 3. pp. 198–212. 2016. Online: https://doi.org/10.1093/biosci/biw002
[18] E. Yiğit, I. Yazar and T. H. Karakoç, 'A Comprehensıve Classıfıcatıon and Future Perspectıve of Unmanned Aerial Vehicles (UAV)'. *Journal of Sustainable Aviation Research,* Vol. 3. pp. 10–19. 2018. Online: http://dx.doi.org/10.23890/SUHAD.2018.0102
[19] N. Tohidi and R. B. Rustamov, 'A Review of the Machine Learning in GIS for Megacities Application', in *Geographic Information Systems in Geospatial Intelligence,* R. B. Rustamov, ed. London, IntechOpen. 2020. Online: https://doi.org/10.5772/intechopen.94033
[20] Dung, N. D., A Developed Particle Swarm Optimization Algorithm for Managing Drones in Smart Cities, in *Proceedings of the International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA), Budapest, Hungary,* pp. 26–29. 2019.
[21] N. D. Dung and J. Rohacs, 'Robust Planning the Landing Process of Unmanned Aerial Vehicles,' *International Journal of Sustainable Aviation,* Vol. 5, no. 1, pp. 1–18, 2019. Online: https://doi.org/10.1504/IJSA.2019.099915

A drónkezelő rendszerek alapvető elemei a légiforgalmi tervezésben

A drónok vagy pilóta nélküli légi rendszerek (UAV – Unmanned Aerial Vehicles vagy UAS – Unmanned Aerial Systems) olyan járművek, amelyek pilóta vagy utasok nélkül is repülhetnek. A drónok távirányíthatók rádióhullámokon keresztül vagy függetlenül (előre meghatározott útvonalon). Jelentősen emelkedett a drónok veszélyes használatával járó dokumentált balesetek száma, a drónok megnövekedett használatának köszönhetően. A drónok légiforgalmi irányításban (ATM), különösen az intelligens várostervezésben betöltött szerepének és használatának növelése érdekében számos szabályozást és irányítási eljárást vezetnek be.
Ennek a cikknek az a célja, hogy javaslatot tegyen a drónokra vonatkozó kezelési szabályokra vagy előírásokra az intelligens városi közlekedésirányításban, valamint néhány drónkezeléssel és drónvezérléssel kapcsolatos megközelítésre. A drónok matematikai modellezésében a vezérlési megközelítések paraméterein keresztüli bemutatásához szükségünk van egy vezérlési szabályra, a környezetből való adatgyűjtésre (GIS használata), valamint a drónok dinamikus modelljére, illetve annak vezérlésére és menedzselésére a drón segítségével.

Kulcsszavak: *UAV, drónok, ATM, drón management*

Dr. Dinh-Dung Nguyen előadó Le Quy Don Műszaki Egyetem Repüléstechnikai Kar Repülőgép-rendszertervezési Tanszék dungnd@lqdtu.edu.vn orcid.org/0000-0002-8966-051X	Dinh-Dung Nguyen, PhD Lecturer Le Quy Don Technical University Faculty of Aerospace Engineering Department of Aircraft System Design dungnd@lqdtu.edu.vn orcid.org/0000-0002-8966-051X
Dr. Utku Kale adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar Repüléstudományi és Hajózási Tanszék kale.utku@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0001-9178-5138	Utku Kale, PhD Assistant Professor Budapest University of Technology and Economics Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering Department of Aeronautics, and Naval Architecture kale.utku@kjk.bme.hu orcid.org/0000-0001-9178-5138
Muhammed Safa Baş BSc-hallgató Debreceni Egyetem Mérnöki Kar Légitársasági Pilot Program sefa-yelken@hotmail.com orcid.org/0000-0002-7095-8594	Muhammed Safa Baş BSc Student University of Debrecen Faculty of Engineering Department of Professional Pilot sefa-yelken@hotmail.com orcid.org/0000-0002-7095-8594
Munevver Ugur MSc-hallgató Eskisehir Műszaki Egyetem Távérzékelési és Térinformatikai Rendszerek Tanszék munevver929@eskisehir.edu.tr orcid.org/0000-0002-4243-1066	Munevver Ugur MSc Student Eskisehir Technical University Department of Remote Sensing and Geographical Information Systems munevver929@eskisehir.edu.tr orcid.org/0000-0002-4243-1066
Dr. Tahir Hikmet Karakoc egyetemi tanár Eskisehir Műszaki Egyetem Repüléstechnikai és Űrhajózási Kar Repülőgép- és Erőmű-karbantartási Tanszék Istanbul Ticaret Egyetem Informatikai Kutató- és Alkalmazási Központja hkarakoc@eskisehir.edu.tr orcid.org/0000-0001-8182-8667	Tahir Hikmet Karakoc, PhD Professor Eskişehir Technical University Faculty of Aeronautics and Astronautics Department of Airframe and Powerplant Maintenance Istanbul Ticaret University Information Technology Research and Application Center hkarakoc@eskisehir.edu.tr orcid.org/0000-0001-8182-8667

Dr. Rohács Dániel
docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Repüléstudományi és Hajózási Tanszék

daniel.rohacs@kjk.bme.hu
orcid.org/0000-0002-4629-4417

Dániel Rohács, PhD
Associate Professor
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Transportation Engineering and Vehicle Engineering
Department of Aeronautics and Naval Architecture

daniel.rohacs@kjk.bme.hu
orcid.org/0000-0002-4629-4417

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 185–198. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.14

Varga Béla, Kavas László, Tóth József, Óvári Gyula

Kriogén hajtóanyagok a polgári repülés területén

A légi közlekedés növekedésének hatására az elmúlt évtizedekben (1960–2018) az ágazat CO_2-kibocsátása 6,8 millió tonnáról 1034 millió tonnára nőtt. Az ICAO globális CO_2-csökkentési törekvéseinek elérését célzó intézkedéscsomag fontos technológiai elvárásokat fogalmaz meg a hajtóműgyártókkal szemben is. Ennek megfelelően a gyártók, illetve egyetemi kutatói csoportokkal és kutatóintézetekkel alkotott konzorciumaik lázasan keresik a megoldásokat. Ezek a kutatások kiterjednek új működési alapelvek, szerkezeti megoldások, szerkezeti anyagok, illetve új hajtóanyagok lehetséges alkalmazására is. Az előadást a cseppfolyósított földgáz (LNG[1]) és kerozint égető, úgynevezett Multi-Fuel Hybrid Engine (MFHE) koncepciója ihlette, feldolgozva a Feijia Yin és társai Performance assessment of a multi-fuel hybrid engine for future aircraft *cikkét* [6], *másrészt vizsgáljuk, hogy az LNG, illetve az LH2[2] alkalmazása hogyan érinti a repülőgép-hajtóművek tüzelőanyag-hatékonyságát és a várható teljesítményét a kerozin hajtóanyaggal összehasonlítva.*

Kulcsszavak: *fajlagos hasznos munka, termikus hatásfok, alternatív tüzelőanyagok, kriogén tüzelőanyagok, LNG, LH2*

1. Bevezetés

Az új évezred légi közlekedése forradalmi megoldásokat igényel a biztonság, a megbízhatóság, a környezeti kompatibilitás és a megfizethetőség javítására irányuló lakossági igények kielégítésére. Ebből is kiemelkedik a környezeti hatások csökkentése, elsősorban is a szén-dioxid és az egyéb üvegházhatást növelő gázok kibocsátásának csökkentése. Ennek fényében a Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) úgy határozott, hogy az ICAO és tagállamai az érintett szervezetekkel együttműködve törekednek arra, hogy elérjék a globális úgynevezett „szén-dioxid-semleges növekedést", ami azt jelenti, hogy 2020-tól a nemzetközi légi közlekedési iparág nettó szén-dioxid-kibocsátása nem növekedhet. Az intézkedéscsomag sok más mellett természetesen magában foglalja a technológiai elvárásokat hajtóművek szempontjából, valamint a fenntartható alternatív üzemanyagok alkalmazását. Az eredmények jellemzésére szükséges találnunk olyan mutatókat, amelyek egyértelműen jellemzik a hajtóművek megfelelőségét. A gázturbinás hajtóművek fajlagos hasznos munkája és termikus hatásfoka éppen olyan jellemzők, amelyek alapvetően meghatározzák a hajtóművek megfelelőségi fokát.

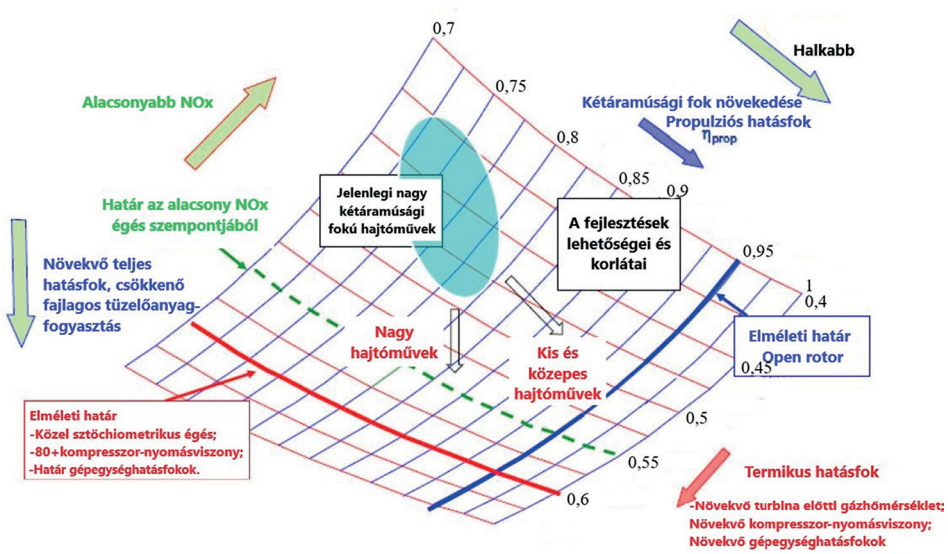
[1] LNG – Liquefied Natural Gas: cseppfolyósított földgáz.
[2] LH2 – Liquefied Hydrogen: cseppfolyósított hidrogén.

A következő fejezetekben megvizsgáljuk, hogy a címben szereplő tüzelőanyagok milyen hatással lesznek a gázturbinás hajtóművek fent említett teljesítményparamétereire, illetve szén-dioxid-kibocsátására.

2. Lehetőségek és korlátok a fejlesztésben

A hajtóművek hatásfokát és ezzel tüzelőanyag-hatékonyságát (szén-dioxid-kibocsátását) jellemzően az alábbi néhány tényező határozza meg, úgymint:

- a kétáramúsági fok a propulziós hatásfokon keresztül;
- a turbina előtti gázhőmérséklet és a nyomásviszony a termikus hatásfokon keresztül;
- a gépegység hatásfokok különböző mértékben szintén a termikus hatásfokon keresztül;
- a turbinalapátok hűtési igényének csökkenése is a termikus hatásfokot javítja (kompresszorból való levegőelvétel csökkenésén keresztül);
- esetleg veszteséghő újrahasznosítása (egyelőre távol a gyakorlati hasznosítástól);
- az elégetett tüzelőanyagok tulajdonságai, összetétele;
- anyagtechnológiai és gyártástechnológiai fejlesztések alapvetően a hajtómű tömegén keresztül.



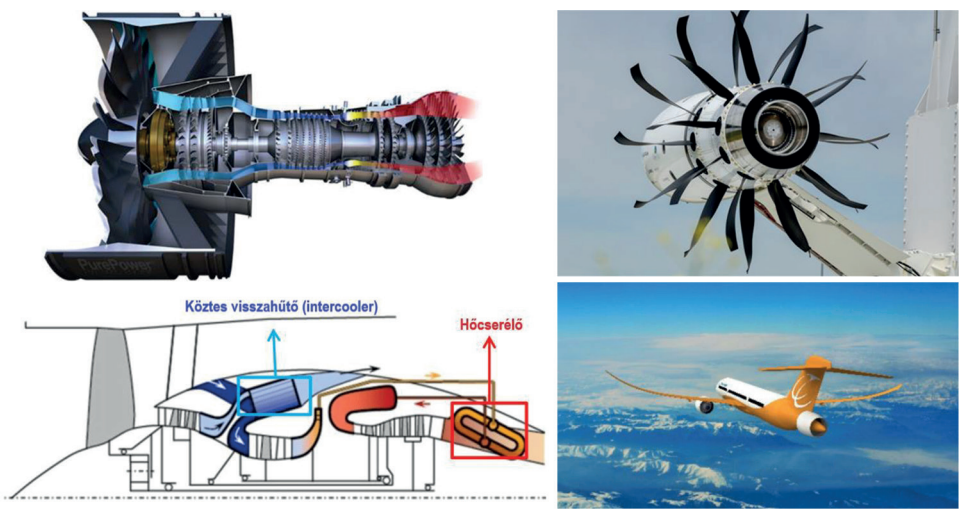
1. ábra
A termikus és a propulziós hatásfok növelésének lehetőségei és korlátai [1]

A termikus és propulziós hatásfok növelésének lehetőségeit és határait az 1. ábra szemlélteti. Mindkét hatásfok javításának szempontjából a tervezők egyre súlyosabb nehézségekkel néznek szembe. A nagy kétáramúsági fokú hajtóművek kompresszorainak nyomásviszonya évtizedek alatt több mint kétszeresére nőtt. A legújabb hajtóműveknél ez elérte a 45-öt, és tart 50 feletti értékekhez, és valószínűleg hamarosan elérheti a 60-at. Ilyen magas értékeknél

azonban már a kompresszor kilépő keresztmetszetében mért hőmérséklet is igen magas, valahol 900 K és 1000 K között van. Ez egyrészt felveti már a kompresszor utolsó fokozatainak a magas hőterhelését. Továbbá mivel a szükséges nyomáskülönbség miatt az első fokozat turbinalapátjainak hűtéséhez az utolsó kompresszorfokozattól kell hűtőlevegőt elvenni, így a hűtőlevegő mennyiségét növelni kell, rontva ezzel a termikus hatásfokot. További kedvezőtlen hatás, hogy a nyomásviszony növelése csökkenti a hátsó fokozatok lapátmagasságát, ami legtöbbször a kompresszor politrópikus hatásfokának csökkenéséhez és ezáltal szintén a termikus hatásfok csökkenéséhez vezet.

Másik probléma az égés során a megnövekedett nitrogén-oxidok (NOx) kibocsátása. Ez a szennyezés nagyon káros a növényzetre és az élővilágra is. Nagyszámú kutatás bebizonyította, hogy az NOx kibocsátása arányos a kompresszor-nyomásviszonnyal és a turbina előtti hőmérséklettel. Ezt még a különböző CAEP[3] NOx-kibocsátási határértékeknél is figyelembe veszik, magasabb NOx-kibocsátási értéket engedélyezve a magasabb nyomásviszonnyal rendelkező hajtóműveknél.

A fejlesztési irányok (lásd a 2. ábrát) rendkívül sokoldalúak, és pillanatnyilag szinte eldönthetetlen, melyik fejlesztési irány, illetve irányok kombinációja hozhat áttörést a tüzelőanyag-fogyasztás, illetve a károsanyag-kibocsátás tekintetében.



2. ábra
Polgári repülés területén megjelenő hajtóműfejlesztési irányok [2], [3], [4], [5]

A 2. ábra bal felső sarkában látható hajtómű, úgynevezett Geared Turbofan, már tulajdonképpen egy régebbi, körülbelül 50 éves múltra visszatekintő és mára megvalósult koncepció. A fő cél ebben az esetben, hogy a kétáramúsági fokot úgy lehessen növelni, hogy (a fan fokozat elkerülhetetlen fordulatszám-csökkentése mellett) ez ne járjon a kisnyomású forgórész fordulatszám-csökkenésével és ezzel a kompresszor- és a turbinafokozatok számának növekedésével. Ezekbe a hajtóművekbe egy bolygóműves fordulatszám-csökkentőt építenek be,

[3] Committee on Aviation Environmental Protection – Repülési Környezetvédelmi Bizottság.

ezzel lehetővé téve a kisnyomású forgórész magasabb fordulatszámát és ezzel a kompresszor- és a turbinafokozatok száma nemhogy nem nőtt, hanem csökkenhetett. Előny a propulziós hatásfok növekedése és esetlegesen némi tömegcsökkenés [2].

A 2. ábra jobb felső sarkában az úgynevezett Open Rotoros elrendezés tulajdonképpen csak felmelegítése egy korábbi, már akkor sokat ígérő fejlesztésnek. A hajtómű alkalmazásával 25–30%-os tüzelőanyag-megtakarítást értek el az 1970–1980-as években a korabeli hajtóművekkel összehasonlítva, de az akkori zajnormákat (ICAO Chapter 3) a hajtómű nem tudta teljesíteni. Végül a technológiai és gazdasági kockázat, a zajszint, a közvélemény elutasítása és az üzemanyagárak csökkenése a projekt iránti érdeklődés csökkenéséhez vezetett. Manapság azonban, főleg a szén-dioxid-kibocsátás, illetve a klímaváltozás miatti aggodalmak ismét e felé a koncepció felé (is) terelték a hajtóműtervezéssel foglalkozó szakemberek figyelmét. A tüzelőanyag-hatékonyságot tekintve ezeknél a hajtóműveknél még a mai korszerű reduktoros nagy kétáramúsági fokú hajtóművekhez képest is kb. 15%-os fogyasztáscsökkenést predesztinálnak. A zajcsökkentésre nagy erőfeszítéseket tesznek, de ez egyelőre megoldatlan [3].

A 2. ábra bal alsó sarkában egy köztes visszahűtött és hőcserélős hajtómű elvi felépítését láthatjuk. Több kutatási projekt is foglalkozott és foglalkozik ezzel az elgondolással, többek között az MTU Aero Engines AG és LEMCOTEC[4] európai kutatási projekt. Az alapelv egyszerű, de a megvalósítás rendkívül összetett. Nyilvánvaló, hogy a fúvócsövön kiáramló magas hőmérsékletű gázzal nagy energiát vesztünk. A kompresszió során a köztes visszahűtés sem új megoldás, de ezeknek már egy működő struktúrába beillesztése, úgy, hogy sem a tömeg, sem a méret, sem az áramlási veszteségek ne nőjenek jelentősen, rendkívül bonyolult feladat [5].

A 2. ábra jobb alsó sarkában látható elgondolás elnevezése „Propulsive Fuselage Concept". A hagyományos nagy kétáramúsági fokú hajtóművek tömeg- és ellenállás-csökkentése, valamint a tolóerő által a repülőgép szerkezetére ható terhelés kedvezőbb elosztása érdekében ígéretes lehet a tolóerő megosztása. Ez egyben lehetővé tenné az alap hajtómű fan fokozat átmérőjének csökkentését úgy, hogy a propulziós hatásfok növekedne az összességében nagyobb fan felület miatt [4].

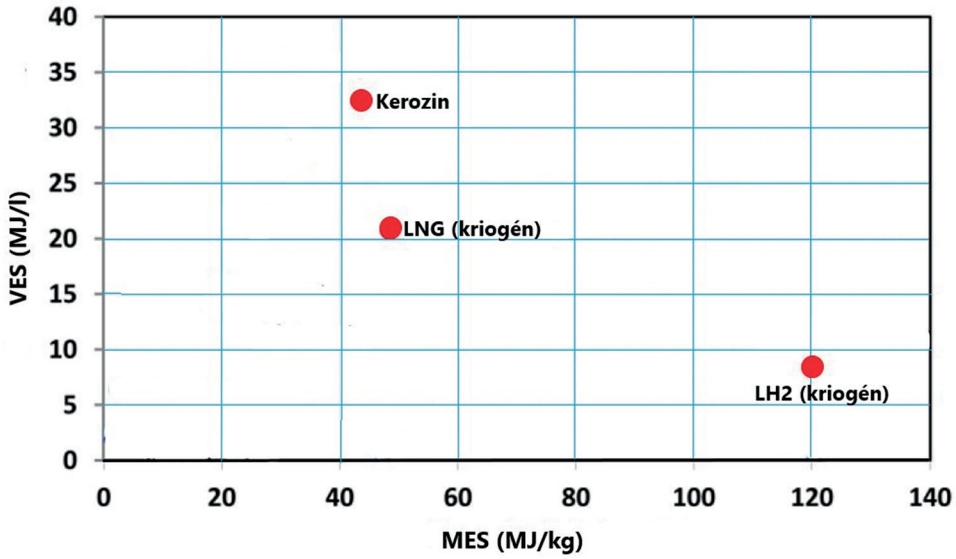
A következő fejezetekben részben a kriogén tüzelőanyagokkal (LNG, LH2) kapcsolatos nemzetközi kutatásokkal foglalkozunk, illetve vizsgáljuk, hogy ezek a tüzelőanyagok milyen hatással lesznek a gázturbinás hajtóművek legfontosabb teljesítmény- és megfelelőségi mutatóira.

3. Kriogén tüzelőanyagokkal végzett nemzetközi kutatások

Ahogy az előző fejezetben szóba került, az elégetett tüzelőanyag tulajdonságai, összetétele is befolyásolhatja a tüzelőanyag-hatékonyságot és a károsanyag-kibocsátást.

A tüzelőanyag kiválasztásának számos kritériuma van. Az egyik fő tényező az energiasűrűség, mivel a tömeg és térfogat csökkentése kiemelten fontos a repülés szempontjából. A tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűség (MES [MJ/kg]) és a térfogategységre vonatkoztatott energiasűrűség (VES [MJ/l]) egyaránt lényeges.

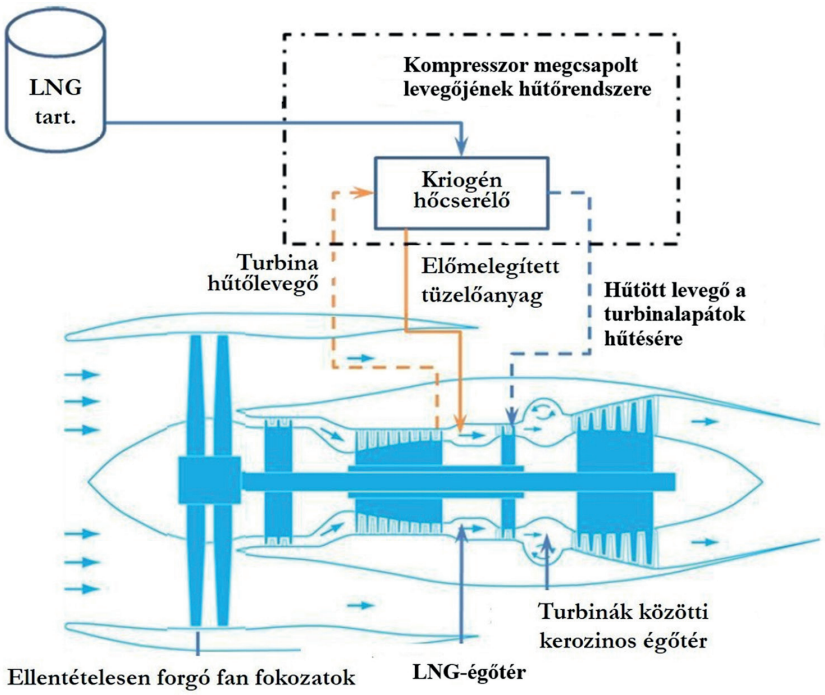
[4] Low Emissions Core-Engine Technologies.



3. ábra
Tüzelőanyagok tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűsége (MJ/kg) és a térfogategységre vonatkoztatott energiasűrűsége (MJ/l) (a szerzők [6] alapján)

A 3. ábrán a különböző energiaforrásokra láthatjuk ezeket az adatokat. Látható, hogy a kerozin esetében ezek az értékek kedvezők, ezért alkalmas repülőgép-tüzelőanyagnak. A cseppfolyósított hidrogén (LH2) magas MES-sel, de gyenge VES-sel rendelkezik, ami arra utal, hogy bármilyen észszerű mennyiségű LH2 szállításához nagy tárolókapacitásra lenne szükség. Ez kihívást jelent az LH2 repülésben való használatában. Ezen túlmenően az LH2 használata más kihívásokkal is jár, mint például a biztonság, logisztika stb. Természetesen nem szabad elhanyagolni az LH2 használatának előnyeit, mivel a CO_2-kibocsátás kiküszöbölhető [6].

Emellett jelentős figyelmet kapott az elsősorban metánból álló cseppfolyósított földgáz (LNG). Az LNG olyan földgáz, amelyet cseppfolyósítottak az energiasűrűség (VES) növelése és a nagynyomású tárolás elkerülése érdekében. A 3. ábrán látható, hogy az LNG a kerozin és az LH2 között helyezkedik el, mind a VES, mind a MES szempontjából. Jelenleg az LNG az egyik legolcsóbb elérhető üzemanyag. A földgáz globális készletei óriásiak, ami arra utal, hogy az LNG ára stabil lehet. Ráadásul az LNG az egyik legtisztább tüzelőanyag, és a közelmúltban bebizonyosodott, hogy LNG megújuló energia felhasználásával is előállítható [6]. Mindezt persze manapság bonyolítja, hogy a jelen gázellátási válság hatására megugrott a földgáz iránti kereslet, aminek hatására az árak kiszámíthatatlanul változnak, és az ellátás is bizonytalanná vált. A 4. ábrán egy LNG kerozin kombinált hajtóanyagú hajtómű elvi vázlatát láthatjuk.



4. ábra
Lehetséges „multi fuel" gázturbinás hajtómű elrendezése (a szerzők [6] alapján)

Az LNG előnyei:

- körülbelül 25%-os CO_2-kibocsátás-csökkenés azonos energiafogyasztás mellett;
- a földgáz jobban keverhető levegővel, mint a kerozin, ami csökkenti az NOx-kibocsátást;
- a kriogén hőcserélővel a kompresszortól elvett levegő hőmérséklete 400 K-nel csökkenthető, az LNG hőmérséklete pedig körülbelül 200 K-nel növelhető. Ennek eredményeként a turbina hűtőlevegő tömegárama 45%-kal csökkenthető;
- az LNG tömegegységre vonatkoztatott energiasűrűsége nagyobb, mint a keroziné [6].

Hátrányai:

- a kerozinnal ellentétben az LNG-t nem lehet szárnyakban tárolni;
- az LNG szigetelt hengeres vagy gömb alakú tartályokban tárolható, növelve a repülőgép üzemi üres tömegét;
- az LNG térfogati energiasűrűsége kisebb, mint a keroziné;
- repülőtéri létesítmények és logisztika szükséges az LNG tárolásához és tankolásához;
- az LNG égésének H_2O-kibocsátása (nagyobb magasságban szintén növeli az üvegházhatást) magasabb a kerozinéhoz képest [6].

4. Tüzelőanyagok sztöchiometrikus égésekor keletkező égéstermékek

Vizsgálatunk tárgyát a fentieknek megfelelően három tüzelőanyag, a kerozin, a földgáz és a hidrogén képezi. Elsőként ezek sztöchiometrikus égését vesszük górcső alá. Természetesen mind a kerozin, mind a földgáz összetétele némileg változhat. A kerozin esetében, hogy a sztöchiometrikus égés kémiai egyenlete felállítható legyen, egy reprezentatív összetevőt érdemes kiválasztanunk. A kerozin összetétele alapján leginkább a $C_{10}H_{22}$ szénhidrogénnel azonosítható. A kémiai reakció vizsgálata [(1) és (2) egyenletek] megadja, hogy a sztöchiometrikus égés esetén 1 kg tüzelőanyag elégetéséhez mennyi levegő szükséges, illetve ennek reciprokaként a tüzelőanyag és levegő arányát *(f)*.

$$C_{10}H_{22} + Y \cdot O_2 + 3{,}76 \cdot Y \cdot N_2 = 10 \cdot CO_2 + 11 \cdot H_2O + 3{,}76 \cdot 11 \cdot N_2 \tag{1}$$

Könnyen belátható, hogy a reakció végeredménye szén-dioxid és víz(gőz). Optimális esetben a levegő nitrogénje nem vesz részt a reakcióban, de a levegő mint gázkeverék egyik összetevőjeként figyelembe kell venni a tüzelőanyag–levegő arány meghatározásánál. Az (1) egyenletben Y-nal jelzett szám a tökéletes égéshez szükséges O_2-molekulák száma. Mivel a keletkezett égéstermékek összesen 31 oxigénatomot tartalmaznak, így az (1) egyenletben Y = 15,5. Az atomtömegek sorrendben szén, hidrogén, oxigén, nitrogén (M_C; M_H; M_O; M_N), segítségével a (2) egyenlettel számítható a keresett tüzelőanyag–levegő arány *(f)* [7].

$$f = \frac{\dot{m}_{tüza}}{\dot{m}_{levegő}} = \frac{10M_C + 22M_H}{31M_O + 31 \cdot 3{,}76M_N} = \frac{10 \cdot 12 + 22 \cdot 1}{31 \cdot 16 + 31 \cdot 3{,}76 \cdot 14} = \frac{142}{2127{,}8} = 0{,}0667 \tag{2}$$

A fenti érték reciproka megadja, hogy 1 kg tüzelőanyag elégetéséhez körülbelül 15 kg levegő szükséges. Ugyanakkor sztöchiometrikus égést feltételezve ez kb. 3,1 kg szén-dioxid és 1,4 kg víz(gőz) keletkezésével jár. Hasonlóan elvégezve a számításokat a metánra és a hidrogénre is az 1. táblázatban található eredményeket kapjuk.

1. táblázat
A vizsgált tüzelőanyagok tökéletes égését jellemző adatok [Varga Béla]

Sztöchiometrikus égés	kglev/kgtüza	$kgCO_2$/kgtüza	kgH_2O/kgtüza	kgtüza/kglev	Fűtőérték [MJ/kg]
$C_{10}H_{22}$ (kerozin)	14,985	3,099	1,394	0,0667	43,2171
CH_4 (metán)	17,160	2,750	2,250	0,0583	50
H_2 (hidrogén)	34,320	0,000	9,000	0,0291	118,429

Mivel a földgáz döntő része metán (97%), a továbbiakban a földgáz vizsgálatánál a metán égését vizsgáljuk. A 1. táblázatból az is látható, hogy a földgáz mint tüzelőanyag jelentősen kevesebb szén-dioxidot produkál, míg fűtőértéke magasabb, mint a keroziné.

Az égés feltételeinek javításával a fenti égéstermékek mennyisége nem csökkenthető, legfeljebb maga a tüzelőanyag-fogyasztás takarékosabb hajtóművekkel, aerodinamikai szempontból jobb sárkány- és szárnykialakítással, tömegcsökkentéssel, optimálisabb forgalomszervezéssel. Természetesen az égés nem lesz tökéletes a hajtómű égőterekben, így a fenti két

égésterméken felül egyéb káros anyagok is keletkeznek (2. táblázat). A kénoxidszármazékok alapvetően nem az égőterektől és az égés minőségétől függnek, hanem a finomítás során a tüzelőanyagban maradt kéntartalomtól. A többi káros anyag kibocsátásának mértéke némileg csökkenthető az égőterek és az égés optimalizálásával.

2. táblázat
1 kg kerozin elégetése során keletkezett égéstermékek grammban kifejezve [7]

káros anyag	CO_2	H_2O	NO_x	SO_x	CO	el nem égett tüzelőanyag	korom
g/kg tüzelőanyag	3100	1394	9–15	0,3–0,8	0,2–0,6	0–0,1	0,01–0,05

Az égés során keletkezett káros anyagokat hatásuk szempontjából is ketté kell választani. Egyrészt a közvetlen földközeli környezetszennyezésre, illetve a magaslégköri szennyezésre.

A földközeli környezetszennyezés alapvetően a repülőterek közelkörzetében jelentős, és ilyen szempontból a gurulás, a fel- és leszállás, valamint az emelkedés és megközelítés fázisait érinti a repülésnek. Mivel ezek közvetlenül érintették a repülőterek környezetét és ennek megfelelően az ott élő lakosságot és természetet, így ez került elsőnek a figyelem középpontjába és lett a szabályozások tárgya is. Ennek megfelelően az ICAO már az 1960-as évektől törekszik egyre szigorúbb szabályozással ezeknek a szennyező anyagoknak a csökkentésére.

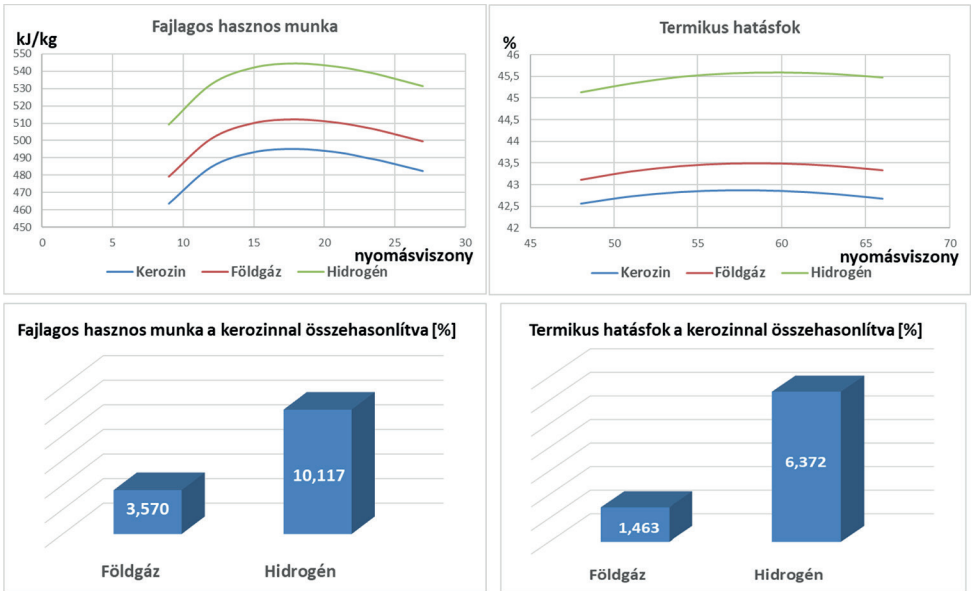
A magaslégköri környezetszennyezés nem annyira nyilvánvaló és azonnali hatású, de hosszabb távon következményei súlyosabbak lehetnek, figyelembe véve a globális felmelegedés, a klímaváltozás és az ózonréteg károsodásának már ma is jelen lévő jelenségeit. Az égésnél keletkező vízre mondhatnánk, hogy ez ártalmatlan, hiszen a természetben előforduló, életünk szerves részét képező anyag. Magaslégköri kibocsátásának hatása azonban még ma sem tisztázott, de a környezet- és klímavédelmi szakértők számára egyre aggasztóbb a nagy mennyiségű vízgőz sztratoszférába kerülése. A fő „ellenség" azonban a szén-dioxid.

A további vizsgálatok tárgya is ennek megfelelően a szén-dioxid, nevezetesen hogy az esetlegesen alkalmazott alternatív tüzelőanyagok hogyan befolyásolják a szén-dioxid-kibocsátást, illetve a hajtóművek teljesítményparamétereit.

5. Kriogén tüzelőanyagok hatása a hajtómű teljesítményparamétereire

Ebben a részben a három tüzelőanyag hajtóműteljesítmény-paramétereire, nevezetesen a fajlagos hasznos munkára és a termikus hatásfokra gyakorolt hatását vizsgáltuk meg a GasTurb 10 program segítségével. Minden esetben a bázisértéket a kerozinnal kapott adatok adják. Az ehhez képesti %-os eltéréseket ábrázoljuk a két alternatív tüzelőanyag esetében.

Turbina előtti gázhőmérsékletként 1750 K-t adtunk meg, ami meglehetősen magas, de a jelen technológiai viszonyok mellett már nem kiugró. A hatásfokok és veszteségek sorrendben: a kompresszor politrópikus hatásfoka: 0,85, az expanzió hatásfoka: 0,88, az égőtér hatásfoka: 0,97, a hajtómű teljes nyomásveszteségi tényezője: 0,94, és végül a mechanikai hatásfok: 0,97.



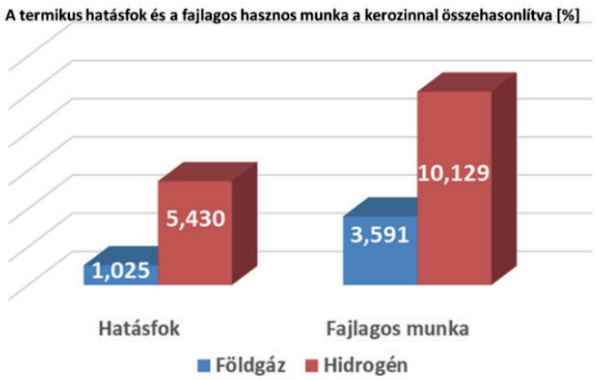
5. ábra
A maximális fajlagos hasznos munka és a maximális termikus hatásfok változása földgáz és hidrogén mint alternatív tüzelőanyagok alkalmazásával [a szerzők]

Megjegyzendő, hogy a gázturbinás (Brayton) körfolyamatok, adott hőmérséklethatárok között és gépegységveszteségek mellett, mind fajlagos hasznos munka, mind pedig termikus hatásfok szempontjából rendelkeznek maximális értékekkel, amelyeket a kompresszor nyomásviszonyával lehet jellemezni [8, p. 41]. A fajlagos hasznos munka és a termikus hatásfok maximumaihoz tartozó nyomásviszonyértékek azonban jelentősen eltérnek egymástól. Ennek megfelelően egyszerre nem produkálható mindkét optimum. A program segítségével meghatározható a maximális fajlagos hasznos munkához, a maximális termikus hatásfokhoz tartozó nyomásviszony, illetve számítható a hozzájuk tartozó fajlagos hasznos munka és termikus hatásfok értékek.

A megkapott eredményeket Excel diagramszerkesztővel szemléltettük. A fajlagos hasznos munka és a termikus hatásfok szerinti optimumok a nyomásviszony függvényében jól kirajzolódnak, amit az 5. ábra felső részén láthatunk. Ennek megfelelően a maximális fajlagos hasznos munkához tartozó nyomásviszony körülbelül 17 a maximális termikus hatásfokhoz tartozó nyomásviszony pedig körülbelül 60, illetve ezek értéke nem változik jelentősen az alkalmazott tüzelőanyagok függvényében. Ugyanakkor az aktuális nyomásviszonyok mellett (17 és 60) mind a fajlagos hasznos munka, mind a termikus hatásfok jelentősen nőtt, összehasonlítva a kerozin által produkált értékekkel. Az 5. ábra jobb alsó részén ezek a relatív növekedési értékek leolvashatók sorrendben a földgáz és a hidrogén esetében. Ez például hatásfok szempontjából 0,63%-os, illetve 2,71%-os abszolút hatásfok-növekedést jelentene.

Természetesen egyetlen gázturbinás hajtómű esetén sem várható, hogy a munkapont a két szélsőérték valamelyikére lenne hangolva, hanem valamilyen köztes optimális nyomásviszonyértékre. Ebben a vizsgált esetben ezt a nyomásviszonyt (önkényesen), 23-as értékre

vettük fel. Természetesen ebben az esetben mind a fajlagos hasznos munka, mind a termikus hatásfok alacsonyabb lesz, mint az 5. ábrán látható maximális értékek. A 6. ábrán erre a nyomásviszonyra vonatkozó változás értékeit látjuk mind a hatásfok, mind pedig a fajlagos hasznos munka százalékos változásának tekintetében.



6. ábra
A termikus hatásfok és a fajlagos hasznos munka változása földgáz és hidrogén esetében egy köztes munkapontra (nyomásviszony: 23) [a szerzők]

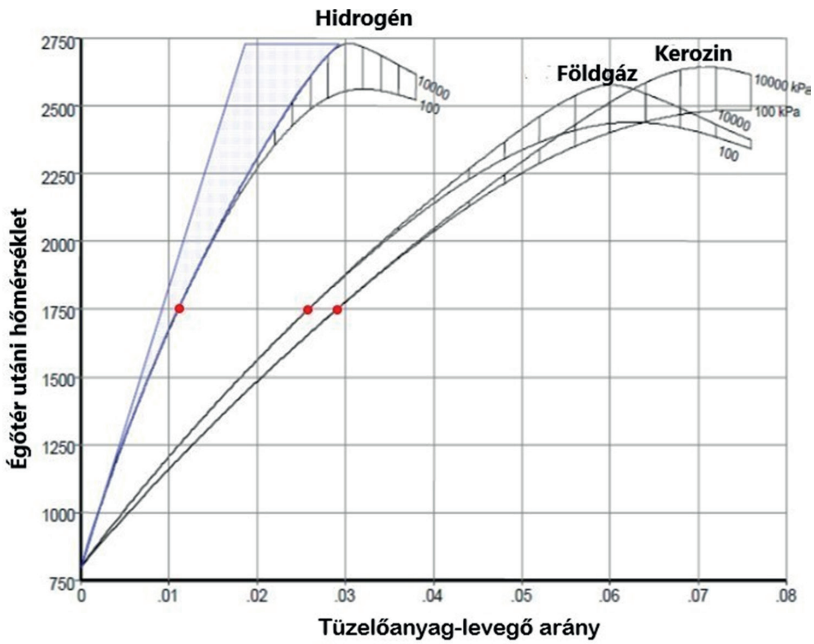
Ebben az esetben is hasonló eltéréseket tapasztalhatunk a fajlagos hasznos munka esetén, a termikus hatásfok tekintetében viszont kicsit alacsonyabb a növekedés, mint a legjobb hatásfokokhoz tartozó nyomásviszonynál. Ez azonban nem szignifikáns, amiből az következik, hogy mindkét jellemző esetében az értékek javulása a lehetséges üzemi tartományban nem változik jelentősen.

A 7. ábrán a szén-dioxid- és a vízgőzkibocsátás vizsgálata látható 1 kg munkaközegre, illetve 1 kWh hasznos munkára vetítve. A szén-dioxid-kibocsátás csökkenése már a földgáz esetében is nyilvánvaló, értelemszerűen a hidrogén esetében pedig zérus. A vízgőzkibocsátás mindkét esetben nőtt. Még jelentősebb az eltérés, ha a fajlagosítás a kWh egységre történik.

7. ábra
A kibocsátott szén-dioxid és vízgőz mennyiségének %-os változása 1 kg munkaközegre, illetve 1 kWh-ra vetítve [a szerzők]

Mivel rendelkezésre állnak a tüzelőanyag-fogyasztási értékek és a hajtómű levegőfogyasztása minden esetben 1 kg/s, ez egyben a tüzelőanyag–levegő viszony *(f)* értékét is megadja nekünk. Sorrendben kerozin 0,0286, földgáz 0,0255, hidrogén 0,0109.

A 8. ábrán a NATO Műszaki Csoportja által publikált teljesítmény-előrejelzés és a gázturbinás hajtóművek működésszimulációja tanulmányának egy diagramja látható, ahol 800 K-es égőtérbe belépő levegő-hőmérséklet mellett leolvasható, hogy egyes tüzelőanyagok esetében adott tüzelőanyag–levegő arány *(f)* mellett milyen kilépő gázhőmérséklet várható [9].



8. ábra
A kilépő gázhőmérséklet egyes tüzelőanyagok esetében adott tüzelőanyag–levegő arány mellett [9]

Mivel a korábban említett 23-as nyomásviszonyt állítottuk be mint bázis munkapontot, amely esetében a kompresszor utáni gázhőmérséklet körülbelül 800 K, valamint feltételeztük az 1750 K-es turbina előtti gázhőmérsékletet, így összehasonlítva a modell által meghatározott tüzelőanyag–levegő arányt és a 8. ábrán megjelölt piros pontokat, jelentős egybeesést látunk, igazolva eredményeink helyességét.

6. Összefoglalás

A cikkben nem vizsgáltuk az adott tüzelőanyagokkal szemben felmerülő egyéb problémákat, amelyek különösen repülőgép-gázturbinák esetében jelentenek súlyos nehézségeket. Ezek például a fedélzeten történő tárolás, illetve a hidrogén esetében a fokozott tűzveszélyesség. Földi gázturbinák esetében ez kevésbé jelent problémát, és számos földi gázturbina üzemel

földgázzal. Tisztán a hajtómű üzemére gyakorolt hatás szempontjából viszont mindkét tüzelőanyag mindkét mutatóra pozitív hatással volt. A hatások szempontjából érdemes a gázturbina részegységeit külön megvizsgálni. A kompresszorban semmi eltérés nem lehet. Mindhárom tüzelőanyag esetében azonos tömegáram sűrítése történt ugyanakkora nyomásviszonnyal, ami ugyanakkora kompresszormunkát igényelt. Az égőtérben ugyanakkora turbina előtti gázhőmérséklet (1750 K) eléréséhez mindkét alternatív tüzelőanyag esetében kevesebb tüzelőanyag szükségeltetett a magasabb fűtőérték miatt, ami a fajlagos fogyasztásértékeket csökkentette. Az azonos turbina előtti gázhőmérséklet, nyomás és tömegáram nem jelenti azt, hogy a továbbiakban mindhárom esetben azonos teljesítményadatokat várhatunk. Ennek oka, hogy ebben a keresztmetszetben a gáz összetétele szignifikánsan eltér egymástól. Már a földgáz esetében is jelentősen magasabb a víz(gőz) és alacsonyabb a szén-dioxid-tartalma az égésterméknek, a hidrogén esetében pedig értelemszerűen nem tartalmaz szén-dioxidot. A magasabb víz(gőz) tartalom magasabb fajlagos hasznos munkát és jobb hatásfokot eredményez. Ugyanakkor az előbbi okból a földgáz esetében is csökken a szén-dioxid-emisszió, a hidrogén esetében pedig zérus.

Felhasznált irodalom

[1] A. L. Mohd Tobi, A. E. Ismail, „Development in Geared Turbofan Aeroengine," *2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 131. évf. p. 012019. 2016. Online: https://doi.org/10.1088/1757-899X/131/1/012019

[2] A. Epstein, *The Pratt & Whitney PurePower® Geared Turbofan™ Engine.* Academie de l'Air et de l'Espace Paris, September, 2015. Online: https://academieairespace.com/wp-content/uploads/2018/05/prattw.pdf

[3] The Open Rotor, The Safran Group's Engine of the Future, is Tested in Istres. *Invest in Provance,* 2017. október 12. Online: https://www.investinprovence.com/en/news/open-rotor-safran-group-s-engine-of-future-is-tested-istres

[4] A. Seitz, et al., *Concept Validation Study for Fuselage Wake-filling Propulsion Integration.* 2018. Online: https://www.semanticscholar.org/paper/Concept-validation-study-for-fuselage-wake-filling-Seitz-Peter/363d1667379603f040c5df6ee0482c39a2f1d139

[5] F. Yin, *Modelling and Characteristics of a Novel Multi-fuel Hybrid Engine for Future Aircraft.* 2016. Online: https://www.researchgate.net/figure/Intercooled-recuperated-aero-engine-27_fig9_322299242

[6] F. Yin et al., „Performance Assessment of a Multi-fuel Hybrid Engine for Future Aircraft," *Aerospace Science and Technology,* 77. évf. pp. 217–227. 2018. Online: https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.03.005

[7] N. Cumpsty, *Jet Propulsion.* Cambridge, Cambridge University Press, 2003.

[8] Varga B., *Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatásfok növelésének műszaki technológiai háttere, és ezek hatása a katonai helikopterek korszerűsítésére.* Doktori értekezés, Budapest, 2013. Online: http://uni-nke.hu/downloads/konyvtar/digitgy/phd/2013/varga_bela.pdf

[9] Component modelling for system models, Online: http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/TR/RTO-TR-AVT-036/TR-AVT-036-04.pdf

Cryogenic Energy Sources for the Commercial Aviation

As a result of the growth of air transport in the past decades (1960–2018), the sector's CO_2 emissions increased from 6.8 million tons to 1,034 million tons. The package of measures aimed to achieve ICAO's global CO_2 reduction goals sets important technological expectations for engine manufacturers as well. Accordingly, manufacturers and their consortia with university research groups and research institutes are feverishly searching for solutions. These researches also cover the possible application of new operating principles, structural solutions, structural materials, and new alternative fuels. The paper was inspired by the concept of the so-called Multi-Fuel Hybrid Engine (MFHE) burning Liquefied Natural Gas (LNG) and kerosene, investigated by Feijia Yin et al. [6], *on the other hand, we examined how the use of LNG and LH2 affects the fuel efficiency and expected performance of aircraft engines compared to kerosene.*

Keywords: *specific network output, thermal efficiency, alternative fuels, cryogenic fuels, LNG, LH2*

Dr. Varga Béla
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

varga.bela@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-3454-0825

Béla Varga, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aircraft and Engine
varga.bela@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-3454-0825

Dr. Kavas László
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

kavas.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-7375-3527

László Kavas, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aircraft and Engine
kavas.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-7375-3527

Dr. Tóth József
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-Hajtómű Tanszék

toth.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8647-3404

József Tóth, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aircraft and Engine
toth.jozsef@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0001-8647-3404

Prof. Dr. Óvári Gyula
professor emeritus
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék

ovari.gyula@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-8604-5861

Gyula Óvári, CSc
Professor Emeritus
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aircraft and Engine
ovari.gyula@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-8604-5861

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 199–210. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.15

Varga Péter János, Baross Márk Tamás, Wührl Tibor

SDR[1] mint lehetséges drónzavaró eszköz

Napjainkban a drónok felhasználása és alkalmazása szinte az életünk minden területén megjelenik. A felhasználási intenzitás növekedése egyre nagyobb, akár katonai, akár civil vonatkozásban. A drón alkalmazása egy bizonyos nézőpontból lehet „hasznos", az emberiség és társadalom fejlődését elősegítő, és lehet „káros" is. Az adott nézőpontból „hasznos" kategóriába sorolt drónt és annak küldetésteljesítését meg kell védeni, míg a „káros" kategóriába sorolt működését és küldetés-végrehajtását korlátozni kell. Cikkünkben a drónok tájékozódását segítő műholdas navigációs rendszer kiiktathatóságát és zavarhatóságát vizsgáljuk. Vizsgálatainkhoz szoftverdefiniált rádiót (SDR) használunk.

Kulcsszavak: *drón, UAV, SDR, zavarás, jammer*

1. Bevezetés

A drónok számos területen felhasználhatók [1]. A helymeghatározó rendszerek adatainak alkalmazása alapvető fontosságú a drónok biztonságos és megbízható navigációjához [2]. Általánosságban elmondható, hogy a feladat a drónt eljuttatni egy kiválasztott helyre és a legtöbb esetben visszahozni azt a kiindulási helyre. Napjainkban a drónygyártók törekednek arra, hogy GNSS[2]-vevővel ellátott drónokat gyártsanak. Ennek egyik oka, hogy a drónos feladatok legtöbbször a látóhatáron kívül kell hogy megvalósuljanak, ebben az esetben pedig elengedhetetlen a műholdas navigációs megoldások alkalmazása. A pontosabb helyadatok meghatározásához a drónygyártók olyan vevőkészülékeket integrálnak az eszközeikbe, amelyek lehetővé teszik több helymeghatározási rendszer egyidejű adatainak feldolgozását [1].

A drónok piaca folyamatosan növekszik. Eladási darabszámuk évről évre bővül. Felhasználás szempontjából a polgári célú és katonai felhasználású eszközöket és rendszereket különböztetjük meg. Ugyanakkor ismert és napjainkban előforduló konfliktushelyzetek is alátámasztják, hogy a polgári felhasználási célra tervezett és gyártott eszközök ugyan lényeges limitációkkal, de katonai célokra is alkalmazhatók. A katonai célú drónokkal cikkünkben nem foglalkozunk, ugyanakkor tapasztalhatjuk, hogy civil feladatokra készített drónok kaphatnak ettől eltérő küldetést is.

A polgári célú drónokat a következő feladatcsoportok elvégzésére használják:

- mezőgazdaság és környezetvédelem;

[1] Software Defined Radio.
[2] Global Navigation Satellite System.

- ellenőrzés és karbantartás;
- felmérés és térképészet;
- közbiztonság;
- tudományos;
- oktatás;
- média;
- szabadidő;
- áruszállítás [2], [3].

A feladatok elvégzéséhez a drón a helymeghatározási adatokat a következőképpen használhatja fel:

- útvonalpont-navigáció;
- helymegjelölés;
- dróntelemetria;
- felismerés és elkerülés;
- nyomkövetés/felügyelet;
- hazatérés/visszatérés az induláshoz (RTL);
- magasságtartás;
- valós idejű mozgástani pozícionálás (RTK) [4].

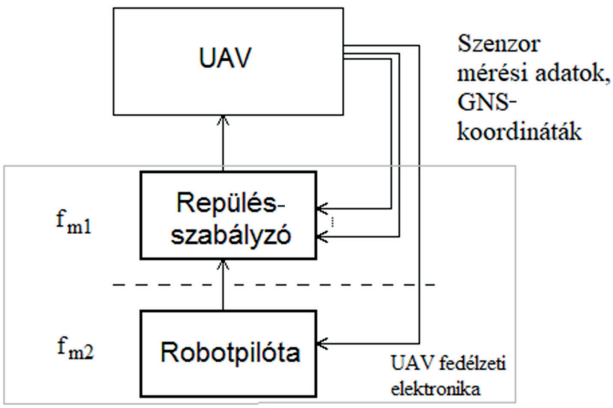
Kutatásainkhoz megvizsgáltuk a legnagyobb dróngyártó cégek – DJI, Parrot, Skydio, XAG, JOUAV – drónjait. E gyártók termékeinek nyilvános adatai alapján kijelenthető, hogy ezek mindegyikében ki van alakítva a műholdas helymeghatározás. A működés folytonosságának biztosítása érdekében az egyes eszközöket felkészítették akár több helymeghatározó rendszer adatainak vételére is. Az 1. táblázatban ennek rendszerezését kívántuk bemutatni. A zölddel jelölt cellák a helymeghatározás alkalmazását mutatják gyártó és helymeghatározó rendszer függvényében, a piros cellák ezek hiányát [5].

1. táblázat
Helymeghatározó rendszerek adatainak alkalmazása gyártók szerint [5]

	DJI	***Parrot***	***Skydio***	***XAG***	***JOUAV***
GPS					
Glonass					
Galileo					
BeiDou					

Az új típusú drónok nagy mennyiségű és nagy integráltsági fokú fedélzeti elektronikával rendelkeznek, amelyek biztosítják a magas működésbiztonságot és széles körű funkcionalitást. A rendszerstruktúrában a repülésszabályozó és robotpilóta funkcionalitást digitális beágyazott vezérlő áramkörök és az azokon futó szoftverek valósítják meg. A rendszer visszacsatolását a szenzor mérési adatai biztosítják. Ilyen visszacsatolt adatnak tekinthetők a tartózkodási hely koordinátái, valamint az aktuális repülési paraméterek is. A repülésszabályozó körök a stabil repülésért és az egyes manőverek biztonságos végrehajtásáért felelnek, míg a robotpilóta-rendszer a bejárt útvonal, valamint a célállomás eléréséért, illetve a visszatérésért felelős. Az 1. ábra egy drón funkcionális rendszerstruktúra-modelljét mutatja.

Az ilyen rendszerek több helyadat felhasználásával pontosabb feladatvégzést tesznek lehetővé a drónok számára [6].



1. ábra
Drón funkcionális rendszerstruktúra-modellje [15]

2. Műholdas navigációs rendszerek

A műholdas navigációs rendszerek elengedhetetlenek napjainkban. A vevőegység mérete és megfizethető ára miatt számtalan elektronikai eszközben megtalálhatók már. A kereskedelemben forgalmazott drónok is rendelkeznek legalább egy, de a legtöbb esetben több műholdas rendszer vételére alkalmas vevőegységgel. A kutatásunk során a GPS, Glonass, Galileo és BeiDou rendszerek zavarérzékenységét fogjuk vizsgálni. E műholdas helymeghatározó rendszerek a legelterjedtebbek a drónok kapcsán. A drónzavarás vonatkozásában az alábbiakban áttekintjük e navigációs rendszerek fontosabb paramétereit [7].

2.1. GPS (Global Positioning System)

A globális helymeghatározó rendszert az Amerikai Egyesült Államok valósította meg, amely Földünkön a nap bármely időpillanatában elérhető rendszer az eszközeink számára.

Rádiófrekvenciás sávok szempontjából a GPS rendszer három fő sávban érhető el az L1, L2 és az L5-ös sávban. A sávszélességek mid a három esetben 20,46 MHz-esek. Az L1-es sávnak a vivőfrekvenciája 1575,42 MHz-nél található, míg az L2 és az L5-ös tartománynak 1222,60 MHz, illetve 1176,45 MHz-en [8].

2.2. Galileo

A Galileo műholdas navigációs rendszert az Európai Unió működteti. A technikai paraméterekből megállapíthatjuk, hogy a GPS rendszerhez illeszkedően történt meg a kialakítása.

Rádiófrekvenciás sávok szempontjából a Galileo rendszer az E1, E5a, E5b és az E6-os sávokban érhető el. Az E1-es sáv sávszélessége 24,56 MHz, E5a és E5b sáv esetén 25,57 MHz, míg az E6-os sáv 40,92 MHz-es sávszélességgel rendelkezik. A vivőfrekvenciák tekintetében az E1-es 1575,42 MHz, E5a esetén 1176,45, MHz E5b esetén 1207,14 MHz, illetve az E6-os sáv vivőfrekvenciája 1278,75 MHz [9].

2.3. Glonass

A Glonass műholdas navigációs rendszert Oroszország üzemelteti. Kialakítása szempontjából hasonló paraméterekkel rendelkezik, mint a GPS és a Galileo műholdas navigációs rendszer.

Rádiófrekvenciás sávok szempontjából a Glonass rendszer az L1, L2 és L3-as sávokban érhető el. Az L1-es sáv sávszélessége 7,31 MHz, az L2-es sáv esetén 5,69 MHz, míg az L3-as sáv 20,46 MHz-es sávszélességgel rendelkezik. A vivőfrekvenciák tekintetében az L1-es sávnak 1600,99 MHz az L2-es sávnak 1248,06 MHz, míg az L3-as sávnak 1202,03 MHz [10].

2.4. BeiDou

A BeiDou műholdas navigációs rendszert Kína üzemelteti, amelynek fő felhasználása, technikai paraméterei és működési tartománya hasonló az előző helymeghatározó rendszerekéhez. Rádiófrekvenciás sávok szempontjából 4 fő sávról beszélhetünk: B1, B2a, B2/B2b és B3-as sávokban érhetők el. Az egyes sávok sávszélessége B1-es sáv esetén 32,74 MHz, míg B2a, B2/B2b és B3 esetén megközelítőleg 20,46 MHz a sávszélesség. A vivőfrekvenciák tekintetében a B1-es sávnak 1575,46 MHz, B2a esetében 1176,45 MHz, B2/B2b esetén 1207,14 MHz és B3-as sáv esetén 1268,52 MHz [11].

Összességében kijelenthetjük, hogy a fentiekben tárgyalt helymeghatározó műholdak felhasználása és működési paramétereik hasonlók. Fontos továbbá megjegyezni, hogy az adott földi pozícióban, ahol a vizsgálatokat végezzük, térképezzük fel az egyes helymeghatározó műholdas rendszerekhez tartozó műholdakat, mert természetes, hogy egy adott pozícióból egy időben az adott rendszer összes műholdja nem „látható", azok jele nem fogható. Vizsgálataink során csak azokban a sávokban végeztünk méréseket és kísérleteket, amelyeken a navigációs rendszer műholdjai épp detektálhatók voltak. A civil felhasználás vonatkozásában – konfliktusmentes állapotot feltételezve – a többszörös lefedés redundanciát jelent, ami növeli a működésfolytonosságot.

Az adott földi ponton és annak környezetében az időjárás, a légköri jellemzők (pára, felhők vagy tiszta égbolt) némiképp változtatják az egyes műholdakról érkező jelek futási idejét. Ez az eltolás helymeghatározási pontatlanságot eredményez. Ennek kiküszöbölésére a földfelszín egy ismert koordinátájú pontjára GNSS-vevőkészüléket telepítünk, amely a légköri változások függvényében más-más koordinátákat határoz meg. A hibaadatok földfelszíni

sugárzásával egy adott lefedettségi területen így akár centiméteres helymeghatározási pontosság is megvalósítható [12].

3. Szoftverrádiók, szoftverdefiniált rádiók és szoftverkörnyezet

Korunk chiptechnológiai fejlettségi szintjén a digitális rádió adó- és vevőegységek rugalmasan kialakíthatók szoftverrádiós, valamint szoftverdefiniált rádiós megoldásokkal. A digitális kommunikációs interfész alapvetően egy alapsávi egységből és egy rádiófrekvenciás konverterből áll. Az alapsávi egység (Base Band Unit) feladata az adóegység esetén, a továbbítandó információ konvertálásán (például bitkeverés – withening, scrambling) túl, a bitcsoportképzés és ehhez I-Q szimbólum előállítása. Az I-Q jel rádiófrekvenciás tartományba konvertálását a rádiófrekvenciás egység valósítja meg. Ezt az egységet tipikusan analóg szorzóáramkörökből és nagy pontosságú, spektrálisan tiszta, nagyfrekvenciás harmonikus vivőből vagy vivőcsoportból alakítjuk ki. Szoftverrádiók esetén a leírt funkciókat többnyire futó szoftverrel, míg szoftverdefiniált rádiók esetén FPGA szoftveres konfigurációjával kialakított hardver látja el [6].

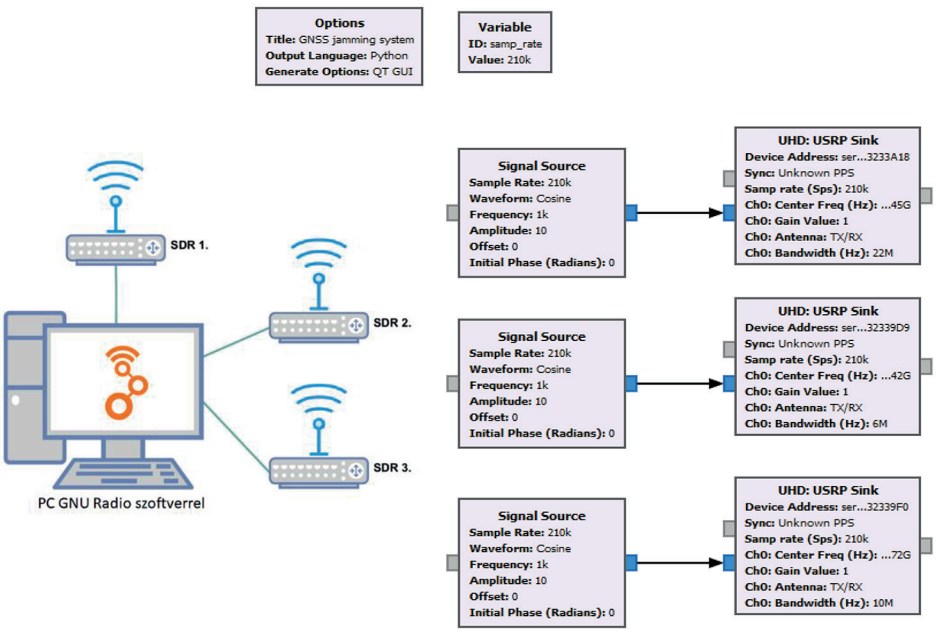
3.1. Az SDR mint hardver felépítése

Kísérleteinkhez az Ettus USRP B210 USB SDR-eszközeit használtuk. Az USRP B210 egy teljesen integrált, egységes, univerzális szoftverrádió-perifériás platformot biztosít, folyamatos frekvencialefedettséggel 70 MHz–6 GHz között. A fejlesztők egy olyan eszközt terveztek, amely két teljesen integrált adó-vevőt tartalmaz egy nyitott és újraprogramozható Spartan6 FPGA-val, valamint USB 3.0-ás kapcsolattal. 56 MHz-es valós idejű RF sávszélességgel rendelkezik [13].

3.2. Szoftverkörnyezet

A kísérlet szoftveres megvalósítását GNU Radio-ban végeztük el. A GNU Radio egy ingyenes és nyílt forráskódú szoftverfejlesztő eszközkészlet, amely jelfeldolgozási blokkokat biztosít a szoftverrádiók megvalósításához [14]. A 2. ábra a mérési környezetet és a GNU Radio blokkvázlatát mutatja.

A programban a „Signal Source" a jel forrását biztosítja, míg az „UHD: USRP Sink" blokkokat a helymeghatározó rendszerek vivőfrekvenciáira állítottuk be. Az SDR-eszközöket a program a sorozatszámuk alapján tudja külön-külön vezérelni.



2. ábra
Mérési környezet és minta GNU Radio-kód [a szerzők]

4. Műholdas navigációs rendszerek zavartatása

Az elektronikai zavarás egy elektronikai támadási forma, amely a rádiózás megjelenésével egyidejűleg a katonai területen alakult ki. A zavarás célja az elektronikai eszközök vevőberendezései működésének korlátozása, az információt hordozó hasznos jelek vételének akadályozása. Napjainkban a civil életben is jelentősen függünk a helymeghatározó szolgáltatásoktól, ezért a rádiófrekvenciás kommunikáció bizalmassága, sértetlensége és rendelkezésre állása egyre inkább előtérbe kerül [16], [17].

Egy adatkommunikációs jel megzavarása több módon történhet. Kutatásaink és kísérleteink során a Shannon–Hartley-csatornakapacitásból indultunk ki, miszerint egy véges sávszélességű, zajos csatornán az elméleti maximális adatátviteli sebességet az úgynevezett csatornakapacitás-összefüggés definiálja:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \frac{S}{N}) \tag{1}$$

Az (1) egyenletben a *C* a csatornakapacitást jelenti bit/s egységben, ami az adott körülmények között az elméleti maximálisan elérhető adatátviteli sebességet jelenti. A *B* a csatorna sávszélessége Hz-ben, az *S* a jel teljesítményét, míg az *N* a zajteljesítményt jelenti. A navigációs

rendszerek műholdjai egy jól definiált sávszélességen és egy adott jelteljesítménnyel sugározzák a helymeghatározáshoz szükséges jeleket. Az összefüggésből jól látható, hogy a zajparaméter emelésével a csatorna kapacitása, így az átvihető információ mennyisége csökkenthető, vagy teljesen megakadályozható a vételi helyen, illetve körzetben [18], [19], [20].

4.1. Zavaróberendezés kialakítása SDR segítségével

Az előzetes kutatásaink során kiválasztott műholdas helymeghatározó rendszerek alapparaméterei segítségével a GNU Radio blokkokból megalkottuk a gyakorlati mérésekhez használható zavaróberendezés szoftverkörnyezetét. A következő, 2. táblázat a rádiós környezetben beállított helymeghatározó rendszerek főbb paramétereit mutatja.

2. táblázat
SDR-alapú zavaráshoz tartozó frekvenciatartományok [9]

GPS	L1	L2
Frekvencia	1575,42 MHz	1227,6 MHz
Sáv	"± 10,23 MHz"	"± 10,23 MHz"

Glonass	L1	L2
Frekvencia	1600,99 MHz	1248,06 MHz
Sáv	"± 3,9118 MHz"	"± 2,854 MHz"

Galileo	E1	E5b
Frekvencia	1575,42 MHz	1207,14 MHz
Sáv	"± 12,276 MHz"	"± 10,23 MHz"

BeiDou	B1	B2
Frekvencia	1561,098 MHz	1207,14 MHz
Sáv	"± 2,046 MHz"	"± 10 MHz"

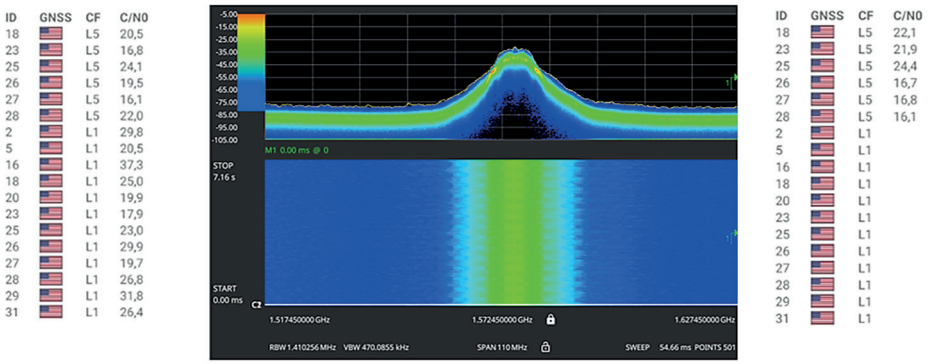
4.2. Gyakorlati megvalósítás

Kísérleteinket laboratóriumi körülmények között végeztük el. Felhasznált eszközeink a kísérleteink alatt egy számítógép, amelyhez egy Ettus B210 USRP SDR kapcsolódott. A rádiós spektrumot Anritsu MS2090A spektrumanalizátorral vizsgáltuk, míg a kísérleti helyen az adott időben detektálható műholdakat műholdas navigációs rendszereket meghatározó készülékkel jeleztük ki.

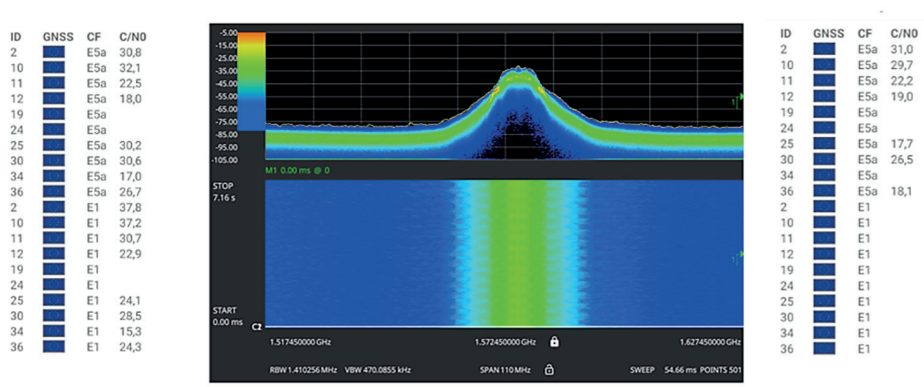
A kísérletek során megvizsgáltuk az elérhető helymeghatározó műholdakat, ezeket vettük viszonyítási alapul. A következő lépésben az előre megírt GNU Radio projekt file-t futtattuk és vizsgáltuk a rádiós spektrum alakulását. A zavarjelünk kibocsátása után újra megvizsgáltuk a helymeghatározó műholdakat a vevőkészüléken.

A következő ábrákon (3–6. ábrák) láthatók a kísérletek során rögzített képernyőképek, bal oldalon a zavarásmentes környezetben elérhető helymeghatározó műholdak, középen

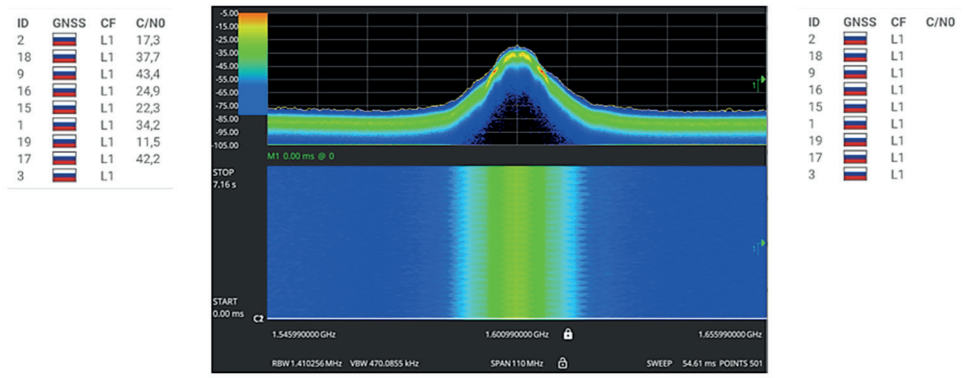
az általunk generált zavaró jel spektrumképe, jobb oldalon pedig a zavarás alatt elérhető helymeghatározó műholdak láthatók.



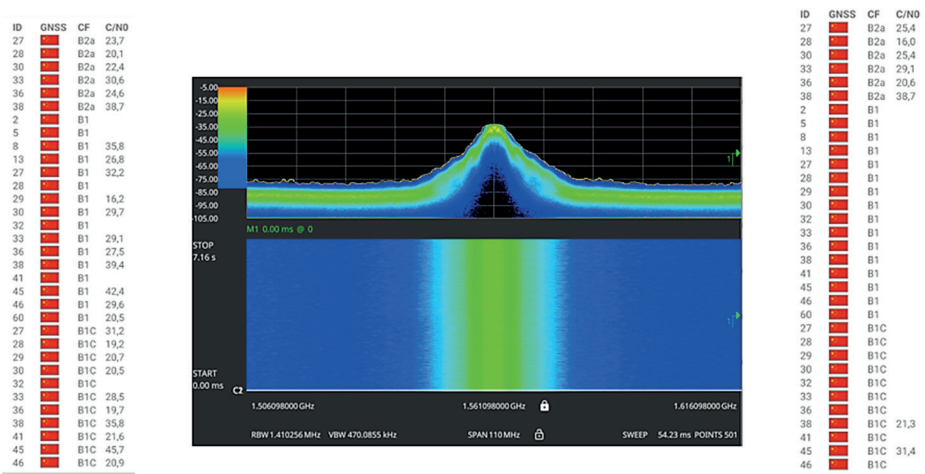
3. ábra
GPS L1 sáv zavarása [a szerzők]



4. ábra
Galileo E1 sáv zavarása [a szerzők]



5. ábra
Glonass L1 sáv zavarása [a szerzők]



6. ábra
Beidou B1 sáv zavarása [a szerzők]

Az ábrákon jól látszik, hogy a kiválasztott helymeghatározó rendszerhez tartozó frekvencián sikerült a jel-zaj viszonyt olyan módon megváltoztatnunk, hogy a vevőkészülék nem tudta a számára fontos információt kinyerni a zajos jelből. A jel-zaj viszony rontásával a zavart körzetben a navigációs eszköz számára a helymeghatározásra használt műholdak láthatatlanná váltak.

5. Következtetések

A drónok a pontos feladatvégzéshez minden körülmények között valamilyen helymeghatározó rendszer adatait fogják használni a közeljövőben is. Kísérleteinkben bemutattuk, hogy SDR-rel miként lehet viszonylag egyszerű módon kiiktatni a helymeghatározó vevőkészülékek vételét. A saját fejlesztésű drónjaink esetében erre a lehetőségre mindenképp fel kell készülni. Az is látszik kísérleteinkből, hogy a rugalmasan paraméterezhető SDR hatékony eszköz, amelyet védelmi célokra is alkalmazhatunk. Jelen cikkünkben az SDR-t mint zavaróeszközt mutattuk be, de a vizsgálataink során felhasznált Ettus B210 USRP alkalmas rádiós vevőnek, amely képes beazonosítani a nem kívánatos rádiós források irányát is.

Felhasznált irodalom

[1] Ványa L., „Pilóta nélküli repülő eszközök elektronikai hadviselési alkalmazása szakértői rendszer támogatásával," *Repüléstudományi Közlemények,* Különszám 1. pp. 213–220. 2001.

[2] European GNSS Agency, *Drones Operations.* White Paper, 2019. Online: https://doi.org/10.2878/52219

[3] Békési B. et al. szerk., *Pilóta nélküli légijárművek: UAV kategorizálás, fedélzeti hardver besorolás.* Szolnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013.

[4] Békési B. et al. szerk., *UAS stratégia: A pilóta nélküli légijármű rendszerek alkalmazásáról.* Szolnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014.

[5] Drone Industry Insights, *The Best Drone Manufacturing Companies in 2022.* 2022. Online: https://droneii.com/best-drone-manufacturing-companies

[6] Wührl T., „Drónkommunikáció: I–Q-moduláció hatékony megvalósítása DSP-vel," *Repüléstudományi Közlemények,* 31. évf. 3. sz. pp. 5–14. 2019. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2019.3.669

[7] Wührl T., „GPS navigációs problémák UAV alkalmazásokban," *Hadmérnök,* Különszám, 2006.

[8] GPS.GOV, *GPS Accuracy.* 2023. Online: https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/

[9] European GNSS Service Centre, *Constellation Information.* 2023. Online: https://www.euspa.europa.eu/about/what-we-do/european-gnss-service-centre

[10] Glonass-IAC, *GLONASS constellation status.* 2023. Online: https://glonass-iac.ru/en/sostavOG/

[11] China Satellite Navigation Office, *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document.* 2017. Online: http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/201712/P020171226741342013031.pdf

[12] T. Busznyák, G. Pálfi, I. Lakatos, „On-Board Diagnostic-based Positioning as an Additional Information Source of Driver Assistant Systems," *Acta Polytechnica Hungarica,* 16. évf. 5. sz. pp. 217–234. 2019. Online: https://doi.org/10.12700/APH.16.5.2019.5.12

[13] Ettus Research, *USRP B210.* 2023. Online: https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/

[14] GNU Radio, *What is GNU Radio?* 2023. Online: https://www.gnuradio.org

[15] B. Békési, T. Wührl, „Redundancy for micro UAVs – control and energy system redundancy," in *Proceedings of the International Conference: Deterioration, Dependability, Diagnostics,* Brno, Czech Republic, University of Defence, Jiří, Stodola; Jiří, Šťastný; David, Vališ szerk., Brno, National Defence University, 2012. pp. 123–130.
[16] Ványa L., „Navigációs berendezések zavarása és megtévesztése," *Repüléstudományi Közlemények,* 27. évf. 2. sz. pp. 7–16. 2015.
[17] Ványa L., „A műholdas helymeghatározó rendszerek elektronikai hadviselési kérdései," *Repüléstudományi Közlemények,* 28. évf. 2. sz. pp. 145–152. 2016.
[18] Károly K., „Globális Műholdas Navigációs Rendszerek alkalmazási lehetőségei katonai és polgári célú flotta-és erőkövetési rendszerekben (1.)," *Honvédségi Szemle,* 146. évf. 1. sz. pp. 83–97. 2018.
[19] Károly K., „Globális Műholdas Navigációs Rendszerek alkalmazási lehetőségei katonai és polgári célú flotta-és erőkövetési rendszerekben (2.)," *Honvédségi Szemle,* 146. évf. 2. sz. pp. 77–88. 2018.
[20] Haig Zs. et al., *Elektronikai hadviselés.* Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014.

SDR as a Potential Jamming Tool

Nowadays, the use and application of drones appear in almost every area of our lives. The intensity of use is increasing in both military and civilian contexts. From a certain point of view, the use of drones can be "useful" for the development of humanity and society, and it can also be "harmful". From a given point of view, a drone classified in the "useful" category and its mission performance must be protected, while the operation and mission performance of a "harmful" category must be limited. In our article, we examine the discontinuity and interference of the satellite navigation system that helps with drone orientation. We use software defined radio (SDR) for our tests.

Keywords: *drone, UAV, SDR, jammer*

Dr. Varga Péter János
egyetemi docens
Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék
varga.peter@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-4964-7249

Péter János Varga, PhD
Associate Professor
Óbuda University
Faculty of Electrical Engineering
Telecommunication department
varga.peter@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-4964-7249

Baross Márk Tamás
egyetemi gyakornok
Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék
baross.mark@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8330-0302

Márk Tamás Baross, BSc
University Intern
Óbuda University
Faculty of Electrical Engineering
Telecommunication department
baross.mark@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-8330-0302

Dr. habil. Wührl Tibor
egyetemi docens
Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Híradástechnika és Infokommunikáció Tanszék
wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-7522-3511

Tibor Wührl, PhD, habil.
Associate Professor
Óbuda University
Faculty of Electrical Engineering
Telecommunication department
wuhrl.tibor@kvk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-7522-3511

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 211–235. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.16

Szilvássy László

H-47M2 „Kindzsal" repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta

A február 24-én kitört orosz–ukrán háborúban számos olyan fegyvert is bevetettek, amelyről korábban alig rendelkeztünk információval, sőt még a létezésük sem biztos, hogy ismert volt. Ilyen eszköz a repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta, a H-47M2 „Kindzsal". Ebben a publikációban ezt az eszközt szeretném bemutatni, kitérve a fejlesztés előzményeire is és magára a hiperszonikus sebesség elérésének rövid történetére, valamint a sajtóban megjelent cikkekre, amelyek szerint az ukrán hadsereg lelőtt egy ilyen eszközt.

***Kulcsszavak**: hiperszonikus, repülőfedélzeti irányítható rakéta, orosz–ukrán háború, H-47M2 „Kindzsal", Patriot légvédelmi rakétakomplexum*

1. Bevezetés

A február 24-én kitört orosz–ukrán háborúban (az orosz narratívában speciális katonai műveletben) számos olyan fegyvert is alkalmaztak a harcoló felek, amelyet a közvélemény, beleértve a szűk szakmait is, még nem ismerhetett. Némelyikről jelent meg valamilyen nagyon rövid hír a nyomtatott és/vagy online sajtóban. Ilyen eszköz a H-47M2 „Kindzsal" repülőfedélzeti irányítható rakéta (oroszul X-47M2 „Кинжал", angolul Kh-47M2 „Kinzhal") [33].

Az orosz–ukrán háborúban alkalmazott repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta címmel már írtam 2022-ben a rakétáról. A publikáció megjelent a [24] konferenciakiadványban, amelyhez viszonylag rövid, 6 oldalas publikációkat lehetett leadni, így gondoltam, kiegészítem az akkor írt anyagot, ráadásul egy május 4-i esemény kapcsán a híradások megint előtérbe helyezték a rakétát, mert a hírek szerint az ukrán hadsereg lelőtt egy Kindzsalt. Számos cikk jelent meg ezzel kapcsolatban, olyan is, amelyik megkérdőjelezi, hogy valóban lelőtték-e azt a rakétát [1], [8], [11], [17], [19], [21], [22].

Az orosz–ukrán háborúval kapcsolatban egyet nagyon gyorsan megtanult a világ. Mindent, amit közzétesznek a médiában a harcoló feleknek fenntartásokkal kell fogadni. Nincs ez másképp a „Kindzsal" rakéta esetében sem. Az Ukrán Defense Express online hírportál bagatellizálni próbálja a rakéta képességeit [3]. Kutatásom során elolvastam számos cikket, publikációt, elemzést, megnéztem jó néhány videót [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], amelyekből nem használtam fel konkrét információt, adatot, de a témáról kialakult véleményem kialakításában szerepet játszottak.

A nagyszámú megjelent cikk, elemzés alapján nagyon nehéz megtalálni az igazsághoz közeli információt. Teszek egy kísérletet.

2. Hiperszonikus fegyverek

Mielőtt a részletesen bemutatom a címben is említett orosz rakétát, tisztázni szeretném a hiperszonikus fegyver fogalmát. Ehhez viszont először a hiperszonikus sebesség fogalmát, tartalmát kell tisztázni.

2.1. Hiperszonikus sebesség

Az aerodinamikában a hiperszonikus sebességen a hangsebesség 5-szörösét meghaladó sebességet értjük. Gyakran az M-szám segítségével szokták jelölni 5 Mach vagy 5 M. A leggyakoribb hiba – elsősorban a nem szakmai sajtóban, hírorgánumokban –, hogy helytelenül használják az M-számot: „*a rakéta sebessége 8 M*". Ez így hibás, mert az M-szám egy viszonyszám és mértékegység nélküli. Helyesen „*a rakéta sebessége nyolcszorosa a hangsebességnek* vagy *nyolcszoros hangsebességgel repült a rakéta*".

Az M-szám – Mach-szám – a rakéta vagy a repülőgép repülési sebességének és a magasság szerinti hangsebességének a hányadosa [15], [35]:

$$M = \frac{v}{a(h)}$$

ahol

- v – repülési sebesség;
- $a(h)$ – hangsebesség *h* magasságon.

Az atmoszférában a magasság szerint változik a levegő hőmérséklete és a hangsebesség is. A változást az ISA[1] táblázatosan adja meg [31]. Aerodinamikában a következő képlet is használatos a magasság szerinti hangsebesség meghatározására:

$$a(h) = 20{,}05\sqrt{T(h)}$$

ahol a *T(h)* a levegő hőmérséklete *h* magasságon, Kelvinben.

Az első eszköz, amely hiperszonikus sebességgel repült az amerikai, kétfokozatú hajtóművel rendelkező Bumper rakéta volt 1949 februárjában. Ezt a rakétát az 1944-ben kifejlesztett amerikai WAC Corporal hordozórakéta 2. fokozatából és a világháború elhíresült V2-es rakétájának 1. fokozatából építették. 2302,25 m/s (8288,12 km/h) sebességet ért el. Ez körülbelül 6,7-szeres hangsebességnek felel meg [12].

Az űrhajózás beindításával a hiperszonikus sebesség szinte mindennapossá vált. A Földről való felbocsátás után az űreszköz a bolygó körül keringési pályára áll, ha sebessége valamivel

[1] International Standard Atmosphere – nemzetközi egyezményes légkör [31], [49].

nagyobb, mint az első kozmikus sebesség (körsebesség, orbitális sebesség; orbital velocity), 7,9 km/s (28 440 km/h).

A második kozmikus sebesség (szökési sebesség; escape velocity) 11,2 km/s (40 320 km/h), a pálya, amelyen az eszköz halad „kinyílik" és parabola lesz. Ilyen lehet például az a pálya, amellyel egy másik bolygót el lehet érni, de ilyen pálya mutat a Földtől a Holdig is. Az Apolló-11-nek legalább ezzel a sebességgel kellett elhagynia a Földet, hogy elérhesse a Holdat.

A harmadik kozmikus sebesség 42,3 km/s (152 280 km/h). Ezzel a sebességgel kellene a földfelszínről elindítani egy testet, hogy elhagyhassa a Naprendszert, és soha ne térjen vissza [16].

2.2. Hiperszonikus fegyverek

A hiperszonikus fegyverek tervezése nem napjainkban kezdődött, az 1950-es, 1960-as években folytattak kísérleteket, hogy minél nagyobb sebességet érjenek el. Erre jó példa az 1950-es években az Amerikai Légierő fejlesztése az XB-70 Valkyrie. Igaz, a tesztek során csak a hangsebesség háromszorosáig jutottak el. 1969-ben a programot leállították, mert jelentőségét veszítette az interkontinentális ballisztikus rakéták megjelenésével és elterjedésével [7], [36]. A Szovjetunióban az XB-70 repülőgép ellen tervezték meg a MiG-25 elfogó-vadászrepülőgépet, amely szintén háromszoros hangsebességet ért el. Ebben az időszakban repülőgéppel nem tudták elérni a hiperszonikus sebességet [36].

Hiperszonikus rakéták tervezésével több ország is foglalkozott, illetve foglalkozik. Az egyik az elsők között rendszerbe állt, repülőfedélzetéről indítható ilyen eszköz az AGM-183 ARRW (Air-Launched Rapid Response Weapon). A hordozó repülőgép, amelyről indítható a B-52-es. Maximális repülési sebessége 6,9–8-szoros hangsebesség lehet [37]. Az úgynevezett HGV – Hypersonic Glide Vehicle – hiperszonikus siklójárművel több ország folytat kísérletet. A teljesség igénye nélkül néhány példa:

- Hwansong-8 (Kína) [38];
- DF-ZF (Kína) [39];
- Avangard (Oroszország) [40];
- Hypersonic Technology Demonstrator Vehicle (DARPA – USA) [41];
- Hypersonic Air-breathing Weapon Concept (DARPA – USA) [20], [42].

Ezek csak azok az eszközök, amelyekről nyilvános információ megjelent. A közeljövőben biztosan hallhatunk még számos sikeres kísérletről és várhatóan rendszerbe állított eszközökről is [34].

3. H-47M2 Kindzsal

A 2022 februárjában kezdődődött orosz–ukrán háborúban előkerült a H-47M2-es típusú rakéta, amelyet a közvélemény Kindzsal néven ismerhetett meg [2], [23].

A rakéta rendszerbe állítása 2017 decemberében volt, amit Putyin 2018. március 1-jén jelentett be, 5 másik stratégiai fegyverrel együtt. A *Magyar Nemzet Putyin-show a választóknak és az egész világnak* címmel írt a bejelentésről [13].

Az eszköz nukleáris töltettel is felszerelhető, hiperszonikus levegő–felszín aeroballisztikus irányítható rakéta. A rakéta eredeti orosz jelölése 9-Sz-7660, a teljes rendszernek pedig 9-A-7660. A leggyakrabban viszont a címben is szereplő jelöléssel emlegetik.

Indítási távolsága hordozóeszköz-függő, MiG-31K-ról (Flash Dance) indítva több mint 2000 km, Tu-22M3-ról (Backfire) indítva elérheti a 3000 km-t. 12-szeres hangsebességgel képes repülni (12 M), ami 4080 m/s (14 688 km/h) sebességnek felel meg, 20 000 m repülési magasságon. Ezen a magasságon a hang terjedési sebessége az ISA szerint 296,4 m/s [18], [33], [51].

1. ábra
MiG-31K a Kindzsal rakétával [62]

A rakéta elsődleges feladata NATO-hadihajók és rakétavédelmi rendszerek megsemmisítése. Az oroszok állítása szerint az ismert nyugati lég- és rakétavédelmi rendszerek, például a Patriot,[2] Aegis BMD,[3] RIM-174 Standard ERAM vagy RIM-174 Standard Missile 6 (SM-6),[4] sőt az orosz Sz-400[5] bizonyos modifikációi is tehetetlenek ellene. Ezt viszonylag könnyű megerősíteni, mert az ismert adatok alapján a rakéta repülési sebessége 4000 m/s körül van. Az oroszok Sz-400 légvédelmi rakétarendszerében található légvédelmi rakéták változattól függően 900–2000 m/s sebesség elérésére képesek. Az adatok alapján a leküzdeni kívánt cél maximális sebessége 2800–4800 m/s lehet. Ez azt jelenti, hogy a legfejlettebb változata képes lehet leküzdeni a „Kindzsal" rakétát. Az Egyesült Államok MIM-104 Patriot légvédelmi rakétarendszer rakétája változattól függően 800–1400 m/s-os sebességgel képes repülni. A cél maximális sebessége 2200 m/s lehet. Ez viszont azt jelenti, hogy az eszköz már tehetetlen a „Kindzsal"-lal szemben. Az Aegis BMD rendszer rakétája 1200 m/s sebességet képes

[2] MIM-104 Patriot – Surface-to-Air Missile – SAM. Légvédelmi rakétarendszer. Több modifikációban gyártották, gyártják, és számos ország rendszeresítette. Legutóbb Ukrajna kapott belőle [45].

[3] Aegis Ballistic Missile Defense System (Aegis BMD or ABMD). Az Egyesült Államok védelmi iparában tevékenykedő cégek és egyetemek közös fejlesztésű légvédelmi eszköze. Elsősorban hajófedélzetre telepített változatban jelent meg, de fejlesztettek belőle szárazföldi telepítésűt is. A 2000-es évek elején állt rendszerbe [43].

[4] RIM-174 Standard ERAM vagy RIM-174 Standard Missile 6 (SM-6). Az ABMD továbbfejlesztett változata, amelyet a Raytheon gyárt az Egyesült Államok haditengerészete számára [46].

[5] Sz-400 Triumf – Surface-to-Air Missile – SAM. Orosz légvédelmi rakétarendszer. Az Sz-300 továbbfejlesztett változata, 2007-ben áll rendszerbe. Több modifikációban létezik [44].

elérni, valamint a RIM-174 SM-6 maximális repülési sebessége is 1200 m/s. Vagyis mindkét rakéta repülési sebessége kisebb, mint a MIM-104 rakéta sebessége. Tehát ezek a rakéták sem képesek a Kindzsal leküzdésére [41], [43], [44], [45], [68].

3.1. A létrehozás története

A rakétarendszer kifejlesztése az 1990-es évek végén, a 2000-es évek elején kezdődött. Az volt az elgondolás, hogy aeroballisztikus rakétát alkalmazzanak a MiG-31-es repülőgépről, ahol a repülőgép nemcsak hordozó és indító eszköz, hanem tulajdonképpen a rakéta gyorsító fokozata is egyben. Ez azért lehetséges, mert a MiG-31 egy nagymagasságú elfogó-vadászrepülőgép. Nagy magasságon az utazósebessége 700–780 m/s (2500–2800 km/h). A 9-Sz-7660 rakéta a 9M723 Iszkander rakéta repülőfedélzetre átdolgozott változata. A hordozó repülőgépen is változtatásokat hajtottak végre, így kapta meg a MiG-31K modifikációs jelölést, és a MiG-31BSzM és MiG-31BM változatokból építették át [18], [33], [47], [50], [51], [52], [56].

A „Kindzsal" rakétakomplexum képes megsemmisíteni vezetési pontokat, beleértve a föld alattiakat is, repülőbázisokat, lég- és rakétavédelmi rendszereket, valamint az ellenség bármilyen nem mozgó objektumait. A rakétával megsemmisíthetők még korlátozottan mozgó objektumok is, például csapatösszevonások és hadihajók, beleértve cirkálókat, fregattokat, rombolókat és anyahajókat.

Hordozó repülőgépek lehetnek: MiG-31K – 1 rakétával; Tu-22M3M – 4 rakétával; Tu-160 – 4 rakétával, 2–2 egy-egy forgódobban; Szu-57 – tervezetten, még nincs integrálva.

A rakétakomplexumba tartozó ballisztikus rakéta szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművel rendelkezik. A rakéta irányítási rendszere magában foglal egy inerciális navigációt (INS), műholdas (Glonass) korrekcióval. A rakéta repülése során, rádiócsatornán célkoordináta-pontosításokat kaphat, így lehet megvalósítani a mozgó célok, például hadihajók megsemmisítését. Ezek az irányítási módok bármilyen időjárási körülmények között alkalmazhatók [18], [33], [51].

3.2. Harcászattechnikai adatok

- Maximális célmegsemmisítési távolság 2000–3000 km. Egyes források szerint a MiG-31K esetében 2000 km fölött, Tu-22M3M esetében 3000 km;
- maximális sebesség: a hang 10–12-szerese (10–12 M);
- valószínű körkörös eltérés:[6] 1 m;
- harcirész tömege: 500 kg;
- harcirész típusa: hagyományos robbanóanyag vagy termonukleáris;
- irányítás: INS, Glonass célkoordináta-pontosítással;
- hajtómű: SzHRH (szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű).

A harcirészről a következőket találtam. Tömege 500 kg, ebből 150 kg a robbanóanyag, amely egyes források szerint oktogén. Az oktogén a trotilhoz képest nagyobb teljesítményű robbanóanyag. Az egyik forrásban 240 kg trotil egyenértékűnek írják le [5]. Az én ismeretem

[6] CEP – Circular Error Probable – круговое вероятное отклонение (КВО) [48].

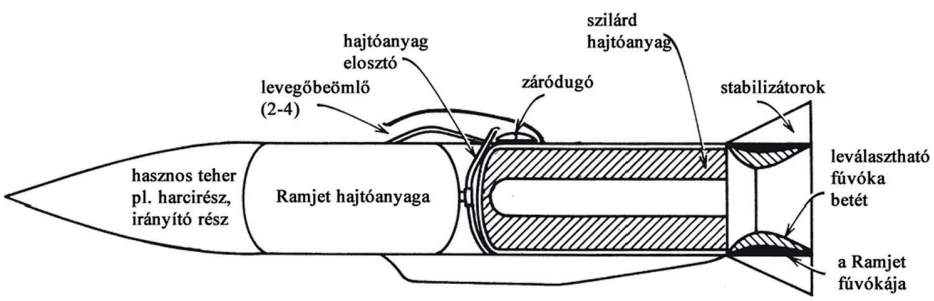
szerint a trotil ekvivalens számításához szükséges mindkét robbanóanyag fajlagos energiája Q_r. A trotil fajlagos energiája Q_{rt} = 4230 kJ/kg, az oktogéné Q_{ro} = 5530 kJ/kg. A következő kifejezéssel lehet kiszámítani a trotil egyenértékét:

$$m_{et} = m_{eo} \frac{Q_{ro}}{Q_{rt}}$$

Ha kiszámítjuk a 150 kg oktogén trotil ekvivalensét, akkor 196 kg jön ki. Ez elég messze áll a forrás által megadott 240 kg-tól. A különbség adódhat valamilyen adalékanyagtól, amely megnöveli a robbanóanyag energiáját. Ez lehet például alumínium reszelék vagy por. Ezt gyakran alkalmazzák a robbanóanyagok adalékaként. Adódhat még szándékos dezinformációból is.

Egyes források azt feltételezik, hogy a „Kindzsal" rakéta kétfokozatú hajtóművel rendelkezik, ahol az első fokozat szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű, a második pedig egy scramjet. Ezt nagyon könnyen meg lehet cáfolni.

Ramjettel, vagy ahogy magyarul szoktuk említeni torlósugár-hajtóművel felszerelt rakéták különös ismertetője, hogy rendelkeznek valamilyen levegőbeömlő csatornával vagy csatornákkal. A csatornák száma 1, 2 vagy 4. A rakétahajtóművek felépítésével a [25], [26], [27], [28], [29] publikációimban már foglalkoztam, így terjedelmi okok miatt itt nem kívánom részletezni. A 2. ábrán egy ramjet[7] vagy egy scramjet[8] hajtóművel szerelt rakéta sematikus rajza látható. Így a rajz alapján a két hajtóműtípus között nincsen különbség.



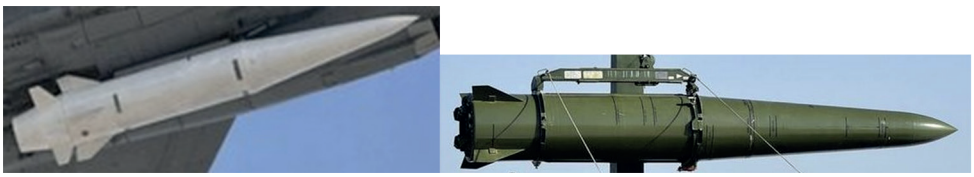
2. ábra
Ramjet, scramjet felépítése (a szerző [9] alapján)

Az első fokozat általában szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű, a második fokozat lehet folyékony vagy szilárd hajtóanyagú. A 3M8 rakéta – a 2K11 Krug légvédelmi komplexum rakétájának – első fokozata szilárd hajtóanyagú, míg a második folyékony, vagy a 3M9M, a 2K12 Kub légvédelmi komplexum rakétája esetében mindkét fokozat szilárd. Ennél a rakétánál a második fokozat hajtóanyaga oxigénhiányos, vagyis nem tartalmazza az égéshez szükséges összes oxigént, amit a légkörből pótol. A harmadik példának a világ egyik legkorszerűbb légiharc-rakétáját hozom fel, amely a Meteor. Ebben a rakétában szintén mindkét fokozat szilárd hajtóanyagú, de itt a második fokozat szabályozható [25], [26], [27], [28], [29], [30].

[7] Ramjet – torlósugár-hajtómű.
[8] Scramjet – Supersonic combustion ramjet – szuperszonikus égési sebességű torlósugár-hajtómű.

A scramjet abban különbözik a ramjettől, hogy a hajtóműben az égési folyamat szuperszonikus sebességgel megy végbe, míg a ramjet esetében szubszonikussal [9].

A fent leírtak alapján, ha a Kindzsal rakéta második fokozat scramjet lenne, akkor valamilyen levegőbeömlőnek, levegőbeömlőknek kellene rajta lenni. Ha megvizsgáljuk a 3. ábrát, tisztán látható, hogy a Kindzsal rakétán nem találhatók levegőbeömlők, így az nem rendelkezhet scramjet hajtóművel. Ezt erősíti meg a *Звезда* cikke is [51]. Később erre még visszatérek.



3. ábra
A „Kindzsal" rakéta (bal oldalon) és az „Iszkander" rakéta (jobb oldalon) [51]

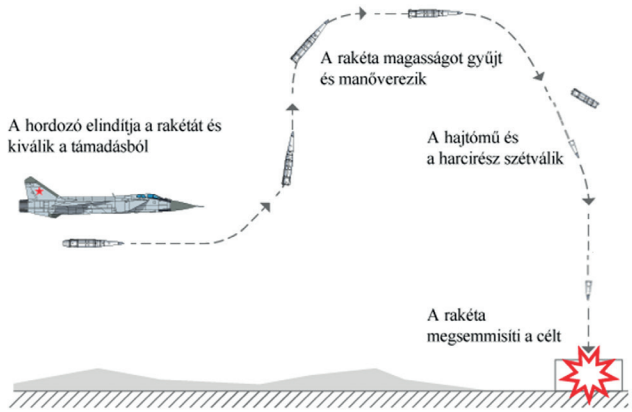
Akkor hogyan lehet magyarázni a rendkívül nagy repülési sebességet? Két dologgal. Az egyik a megváltoztatott fúvóka rész az eredeti Iszkander rakétához képest (lásd a 3. ábrát), illetve a MiG-31K repülőgéppel mint hordozóval, amely egyben betölti az „első, gyorsító" fokozat szerepét is. A MiG-31 repülőgép maximális sebessége 940 m/s (3400 km/h), utazósebessége 700–780 m/s (2500–2800 km/h). Ehhez hozzátesszük az Iszkander repülési sebességét, amelyet a források 2100 m/s-ban adnak meg. Ez együtt már 2800 m/s (10 080 km/h), ami 20 000 m magasságon megfelel 9,46 M-nek. Ehhez még hozzá kell számolni a fúvóka változtatásából adódó sebességnyereséget és azt, hogy a rakéta 20 000 m felett repül, ahol jelentősen kisebb a légellenállás. Ezeken a magasságokon könnyen elérheti a megadott 10–12-szeres hangsebességet [14], [51].

Az orosz források azt állítják, hogy a rakéta szinte felderíthetetlen a jelenleg alkalmazott radarokkal. A fent említett sebesség miatt, a Kindzsal esetében azt feltételezik a szakértők – köztük én is –, hogy a rakéta körül áramló gázok valószínűleg ionizálódnak, ami úgynevezett plazmalopakodást tesz lehetővé. Ez azt jelenti, hogy a rakétának nagymértékben lecsökken a radarkeresztmetszete – hatásos visszaverő felülete –, mert az ionizálódott réteg elnyeli a rádióhullámokat. Ennek eredményeképpen a lég- és rakétavédelmi eszközök nem, vagy csak nagyon kis távolságról képesek felderíteni, amikor már nem marad idő semmilyen ellentevékenységre.

A [64] internetes oldalon található a Kindzsal működését bemutató animáció, amely szerint a rakéta röppályája több szakaszra bontható:

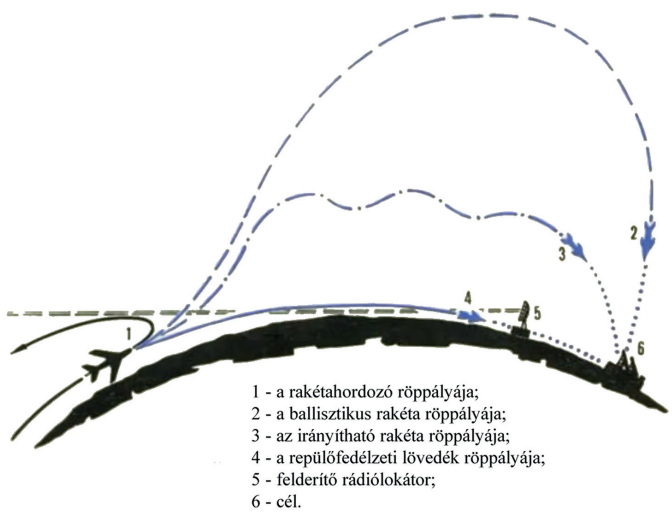
- 1. szakasz: emelkedés egészen 25–30 km magasságig;
- 2. szakasz: a harcirész leválása;
- 3. szakasz: a maximális sebesség elérése (14 000 km/h). A manőverezés során akár 25-szörös túlterheléses fordulókat is végezhet a harcirész. Ezzel magyarázzák, hogy még a mai korszerű légvédelmi eszközökkel sem lehet elfogni az eszközt;
- 4. szakasz: a cél megsemmisítése.

A 4. ábrán a „Kindzsal" rakétarendszer működése látható.



4. ábra
A „Kindzsal" rakétarendszer működési elve (a szerző [66] alapján)

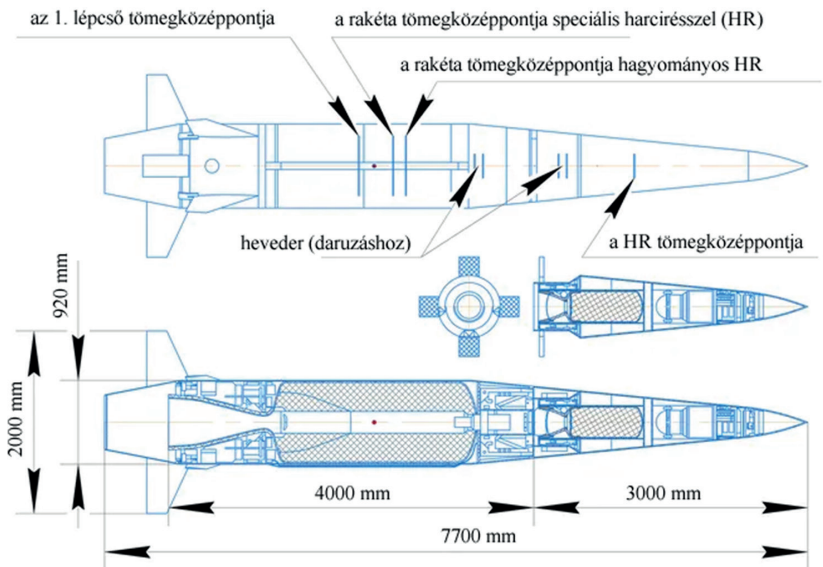
A 4. ábra alapvetően összhangban van az 5. ábrán bemutatott, különböző elven működő, levegő–felszín rakéták röppályájával. Az ábrából jól látható, hogy a ballisztikus rakéták (2) felemelkednek – elhagyják a troposzférát[9] és a sztratoszférából,[10] esetenként a mezoszférából,[11] de akár a termoszférából,[12] 100–120 km-es magasságból ballisztikai pályán támadják a célt.



5. ábra
A levegő–felszín rakéta elvi indítási pályája [65]

[9] Troposzféra: 0 m-től 20 km-ig.
[10] Sztratoszféra: 20 km-től 51 km-ig.
[11] Mezoszféra: 51 km-től 86 km-ig.
[12] Termoszféra: 86 km-től 690 km-ig.

A nyugati sajtóban „anyahajógyilkos"-ként emlegetett „Kindzsal" rakéta képes egymaga elsüllyeszteni egy 100 000 t tömegű repülőgép-hordozót. Az orosz források szerint a hordozóeszközök száma nagyon korlátozott, mert a Tu-22M3M változatból eddig csak 2 db készült el, és az átépített MiG-31K változatról, amely a MiG-31BM vagy a MiG-31BSzM átépített, kimondottan a „Kindzsal" indítására képes változat, 2018-ban csak 10 db-ról tesznek említést.



6. ábra
A „Kindzsal" rakéta feltételezett felépítése [67]

A [64] internetes oldalon található, a „Kindzsal" működését bemutató animációval összhangban van a [67] irodalomban található ábra (lásd 6. ábra). Az ábrából jól kivehető, hogy a rakéta egy leváló hajtóműfokozattal rendelkezik, amelynek leválása után kinyílnak a kormányfelületek és indul a második rakétahajtómű-fokozat. Ez az ábra és a belőle kiolvasható működési változat erősen úgy tűnik, hogy eddig a legjobb leírás a rakéta működésére, és összhangban van a ballisztikus rakétákra jellemző működéssel.

А Евгений Даманцев, Военный аналитик (Jevgenyij Damancev, katonai elemző) a Voennoje gyeloban *(Военное дело)* megjelent cikke [68] a legérdekesebb a fellelt számos cikk és elemzés közül. A cikk utolsó előtti bekezdésében cáfolja az ukrán sajtóban és onnan rengeteg más nemzetközi sajtóban is bemutatott képeken látható rakétadarabok kilétét. A következőt írja: „Ни о каком «Кинжале» в данном случае не может быть и речи, поскольку головная часть нашей гиперзвуковой аэробаллистической ракеты Х-47М2 располагает куда более тонкостенным и лёгким жаропрочным обтекателем активной радиолокационной головки самонаведения сантиметрового диапазона." Semmilyen formában nem eshet szó a „Kindzsalról", mert a H-47M2 hiperszonikus, aeroballisztikai rakéta orr-része egy vékonyfalú, törékeny orrkúppal rendelkezik, amely a centiméteres tartományú rádió-célkoordinátort takarja (a szerző fordítása). Erre még később visszatérek. Itt kezd el rendkívül érdekessé válni

a kutatásom. Eddig arról sehol nem esett szó, hogy a „Kindzsal" rakéta orrában egy rádiócélkoordinátor helyezkedik el. Ez rengeteg kérdést felvet. Nézzük, mi az, ami bizonyíthatja ezt.

7. ábra
Az éles „Kindzsal" [62]

Az 1. ábrán egy teljesen fehérre festett rakéta látható. Nagy a valószínűsége, hogy ez egy súlymakett változat. Ezzel repültek a MiG-31K repülőgépek a győzelem napi díszszemlén. A 7. ábrán az éles, világosszürke festésű rakéta látható. A 8. ábrán szintén egy éles rakéta látható a repülőgép felkészítése során. Jól látszik, hogy a rakéta orrkúpja más színű, ami arra utal, hogy ez egy festetlen anyagból van, amelynek ilyen a színe. Maga az anyag rádióhullámokat áteresztő, ami a szovjet/orosz technikák esetében egy vékony falú kerámia szokott lenni. Ezt bizonyítja az is, hogy a 9. ábrán jól látszanak a feliratok a rakétán. A kiemelésen az „Осторожно" – „óvatosan" szó is kiolvasható. A másik három felirat „Бандаж" – heveder és a „Ц. М." – „tömegközéppont" feliratok arra utalnak, hogy ez a kúpos rész önállóan is daruzható, és hogy hol található a tömegközéppontja. Ez bizonyítja azt, hogy ez a rész a rakéta harcirésze. A 6. ábrán is látható ez a tömegközéppont.

8. ábra
Az éles rakéta a repülőgép felkészítése során [2]

9. ábra
Az éles rakéta és az orr-része kiemelve [59]

Ezek alapján valószínűsíthető, hogy az orrkúp alatt valamilyen rádióberendezés található, amely, ha hinni lehet Damancev írásának [68], akkor egy rádió-célkoordinátor. Ha nem az, akkor lehet például a GLONASS vételére alkalmas berendezés, amelynek szintén „nem árnyékoló” burkolatra van szüksége.

4. A Kindzsal az ukrajnai hadszíntéren

Egyes orosz források szerint a rakétát bevetették március 19-én az Ukrajna elleni invázióban is, és egy föld alatti fegyverraktárat semmisítettek meg vele Deljatyinban, valamint egy üzemanyagraktárat Konsztantyinovszkban [51].

Igor Konasenkov, a Minoobroni Rosszija (Минобороны России) képviselője felhívta a figyelmet arra a tényre, hogy a rakétát több mint 1000 km-es távolságból indították, viszont a sebessége miatt a repülési ideje kevesebb mint 10 perc volt [10], [18], [23].

Számoljunk egy kicsit! A fentebb leírtak alapján a rakéta 10–12-szeres hangsebességgel képes repülni 20 000–30 000 m-en, ahol a hang terjedési sebessége 296,4–301,7 m/s [31]. Vagyis a sebessége 2964–3620 m/s között lehet. A csökkenő magasság miatt a hangsebesség és a légellenállás is növekszik. 10 000 m magasságban körülbelül 5-szörös hangsebességgel (körülbelül 1500 m/s) repülhet a rakéta. Ha veszünk egy átlagot, amely nagyjából 2560 m/s [(3620 m/s + 1500 m/s)/2 = 2560 m/s], ezzel a sebességgel 1000 km megtétele csupán 390,6 s, ami alig több, mint 6,5 perc. A MiG-31K esetében a maximális indítási távolság több mint 2000 km. Pontos adat nem ismert. Ez a 2000 km kb. 13 perc repülési időt igényel.

4.1. Leküzdhető-e a Kindzsal a mai rendszerben lévő légvédelmi eszközökkel?

Ha hinni lehet az információknak, amit a 3. fejezetben – a rakéta bemutatásakor – leírtam, a rövid válaszom nem. Ha elemezzük azokat az anyagokat, amelyek a híradásokban megjelentek, akkor lehetséges. Ha keresgetünk egy kicsit, rengeteg egymásnak ellentmondó információval találkozhatunk. Ez részben az oroszok tudatos titkolózásának is köszönhető, illetve a szándékos dezinformációnak mindkét fél részéről.

A híradásokból olvashattunk arról, hogy az ukrán hadsereg lelőtt több „Kindzsal" rakétát május 4-én. Az esetről nagyon ellentmondó információk láttak napvilágot. Például [4] ukrán nyelvű anyagban bemutatott videóban és a cikkben [6] található képeken biztosan nem a „Kindzsal" maradványai láthatók. Ezt cáfolja Jevgenyij Damancev katonai elemző a [68] írásában is. A *Forces* cikke [8] is utalást tesz rá, hogy az említett videóban bemutatott eszköz maradványa inkább egy BETAB-500 bomba maradványaira utal (lásd 11. ábra). A BETAB oroszul: БетАБ – бетонобойная авиабомба – betonátütő légibomba. Erre utal a képen (lásd 10. ábra) és a videóban is látható megvastagított fejrész is. A képen látható eszköz kúpossága is más, mint a „Kindzsal" rakétáé. Ráadásul a videóban magát szakértőnek nevező úr felvesz valamit az alkatrészek közül, amelyen a 7660 számot próbálja megmutatni, amivel bizonyítani szeretné, hogy a rakéta valóban a „Kindzsal" volt. A „Kindzsal" típus jelzése 9-Sz-7660. A szám valóban utalhatna rá, de az alkatrész származhat egy becsapódott és felrobbant rakétából is. Nincs rá semmi bizonyíték, főleg annak tükrében, hogy a BETAB jellegű orrkúppal hozzák össze. Eléggé dezinformációs manővernek hat. Ezt támasztja alá az RBC.ru cikke [55] is, ahol azt is leírják, hogy egy „Kindzsal" rakétával megsemmisítettek egy Patriot légvédelmi üteget, amit május 9-én a Pentagon is megerősített [63]. Ebben a cikkben azt is leírják, hogy amit az ukrán sajtóorgánumok a „Kindzsal" rakéta részeiként említenek, azokról az állapítható meg, hogy egy normális módon elműködött, vagyis a célba becsapódott rakéta alkatrészei lehetnek és nem egy lelőtt rakéta darabjai. Ugyanez a vélemény jelenik meg a Lenta.ru cikkében is [59]. Azt is megemlítik, hogy a „Kindzsal" és az „Iszkander" rakéta gyártója ugyanaz a cég, és nagyon sok alkatrésze megegyezik a két eszköznek, így az alkatrészek számozásából csak a gyártó tudja nagy bizonyossággal megállapítani, hogy a két említett rakéta közül melyikbe volt beépítve.

10. ábra
Az állítólagos „Kindzsal"-maradványok [4]

11. ábra
БЕТАБ-500 [54]

A témában talán az egyik legjobb cikk a CBC cikke [6], amelyben Sidharth Kaushal, a londoni Royal United Services Institute védelmi és biztonsági kutatója igyekszik magyarázatot találni a „Kindzsal" rakétával kapcsolatos információkra. Azt mondja, hogy a „Kindzsal" esetében az oroszok részéről van egy kis tudatos félrevezetés. „Hiperszonikus sebességgel repül, de tipikusan, amikor ezt a kifejezést használjuk, valami olyasmire gondolnánk, ami hiperszonikus sebességgel nagyon manőverezhető" – nyilatkozza a CBC-nek [6]. Tom Karako, a washingtoni Stratégiai és Nemzetközi Tanulmányok Központja (CSIS) Rakétavédelmi Projektjének vezető munkatársa és igazgatója egyetért azzal, hogy Oroszország állításai a „Kindzsal" hiperszonikus manőverező képességéről túlzók lehetnek a tipikusan hiperszonikusnak nevezett fegyverekhez, például a cirkálórakétákhoz vagy a gyorsító siklórakétákhoz képest. Olvasható a cikkben.

Szintén itt olvashatunk először arról, hogy „csak" 10-szeres hangsebességet képes elérni a rakéta, azt is 350 km hatótávolságon belül. A szakértők a cikkben kifejtik, hogy a „Kindzsal" rakéta repülése során 30–40 km magasságig is felemelkedik, majd a röppálya utolsó szakaszán egy, a függőlegeshez közelítő pályán támadja a célt. Ezen a szakaszon bizonyos körülmények között lehetséges a rakéta elfogása és leküzdése, ugyanis ekkor a sebessége már nem akkora, mint ahogy azt az orosz fél állítja. Ha visszanézzük a 3. fejezetben leírtakat: a Patriot rakétája maximálisan körülbelül 2200 m/s-os sebességgel repülő célt képes leküzdeni, ami 10 000 és 28 000 m között közelítve megfelel 7,3-szeres hangsebességnek. A fellelt cikkek alapján a „Kindzsal" sebessége ezen az utolsó szakaszon már ez alatt a sebesség alatt van, tehát ha a Patriot üteg nincs túl messze, akkor képes lehet a kis méretű effektív visszaverő felülettel rendelkező „Kindzsal"-t elfogni és rakétát indítani rá [6], [32], [53].

4.2. Leküzdhető-e a „Kindzsal" a mai rendszerben lévő légvédelmi eszközökkel? – lapszemle

Keresgettem, és igyekeztem a lehető legtöbb, az alcímben szereplő kérdéssel kapcsolatos cikket felkeresni, és bemutatni azokat a véleményeket, amelyek a témában fellelhetők.

Az egyik félrevezető információ a Redstar cikke [57], amely optikai célkoordinátort említ. Optikai célkoordinátor esetében tisztán látható áttetsző például üveg, félgömb alakú áramvonalazót kellene látni a rakéta orrán. Ilyen nem látható a rakétáról készült képeken.

Можно ли сбить гиперзвуковой "Кинжал"? (Le lehet-e lőnni a hiperszonikus „Kindzsalt"?) – teszi fel az alcímben is szereplő kérdést a Русское оружие (orosz fegyverek – *rg.ru*) internetes oldal [58]. A cikk legutolsó bekezdésében a következőt írják: „Так что »Кинжал« найдет и точно поразит самую защищенную цель, а вот удар ракеты Х-47М2 этого комплекса действительно неотразим. Обнаружить и сбить ее существующими средствами ПВО и ПРО практически невозможно." Azt, hogy a „Kindzsal" képes megtalálni és megsemmisíteni a legvédettebb célt, a H-47M2 rakéta csapása kivédhetetlen. Felderíteni és lelőni azt a létező lég- és rakétavédelmi rendszerekkel gyakorlatilag lehetetlen (a szerző fordítása).

Az Apostrophe ukrán, interneten fellelhető cikke [60] már a címével is cáfol: Нет никакой "гиперзвуковой" ракеты: эксперт назвал слабые стороны "Кинжала" (Nincs semmiféle hiperszonikus rakéta: a szakértő megmutatja a gyenge oldalait a „Kindzsalnak"). A szakértő, akire hivatkoznak: „…*политический обозреватель группы »Информационное сопротивление« Александр Коваленко*" – az Információs Ellenállás csoport politikai vezetője, Alexander Kovaljenko. Vagyis az én olvasatomban nem mérnök és nem rakétaszakértő, de még nem is fegyverszakértő. A cikkben megjelenő véleménye is ennek megfelelő. A régi szovjet/orosz technikát szapulja, és a „Kindzsal" rakétáról is az állítja, hogy ennek a régi technikának a hozadéka.

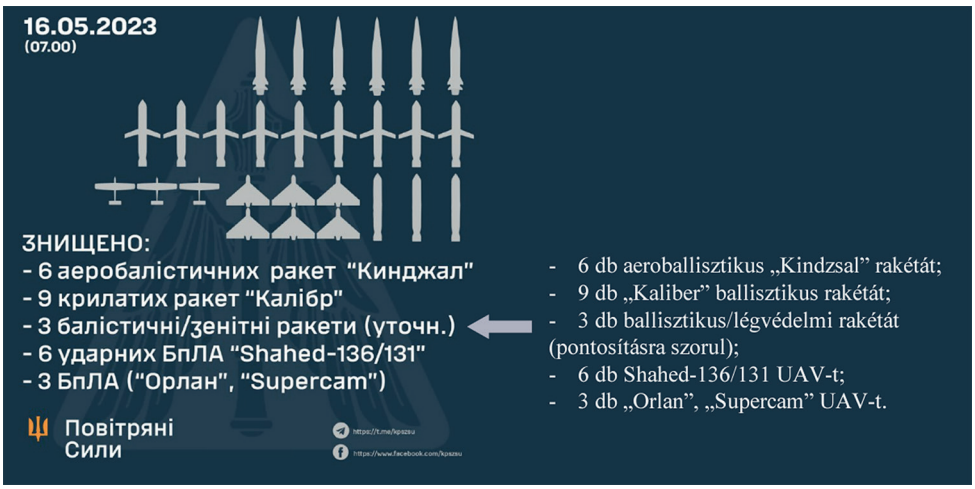
A *The Jerusalem Post* a következőket írja: „Ukraine's downing of a Russian Kh-47 Kinzhal missile with an American-made Patriot battery on Thursday indicates that the weapon may be more hype than hypersonic." Az, hogy Ukrajna csütörtökön lelőtt egy orosz H-47 „Kindzsal" rakétát egy amerikai gyártmányú Patriot üteggel, azt jelzi, hogy a fegyver inkább hype (túl van tolva), mint hiperszonikus [61].

Az Apostrophe ukrán cikke „Украинское ПВО умножило на ноль российский «аналогов нет»: что известно о ракете «Кинжал»" [62] és az orosz *Газета.ru* cikke [63] szöges ellentéte egymásnak. Az Apostrophe állítása szerint a május 16-i orosz támadás során lelőttek a 12. ábrán felsorolt eszközöket.

Ennek a cikknek szöges ellentéte az orosz Газета cikke: Сто миллионов на ветер. Как Patriot пытался сбить российский «Кинжал» – Száz milliók a szélben. Ahogy a „Patriot" próbálkozott lelőni az orosz „Kindzsalt". A cikkben az orosz forrás azt írja, hogy 16 db „Patriot" rakétát indítottak és ez mind mellé ment. Az értéküket a cikk 96 millió USD-ra teszi.

A legkorrektebb írásnak a már többször emlegetett Jevgenyij Damancev katonai elemzőét tartom [68]. Ennek több oka van: oroszországi bejegyzésű domainről van szó. Ennek ellenére nem csinál problémát abból, hogy leírja azt, amit a Kreml propagandistái folyamatosan cáfolnak. Az ő olvasatában igenis lelőhető a „Kindzsal" egy Patriot légvédelmi rendszerrel. Igaz, azt is hozzáteszi, nem mindegy, melyik modifikációval, és azt is leírja, hogy nem ismert, Ukrajna melyiket kapta. A cikkében az a szófordulat szerepel, amelyet csak az oroszok használnak,

ha a saját eszközükről írnak: „…*нашего «Кинжала»* …” „a mi Kindzsalunk”. Ebből is látható, hogy a cikk szerzője orosz és oroszországi oldalról van szó.



12. ábra
A 2023. május 16-ai támadás során – az ukrán forrás szerint – megsemmisített eszközök (a szerző [62] alapján)

Nézzük az elemzését. Már az elején leírja, hogy a Patriot esetében több modifikációról lehet szó. A korszerűbb PAC-3MSE rendszernek a MIM-104F rakétával igen komoly esélye van leküzdeni a H-47M2 rakétát. A MIM-104F légvédelmi rakéta aktív milliméteres, Ka-sávú rádió-célkoordinátorral rendelkezik, amelynek nagyobb célbefogási pontossága van, mint a korábbi MIM-104E GEM-T típusú rakéta félaktív rádió-célkoordinátorának. Ezenkívül a MIM-104F rakéta többszintű gázdinamikai rendszerrel van felszerelve, ami lehetővé teszi, hogy 0,02 s alatt keresztirányú (oldalirányú) manővereket hajtson végre. Ez nagyságrendileg 60–65-szeres túlterhelésnek felel meg. A MIM-104F rakéta harcászattechnikai adatai alapján alkalmas nagy manőverező képességű ballisztikai célok elfogására 30–40%-os valószínűséggel, ha a cél effektív visszaverő felülete legalább 0,01–0,02 m^2. Van egy lényeges paraméter, amely korlátozza a Patriot PAC-2/3 célelfogó képességét, az pedig a cél sebessége, amely 2200 m/s. A megadott harcászattechnikai adatok alapján a H-47M2 rakéta sebessége 4080 m/s. Ez 1,85-ször nagyobb, mint a Patriot maximálisan megengedett célsebessége. Viszont a rakéta nagy magasságról repül a Föld felszíne felé, és ahogy belép 20 000 m magasan a troposzférába, a légellenállás jelentősen megnő. Ezen a magasságon a „Kindzsal” körülbelül 7–8-szoros hangsebességgel repül. A magasság csökkenésével 7000–10 000 m-en már csak 4–5-szörös hangsebességre csökken a rakéta sebessége. Ez a sebesség már a Patriot sebességének határa alatt van, így lehetőséget ad az aeroballisztikai rakéta elfogására.

Csak két probléma van, írja Damancev. Az egyik, hogy az ukrán és a nyugati sajtóban publikált képek alapján a Patriot ütegekben M901 indítóállványok láthatók, amelyek a MIM-104E GEM-T légvédelmi rakéták indítására szolgálnak. (Erre még később visszatérek.) Ezek a rakéták modernizált félaktív rádió-célkoordinátorral és rádiógyújtóval és ballisztikus rakéták ellen jobb elfogást biztosító algoritmussal rendelkeznek. Ugyanakkor ennek a rakétának a maximális túlterhelése 30-szoros lehet, ami nem teszi lehetővé, hogy a 25–30-szoros

túlterheléssel manőverező „Kindzsalt" elfogja. Másodsorban, az ukrán sajtóban bemutatott „Kindzsal" orrkúpjának titulált darabon nagyjából 70–80 mm-es lyuk található. Ha jól megfigyeljük, akkor masszív öntöttvas ötvözet látható ferrit-perlit szerkezettel a törési felületeken, ami alapvetően jobban illik egy szabadeséső légi bombához. Semmilyen formában nem eshet szó a „Kindzsalról", mert a H-47M2 hiperszonikus, aeroballisztikai rakéta orr-része egy vékony falú, törékeny orrkúppal rendelkezik, amely a centiméteres tartományú rádiócélkoordinátort takarja.

„Ugyanakkor rendkívül vakmerő lenne, ha nem lennénk résen, és alábecsülnénk a továbbfejlesztett Patriot PAC-2GEM-T és PAC-3MSE légvédelmi rendszerek potenciálját, mivel a MIM-104E és MIM-104F rakéták képesek a hadműveleti-harcászati ballisztikus és cirkálórakétáink számos típusának elfogására. Ez azt jelenti, hogy mind cirkáló- és aeroballisztikus rakétákkal, mind alacsony magasságú kamikaze drónok tucatjaival végrehajtott tömeges csapásokra lesz szükség az ukrán légvédelmi állások hatástalanításához, amihez a stratégiai rádiótechnikai és opto-elektronikai felderítésből származó operatív adatokra lesz szükség" – írja zárszavában Damancev. Ez a zárszó is megerősített abban, hogy a szerző a Kreml oldalán áll, és ennek ellenére objektív elemzést tett közzé.

A Damancev által leírtak alapján egy kérdés merül fel bennem. Az AN/MPQ-53/65 felderítő radar 0,01–0,02 m^2-es felbontóképessége milyen távolságra vonatkozik? A MIM-104F rakéta maximális indítási távolsága 40 km. Ezen a távolságon már valószínű, hogy az említett effektív visszaverő felülettel rendelkező célt látnia kell a lokátornak. Miért lényeges ez? Nézzük a számokat! Ha az effektív visszaverő felület 0,01–0,02 m^2, akkor az egy körülbelül (10–14,1) × (10–14,1) cm nagyságú effektív visszaverő felületet jelent. Nagyon nem mindegy, hogy ez 20 km vagy 40 km távolságban van. Ugyanis a vevőantennára visszaérkező teljesítményt a következő összefüggéssel lehet meghatározni:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}$$

ahol:

- P_t – kisugárzott teljesítmény;
- G_t – az adóantenna nyeresége (nem dB-ben, hanem természetes mérőszámban);
- A_r – a vevőantenna effektív apertúrája (felülete);
- σ – radarkeresztmetszet (hatásos visszaverő felület);
- F – terjedési tényező;
- R_t – az adó és a cél távolsága;
- R_r – a vevő és a cél távolsága.

Abban az esetben, ha az adó és a vevő (közös) ugyanott található, $R_t = R_r$ és a $R_t^2 R_r^2$ kifejezés helyettesíthető R^4-nel, akkor R a cél távolsága:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R^4}$$

Ez azt mutatja, hogy a visszaérkező jel a távolság negyedik hatványával csökken, ami azt jelenti, hogy a visszavert teljesítmény távoli tárgyak (célok) esetében nagyon-nagyon kis

értékű lesz. Elemezve az összefüggést, látható, hogy a visszaérkező teljesítmény P_r fordítottan arányos a céltávolság 4. hatványával.

Például 20 km céltávolság esetében az R4 = 160 000, 40 km esetén R4 = 2 560 000. Ez azt jelenti, hogy 20 km-ről 16-szor nagyobb jel érkezik vissza, ha minden egyéb változót egyformának veszünk.

Ígértem, hogy visszatérek Damancev egyik állítására. Azt írja, hogy az ukrán és a nyugati sajtóban publikált képek alapján a Patriot ütegekben M901 indítóállványok láthatók. Ez igaz, de a képek legtöbbje átvett valamilyen, a Patriot rendszert bemutató leírásból. Látványos különbség az M901/902/903 indítóberendezések között nincsen, így a képekről megkülönböztetni azokat nehéz, így nem könnyű eldönteni, hogy mit látunk valójában. Olyan képet, videót, amely mellett ukrán zászlós karjelzéses katonák állnak nem találtam, pedig egy ilyen kép lehetne perdöntő abban a kérdésben, hogy képes-e az ukrán légvédelem megsemmisíteni a H-47M2 rakétát.

Utánanéztem egy Patriot üteg felépítésének. A fellelt leírásokban nem ír típuskülönbséget az indítóállványokra. A különbség annyi, hogy a MIM-104E rakéta átmérője 410 mm, míg a MIM-104F rakétáé 250 mm. Az állványon az előbbiből 4 db van (lásd 13. ábra), az utóbbiból 16 (lásd 14. ábra). Így akár MIM-104F rakétát is indíthatott az ukrán légvédelem [106], [107].

13. ábra
Patriot M901/902/903 indítóállvány 4 db MIM-104E/D rakétával [103]

14. ábra
Patriot M901/902/903 indító állvány 16 db MIM-104F rakétával [105]

5. Összefoglalás

Összegezve, nem kaptam bizonyítékot arra vonatkozóan, hogy valóban lelőtte-e az ukrán légvédelem Kijev körzetében azt a 6 db „Kindzsal" rakétát, amit állít. Egyre viszont választ kaptam. A Patriot PAC-3MSE légvédelmi rendszer a MIM-104F légvédelmi rakétával képes leküzdeni az orosz légierő hiperszonikus rakétáját. A kérdés nyitva maradt, hogy Ukrajna rendelkezik-e ezzel a változattal, vagy csak a korábbi Patriot PAC-2-vel.

A fentiekből is látszik, hogy az ukrán–orosz háború olyan titkokat tárt fel és fog még feltárni, amelyekről eddig csak a benne dolgozók és az adott ország magas rangú politikai és katonai vezetői tudtak. Most már bizonyos részletei ezeknek az eszközöknek szerte a világon ismertek. Ne legyen naiv a kedves olvasó, más országok is kísérleteznek hasonló eszköz megalkotásával, vagy már van is nekik. Egy biztos, ha még nem rendelkeznek ilyennel, akkor a kutatások a lehető legnagyobb erőbedobással fognak folytatódni, hiszen a fegyverkezési verseny sajnos nem ért véget.

Felhasznált irodalom

[1] Ночной удар по Киеву: сколько “Кинжалов” сбила ПВО и мог ли один из них попасть в Patriot? (Night strike on Kyiv: how many “Kinzhal” were shot down by air defence and could one of them hit the Patriot?). *BBC News Русская Служба,* 2023. május 16. Online: https://www.bbc.com/russian/features-65617096

[2] РФ застосували гіперзвукові ракети Х-47М „Кинжал” для удару по Вінницький області (Russia used hypersonic missiles Kh-47M “Kinzhal” to strike at Vinnytsia region). *Defense Express,* 2022. augusztus 8. Online: https://defence-ua.com/news/rf_zastosuvali_giperzvukovi_raketu_h_47m_kinzhal_dlja_udaru_po_vinnitskij_oblasti-8477.html

[3] Х-47 “Кинжал”: балістичний чи гіперзвуковий, як взагалі працює, як з’явився у РФ та став міфом (Kh-47 “Kinzhal”: ballistic or hypersonic, how it works at all, how it appeared in Russia and became a myth). *Defense Express,* 2023. május 8. Online: https://defence-ua.com/minds_and_ideas/h_47_kinzhal_balistichnij_chi_giperzvukovij_jak_vzagali_pratsjuje_ta_jak_zjavivsja_u_rf_ta_stav_mifom-11532.html

[4] “Гіперзвуковий” Х-47 “Кинжал” успішно збито ЗСУ: уламки й пояснення причини сильного вибуху уночі 4 травня над Києвом (оновлено) (“Hypersonic” Kh-47 “Kinzhal” successfully shot down the Armed Forces of Ukraine: debris and explanation of the reason for the strong explosion over Kyiv on the night of May 4 [updated]). *Defense Express,* 2023. május 5. Online: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/giperzvukovij_h_47_kinzhal_uspishno_zbito_zsu_foto_ulamkiv_j_pojasnennja_prichini_silnogo_vibuhu_unochi_4_travnja_nad_kijevom-11498.html

[5] Бойова частина “Кинжала” має 150 кг особливої вибухівки, і це ще не все цікаве про ракету (The warhead of the “Kinzhal” has 150 kg of special explosives, and this is not all interesting about the rocket). *Defense Express,* 2023. május 16. Online: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/bojova_chastina_kinzhala_maje_150_kg_osoblivoji_vibuhivki_i_tse_sche_ne_vse_tsikave_pro_raketu-11610.html

[6] N. Logan, Ukraine says it shot down Russian Kinzhal missiles. What is the hypersonic weapon? *CBC,* 2023. május 16. Online: https://www.cbc.ca/news/world/ukraine-russia-kinzhal-missiles-1.6845097

[7] FAS, *B-70 Valkyrie.* Online: https://nuke.fas.org/guide/usa/bomber/b-70.htm

[8] Did Ukraine shoot down a Russian hypersonic missile with a US Patriot? *Forces,* 2023. május 15. Online: https://www.forces.net/ukraine/did-ukraine-shoot-down-russian-hypersonic-missile-us-patriot

[9] G. P. Sutton, O. Biblarz, *Rocket Propulsion Elements.* Eighth Edition, Hoboken, New Jersey, Wiley, 2010. pp. 9–10

[10] Megérkezett az orosz hadijelentés: Konasenkov szerint bevetették a nagypontosságú levegő-föld rakétákat. *Híradó.hu,* 2022. április 17. Online: https://hirado.hu/kulfold/cikk/2022/04/17/megerkezett-az-orosz-hadijelentes-konasenkov-szerint-bevetettek-a-nagypontossagu-levego-fold-raketakat

[11] Lelőttek az ukránok az oroszok egyik legfejletteb rakétáját. *HVG,* 2023. május 8. Online: https://hvg.hu/tudomany/20230508_orosz_ukran_haboru_kinzhal_hiperszonikus_raketa_patriot_legvedelmi_raketa

[12] C. Lethbridge, Bumper-Wac fact Sheet. *Spaceline,* [é. n.]. Online: https://www.spaceline.org/cape-canaveral-rocket-missile-program/bumper-wac/

[13] Zord G. L., Putyin-show a választóknak és az egész világnak. *Magyar Nemzet,* 2018. március 1. Online: https://magyarnemzet.hu/kulfold-archivum/2018/03/putyin-show-a-valasztoknak-es-az-egesz-vilagnak
[14] 9K720 Iskander (SS-26). *MissileThreat,* 2021. augusztus 2. Online: https://missilethreat.csis.org/missile/ss-26-2/
[15] NASA, *Mach Number.* Online:https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mach.html
[16] A kozmikus sebességek (szabad mozgások centrális gravitációs mezőben). *Netfizika,* [é. n.]. Online: https://www.netfizika.hu/kozmikus-sebessegek-szabad-mozgasok-centralis-gravitacios-mezoben
[17] Az ukránok lelőtték az oroszok „csodafegyverét" – valószínűleg az amerikai Patriot-rendszert vetették be. *Paraméter,* 2023. május 6. Online: https://parameter.sk/az-ukranok-lelottek-az-oroszok-csodafegyveret-valoszinuleg-az-amerikai-patriot-rendszert-vetettek-be
[18] "Кинжал": характеристики и особенности гиперзвуковой ракеты. *РЕН ТВ – Прямой эфир,* 2022. április 8. Online: https://ren.tv/longread/960895-raketnyi-kompleks-kinzhal-kharakteristiki-giperzvukovogo-oruzhiia
[19] Szergej Sojgu: nem igaz, hogy az ukránok lelőttek hat Kindzsal rakétát. *Portfolio,* 2023. május 16. Online: https://www.portfolio.hu/global/20230516/szergej-sojgu-nem-igaz-hogy-az-ukranok-lelottek-hat-kinzsal-raketat-615602
[20] Felkai Á., Az oroszok miatt titokban, de az USA márciusban sikeresen tesztelt egy „valódi" hiperszonikus fegyvert. *Rakéta,* 2022. április 6. Online: https://raketa.hu/az-oroszok-miatt-titokban-de-az-usa-marciusban-sikeresen-tesztelt-egy-valodi-hiperszonikus-fegyvert
[21] Felkai Á., Képes lehet-e egyáltalán egy amerikai Patriot leszedni egy orosz hiperszonikus Kindzsal lövedéket? *Rakéta,* 2023. május 6. Online: https://raketa.hu/kepes-lehet-egy-altalan-egy-amerikai-patriot-leszedni-egy-orosz-hiperszonikus-kindzsal-lovedeket
[22] G. Garanich, S. Karazy, Kyiv says it shoots down volley of Russian hypersonic missiles. *Reuters,* 2023. május 16. Online: https://www.reuters.com/world/europe/air-defence-systems-repelling-attacks-ukraine-early-tuesday-officials-2023-05-16/
[23] A. Hollings, How Russia Fooled the World about its 'Hypersonic' Kinzhal. *Sandboxx,* 2022. augusztus 19. Online: https://www.sandboxx.us/blog/why-calling-russias-kinzhal-a-hypersonic-missile-is-a-stretch/
[24] Szilvássy L., „Az orosz-ukrán háborúban alkalmazott repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta," in *Műszaki tudomány az északkelet-magyarországi régióban,* Páy G. szerk., 2022. Konferenciakiadvány, Nyíregyháza, Nyíregyházi Egyetem 2022. pp. 340–344.
[25] Szilvássy L., Békési B., „Rakéta hajtóművek," *Repüléstudományi Közlemények,* 11. évf. 1. sz. pp. 263–271. 1999.
[26] Szilvássy L., Békési B., „Repülőfedélzeti rakéták hajtóművei," *Bolyai Szemle,* 11. évf. pp. 1–11. 2002.
[27] Szilvássy L., „A repülőgép-fedélzeti rakéták hajtóműveiben alkalmazott hajtóanyagok," *Repüléstudományi Közlemények,* 10. évf. 2. sz. pp. 43–50. 1998.
[28] Szilvássy L., Szabó L., „Rakéták reaktív hajtóművei," *Repüléstudományi Közlemények,* 18. évf. 1. sz. pp. 209–216. 2006.
[29] Szilvássy L., Békési B., „A katonai repülőgép fedélzeti rakéták hajtóművei," in *12th Hungarian Days of Aeronautical Sciences Conference: The Challenge of Next Millenium on Hungarian Aeronautical Sciences,* Rohács J. et al. szerk., Budapest, BME, 1999. pp. 124–131.

[30] Szilvássy L., „Meteor rakéta," in *Repüléstudományi Szemelvények 2018,* Szilvássy L. szerk., Szolnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet, 2018. pp. 119–142.
[31] International Standard Atmosphere. *The Engineering ToolBox,* [é. n.]. Online: https://www.engineeringtoolbox.com/international-standard-atmosphere-d_985.html
[32] Explainer: Can Ukraine Use Patriot Systems to Knock Out Russian Hypersonic Missiles? *VoaNews,* 2023. május 17. Online: https://www.voanews.com/a/explainer-can-ukraine-use-patriot-defense-systems-to-knock-out-russian-hypersonic-missiles-/7097858.html
[33] Wikipedia, *Kh-47M2 Kinzhal.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Kh-47M2_Kinzhal
[34] Wikipedia, *Hypersonic weapon.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypersonic_weapon
[35] Wikipedia, *Hiperszonikus áramlás.* Online: https://hu.wikipedia.org/wiki/Hiperszonikus_%C3%A1raml%C3%A1s
[36] Wikipedia, *XB-70 Valkyrie.* Online: https://hu.wikipedia.org/wiki/XB%E2%80%9370_Valkyrie
[37] Wikipedia, *AGM-183 ARRW.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/AGM-183_ARRW
[38] Wikipedia, *Hwasong-8.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Hwasong-8
[39] Wipedia The Free Encyclopedia: DF-ZF, Online:
[40] Wikipedia, *Avangard (hypersonic glide vehicle).* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Avangard_(hypersonic_glide_vehicle)
[41] Wikipedia, *Hypersonic Technology Demonstrator Vehicle.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypersonic_Technology_Demonstrator_Vehicle
[42] Wikipedia, *Hypersonic Air-breathing Weapon Concept.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypersonic_Air-breathing_Weapon_Concept
[43] Wikipedia, *Aegis Ballistic Missile Defense System.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Aegis_Ballistic_Missile_Defense_System
[44] Wikipedia, *S-400 missile system.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/S-400_missile_system
[45] Wikipedia, *MIM-104 Patriot.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/MIM-104_Patriot
[46] Wikipedia, *RIM-174 Standard ERAM.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/RIM-174_Standard_ERAM
[47] Wikipedia, *9K720 Iskander.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/9K720_Iskander
[48] Wikipedia, *Circular error probable.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_error_probable
[49] Wikipedia, *International Standard Atmosphere.* Online: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Atmosphere
[50] Это историческое событие! Характеристика ракет Кинжал, которые сбили украинцы (This is a historic event! Characteristics of the Dagger missiles shot down by the Ukrainians). *Викна,* 2023. augusztus 9. Online: https://vikna.tv/ru/video/svit/rakety-kinzhal-harakteristiki-sverhzvukovoj-rakety-kinzhal/
[51] Гиперзвуковой бросок «Кинжала»: конкуренты еще - в «пеленках». *Звезда,* 2018. május 23. Online: https://zvezdaweekly.ru/news/20185211547-L3aOs.html
[52] Не такой уж и быстрый: что известно о ракетном комплексе Кинжал и его характеристики (Not so fast: what is known about the Dagger missile system and its characteristics). *Факти,* 2023. augusztus 11. Online: https://fakty.com.ua/ru/ukraine/20230516-u-10-raziv-vyshhe-shvydkosti-zvuku-dalnist-urazhennya-3-tys-km-sh-ho-take-raketnyj-kompleks-kyndzhal/

[53] Можно ли сбить гиперзвуковой "Кинжал"? (Is it possible to shoot down the hypersonic "Kinzhal"?). *RG.ru,* 2023. május 13. Online: https://rg.ru/2023/05/13/mozhno-li-sbit-giperzvukovoj-kinzhal.html
[54] *Рособороноэкспорт, БЕТАБ-500.* Online: http://roe.ru/catalog/vozdushno-kosmicheskie-sily/aviatsionnye-bomby/betab-500/
[55] В Минобороны рассказали, что Киев выдал за «сбитые ракеты «Кинжал» (The Ministry of Defense said that Kiev issued for downed missiles "Kinzhal". *RBC.ru,* 2023. május 13. Online: https://www.rbc.ru/rbcfreenews/645f32999a794726e38b0ffa
[56] Что известно о гиперзвуковой ракете "Кинжал" (What is known about the hypersonic missile "Kinzhal"). *ТАСС,* 2023. május 16. Online: https://tass.ru/info/17760793
[57] Х-47М2 «Кинжал» Гиперзвуковой ракетный комплекс. *Redstar,* [é. n.]. Online: www.redstar.gr/index.php?option = com_content&view = article&id = 5264:kh-47m2-kinzhal&catid = 655&lang = ru&Itemid = 566
[58] Можно ли сбить гиперзвуковой "Кинжал"? *Русское оружие (RG.ru),* 2023. május 13. Online: https://rg.ru/2023/05/13/mozhno-li-sbit-giperzvukovoj-kinzhal.html
[59] В России прокомментировали «перехват» Украиной ракеты «Кинжал». *Lenta.ru,* 2023. május 13. Online: https://lenta.ru/news/2023/05/13/kinzhal/
[60] Нет никакой "гиперзвуковой" ракеты: эксперт назвал слабые стороны "Кинжала". *Апостроф (apostrophe.ua),* 2023. május 16. Online: https://apostrophe.ua/news/society/2023-05-16/net-nikakoy-giperzvukovoy-raketyi-ekspert-nazval-slabyie-storonyi-kinjala/297086
[61] M. Starr, Kyiv proves Russia's Kinzhal missile more hype than hypersonic – analysis. *The Jerusalem Post,* 2023. május 8. Online: www.jpost.com/international/article-742392
[62] Украинское ПВО умножило на ноль российский "аналоговнет": что известно о ракете "Кинжал". Фото. *Апостроф (apostrophe.ua)*, 2023. május 16. Online: https://apostrophe.ua/news/society/2023-05-16/ukrainskoe-pvo-umnozhilo-na-nol-rossijskij-analogovnet-chto-izvestno-o-rakete-kinzhal_-foto/297047
[63] Сто миллионов на ветер. Как Patriot пытался сбить российский «Кинжал». *Газета.ru,* 2023. május 19. Online: www.gazeta.ru/army/2023/05/19/16728212.shtml
[64] Гиперзвуковой ракетный комплекс Х-47М2 «Кинжал». Графика, *Белок из будущего,* 2022. március 25. Online: https://iz.ru/1414153/video/giperzvukovoi-raketnyi-kompleks-kh-47m2-kinzhal-grafika
[65] Новые детали. Полёт гиперзвуковой ракеты Часть 2. Разбираем видеокадры с Украины. *YouTube,* 2022. március 25. Online: www.youtube.com/watch?v = 1tahZ3-SJ6g&list = PLgGq-5L43_H9rbdAZmR8LlFohC_DWtRqk&index = 56
[66] Как работает ракетный комплекс "Кинжал". *Baltnews,* 2020. január 29. Online: https://lv.baltnews.com/infographics/20200129/1023656112/Infografika-kak-rabotaet-raketnyy-kompleks-Kinzhal.html
[67] Как летает ракета боевого комплекса «Кинжал»: гиперзвуковое российское оружие. *TechInsider,* 2022. március 26. Online: www.techinsider.ru/weapon/750293-kak-letaet-kinzhal/
[68] Американский Patriot сбил российский «Кинжал»: совершенство систем ПРО или непрофессиональная фикция командования ВСУ. *Военное дело,* 2023. május 10. Online: https://voennoedelo.com/posts/

id43534-amerikanskij-patriot-sbil-rossijskij-kinzhal-sovershenstvo-sistem-pro-ili-nepro-fessionalnaja-fiktsija-komandovanija-vsu
[69] Х 47М2 "Кинжал" – "гіперзвуковий піар" російського ВПК. *Військовий Кур'єр,* [é. n.]. Online: https://mil.co.ua/kinzhal/
[70] «Из области фантастики»: военэксперт о перехвате Украиной ракеты «Кинжал». *News.ru,* 2023. május 10. Online: https://news.ru/society/ekspert-nazval-dovody-protiv-versii-ukrainy-o-sbitoj-rakete-vs-rf-kinzhal/
[71] ЗРК «Пэтриот»: миссия оказалась невыполнимой. *Еженедельник Звезда,* 2023. május 30. Online: https://zvezdaweekly.ru/news/20235251629-AXAtu.html
[72] D. Bohn, X-51A WaveRider hypersonic missile successfully hits Mach 5.1 in final test. *The Verge,* 2013. május 4. Online: www.theverge.com/2013/5/4/4298270/x-51a-waverider-hypersonic-missile-successfully-hits-mach-5-1-in
[73] T. Rogoway, S. Payne, We Have Questions About Russia's Claimed Kinzhal Hypersonic Missile Use In Ukraine (Updated). *The Warzone,* 2022. március 21. Online: www.thedrive.com/the-war-zone/44840/we-have-questions-about-russias-claimed-kinzhal-hypersonic-missile-use-in-ukraine
[74] Valami nagyon nem stimmel az orosz hiperszonikus rakéta bevetése körül. *Telex,* 2022. március 21. Online: https://telex.hu/kulfold/2022/03/21/oroszorszag-kindzsal-hiperszonikus-raketa-video-kerdesek-orosz-ukran-haboru
[75] Fotelhírszerzők, Twitter-diplomaták, maszek hekkerek és sok-sok kütyü – Ízig-vérig 21. századi háború zajlik Ukrajnában. *Telex,* 2022. április 7. Online: https://telex.hu/tech/2022/04/07/orosz-ukran-haboru-ukrajna-21-szazadi-haboru-internet-hekkerek-kriptovaluta-telegram-starlink-tiktok-twitter-osint
[76] D. Wichner, Tucson-based Raytheon's hypersonic missile passes 'historic' first test flight. *Tucson.com,* 2021. szeptember 28. Online: https://tucson.com/news/local/tucson-based-raytheons-hypersonic-missile-passes-historic-first-test-flight/article_622790b4-1fd3-11ec-9e6f-cb3f477d974f.html
[77] R. Brahambhatt, What are hypersonic missiles and how does hypersonic weapon technology work? *Interesting Engineering,* 2022. február 6. Online: https://interestingengineering.com/innovation/hypersonic-missiles
[78] Y. Inaba, Japan's ATLA Developing Hypersonic Anti-Ship Missile. *Naval News,* 2020. április 27. Online: www.navalnews.com/naval-news/2020/04/japans-atla-developing-hypersonic-anti-ship-missile/
[79] Новые детали. Полёт гиперзвуковой ракеты Часть 2. Разбираем видеокадры с Украины. *YouTube,* 2022. március 25. Online: www.youtube.com/watch?v = 1tahZ3-SJ6g
[80] Резников начал подсчет уничтоженных российских "Кинжалов": сколько их еще у врага. *24 Канал,* 2023. május 16. Online: https://24tv.ua/ru/skolko-raket-h-47m2-kinzhal-sbila-ukraina-skolko-kinzhalov-u-rossii-24-kanal_n2314622
[81] S. Oğuz, *Nuclear Weapons of Russia -2: Dagger (Kınzhal- Kh-47m2).* ANKASAM (Ankara Center for Crisis and Policy Studies), 2022. május 9. Online: www.ankasam.org/nuclear-weapons-of-russia-1-dagger-kinzhal-kh-47m2/?lang = en
[82] В России увеличили производство ракет "Кинжал" до 10 единиц в месяц,–военный эксперт Киричевский. *ЕСПРЕСО,* 2023. május 16. Online: https://ru.espreso.tv/v-rossii-uvelichili-proizvodstvo-raket-kinzhal-do-10-edinits-v-mesyats-voennyy-ekspert-kirichevskiy

[83] Кинжал vs Patriot. Чьи технологии ночью над Киевом оказались сильнее. *NV – New Voice,* 2023. május 16. Online: https://nv.ua/opinion/kinzhal-ataka-fursa-ob-obstrele-kieva-16-maya-poslednie-novosti-50324850.html
[84] Минобороны: в Киеве ударом ракеты «Кинжал» уничтожен комплекс ПВО Patriot. *Новости,* 2023. május 16. Online: https://news.mail.ru/incident/56231406/
[85] Куча железа: Bild показал обломки российской сверхзвуковой ракеты "Кинжал", которую сбили над Киевом. Видео. *Obozrevatel,* 2023. május 10. Online: https://war.obozrevatel.com/kucha-zheleza-bild-pokazal-oblomki-rossijskoj-sverhzvukovoj-raketyi-kinzhal-kotoruyu-sbili-nad-kievom-video.htm
[86] Над Киевом ночью сбили шесть российских "Кинжалов". *Euroradio FM,* 2023. május 16. Online: https://euroradio.fm/ru/nad-kievom-nochyu-sbili-shest-rossiyskikh-kinzhalov
[87] Залужный: Россия атаковала Украину шестью ракетами Х-47 "Кинжал". Все были сбиты ПВО. *Ліга Новости,* 2023. május 16. Online: https://news.liga.net/politics/news/zalujnyy-rossiya-atakovala-ukrainu-shestyu-raketami-h-47-kinjal-vse-byli-sbity-pvo
[88] Производство гиперзвуковых ракет Х-47М2 "Кинжал" увеличилось на 500%. *Дзен,* [é. n.]. Online: https://dzen.ru/a/ZG7kd0Sl-RKmbmmu
[89] В Киеве показали обломки якобы сбитой украинской ПВО ракеты «Кинжал». *Коммерсантъ,* 2023. május 10. Online: www.kommersant.ru/doc/5978369
[90] ПВО ночью сбило 18 российских ракет: среди них "Кинжалы" и Калибры". *delo.ua,* 2023. május 16. Online: https://delo.ua/ru/incidents/pvo-nocyu-sbilo-18-rossiiskix-raket-sredi-nix-kinzaly-i-kalibry-417439/
[91] Атака на Киев: предварительно — "Кинжалами". как уберечься от ракет. *Зеркало недели,* 2023. május 16. Online: https://zn.ua/war/kiev-atakujut-kindzhalamiju-kak-uberechsja-ot-raket-s-vozmozhnym-jadernym-zarjadom.html
[92] Гиперзвуковой авиационный ракетный комплекс «Кинжал», характеристика и особенности. *Army-Today,* [é. n.]. Online: https://army-today.ru/tehnika/kinzhal
[93] Гиперзвуковой «Кинжал» – первая ласточка новых войн. *Naked Science,* 2019. december 30. Online: https://naked-science.ru/article/tech/giperzvukovoj-kinzhal-pervaya-lastochka-novyh-vojn
[94] Что такое гиперзвуковые ракеты «Кинжал». *Universe,* 2023. január 27. Online: https://universemagazine.com/ru/shho-take-giperzvukovi-raketi-yakimi-rosiya-atakuye-ukrayinu/
[95] ПВО уничтожила все «Кинжалы», «Калибры» и баллистические ракеты, которыми войска РФ ночью атаковали Украину. *Центр журналистских расследований,* 2023. május 16. Online: https://investigator.org.ua/news-2/254648/
[96] Military Watch: Русские пятикратно увеличили выпуск практически неотразимых гиперзвуковых ракет Х-47М2 «Кинжал». *Свободная Пресса,* 2023. május 28. Online: https://svpressa.ru/war21/article/374459/
[97] Ракета Кинжал: характеристики гиперзвукового оружия, удар, мощность, применение на Украине. *Begeton,* 2022. március 22. Online: https://begeton.com/blog/5397-raketa-kinzhal-kharakteristiki-giperzvukovogo-oruzhiya-udar-moshchnost-primenenie-na-ukraine/
[98] Издание Bild показало обломки ракеты "Кинжал", которую над Киевом сбил ЗРК Patriot – видео. *Стопкор,* 2023. május 10. Online: www.stopcor.org/section-suspilstvo/news-vidannya-bild-pokazalo-ulamki-raketi-kindzhal-yaku-nad-kievom-zbiv-zrk-patriot-video-10-05-2023.html

[99] Топ-5 вооружений России, которые больше всего пугают Запад в СВО. *Life (RU),* 2023. május 26. Online: https://life.ru/p/1581713
[100] Шойгу опроверг заявления Киева о сбитых их ПВО шести российских ракетах «Кинжал». *Новости Кыргызстана,* 2023. május 17. Online: www.for.kg/news-808442-ru.html
[101] MWM: Россия увеличила в пять раз производство гиперзвуковых ракет «Кинжал». *Общественная служба новостей,* 2023. május 28. Online: www.osnmedia.ru/world/mwm-rossiya-uvelichila-v-pyat-raz-proizvodstvo-giperzvukovyh-raket-kinzhal/
[102] X-47M2 «Кинжал» оснащён уникальной боевой частью мощностью 240 ТНТ – украинские специалисты изучили российскую гиперзвуковую ракету. *Нескучный сайт технике,* [é. n.]. Online: https://gagadget.com/ru/247071-h-47m2-kinzhal-osnaschyon-unikalnoj-boevoj-chastyu-moschnostyu-240-tnt-ukrainskie-spetsialistyi-izuchili-rossijskuyu-g/
[103] M. Brain, S. Glein, How Patriot Missiles Work. *HowStuffWorks,* 2022. március 10. Online: https://science.howstuffworks.com/patriot-missile.htm
[104] American missile defense systems in the theater of operations. *Top War,* 2022. február 22. Online: https://en.topwar.ru/192497-amerikanskie-sistemy-pro-na-teatre-voeny-nyh-dejstvij.html
[105] P. Bouvier, War in Ukraine: What is the Patriot missile system? *Le Monde,* 2023. május 23. Online: www.lemonde.fr/en/international/article/2023/05/23/war-in-ukraine-what-is-the-patriot-missile-system_6027705_4.html

Kh-47M2 „Kinzhal" Air-Launched Hypersonic Missile

In the Russian-Ukrainian war, that started on 24 February, a number of weapons were used that we had little information before, and even their existence was not known. One such weapon is the Kh-47M2 "Kinzhal" air-launched hypersonic missile. In my publication, I would like to introduce this device, including the history of its development and a brief history of the achievement of hypersonic speeds, as well as the articles in the press which claim that the Ukrainian army shot down such a device.

***Keywords**: hypersonic, aircraft on-board missile, Russian-Ukrainian war, Patriot SAM*

Dr. Szilvássy László
egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék

szilvassy.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-0455-4559

László Szilvássy, PhD
Associate Professor
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Department of Aircraft Onboard Systems
szilvassy.laszlo@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-0455-4559

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 237–256. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.17

Csató Péter

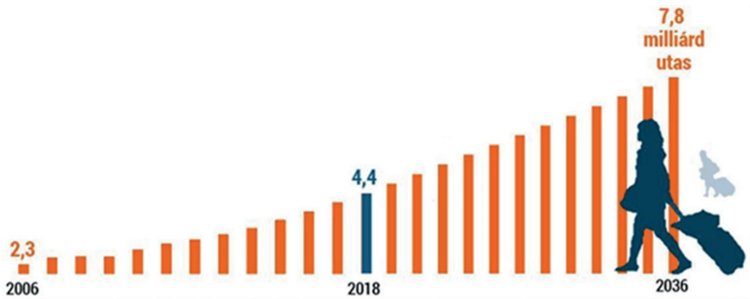
A szintetikus tüzelőanyagok alkalmazásának kérdései a repülésben

Az elmúlt években rendkívüli mennyiségű üvegházhatású gáz jutott a légkörbe, amelynek nem elhanyagolható része a repüléshez köthető. A jelenleg használt, az 1930-as éveket követően egyre csökkenő mennyiségben kitermelhető kőolaj kiváltására az egyik legígéretesebb alternatívának a szintetikus tüzelőanyagok különböző típusai tűnnek. „Drop-in" jellegük miatt főbb tulajdonságaik megegyeznek a hagyományos repülőgép-üzemanyagokkal, így kompatibilisek a legtöbb repülőgéptípussal. Azonban a szintetikus tüzelőanyagok előállítása sok esetben nehézkes vagy jóval költségesebb folyamattal jár, mint a hagyományos kerozin esetében. Számos terv született már e problémák megoldására, amelyek kivitelezése és új eljárások fejlesztése jelenleg is folyamatban van, figyelembe véve a hazánk által is vállalt 2030-as, valamint 2050-es határidővel a karbonsemleges, majd karbonmentes katonai és polgári légi közlekedés elérésének célját. E cikkben olyan szintetikus alternatív tüzelőanyagokat mutatok be, amelyek potenciálisan alkalmasak lehetnek a kerozin kiváltására. Célom, hogy képet adjak az eddig elért fontosabb eredményekről, és előrevetítsem a szintetikus tüzelőanyagok felhasználásának lehetséges jövőjét.

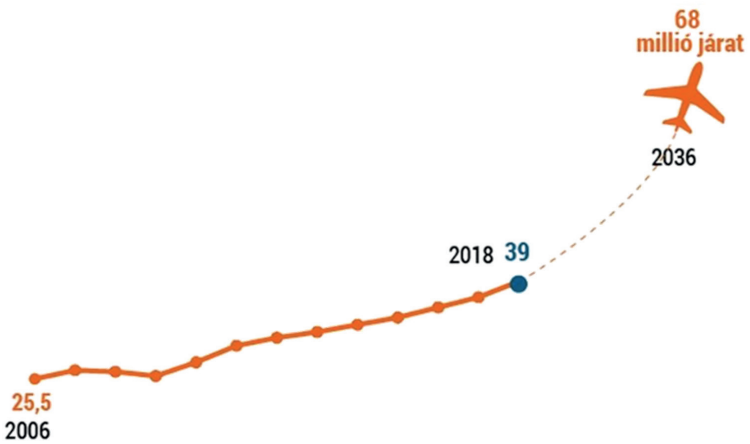
Kulcsszavak: *SAF, szintetikus tüzelőanyag, Fischer–Tropsch-eljárás, károsanyag-kibocsátás, drop-in üzemanyagok*

1. Bevezetés

A légi közlekedés globalizált világunk szerves részévé vált, összeköti az embereket és a vállalkozásokat akár kontinensek között is. Szerte a világon egyre növekvő igény van rá (1. ábra), ami együtt jár az ezt kiszolgáló légi járművek, illetve légi járatok számának (2. ábra), ezzel együtt azok tüzelőanyag-fogyasztásának növekedésével (3a. ábra).

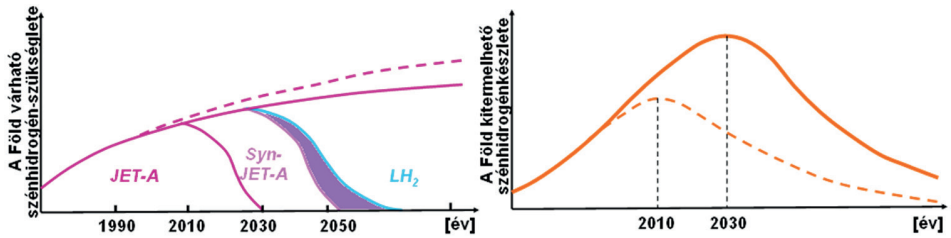


1. ábra
A légi utazást választók száma 2036-ig [1]



2. ábra
A légi utazások kiszolgálásához szükséges repülőgép-járatszám változása 2036-ig [2]

A repülőgépek működtetéséhez szükséges tüzelőanyag-igény folyamatosan növekszik (3a. ábra), azonban nem hagyható figyelmen kívül, hogy az előállításához szükséges, kitermelhető fosszilis nyersanyag mennyisége egy évtized múltán fokozatosan és véglegesen csökkenni kezd (3b. ábra), ezáltal – a fenntartani szükséges fejlődés érdekében – elengedhetetlen gondoskodni ennek megbízható pótlásáról, illetve kiváltásáról. Utóbbi azt jelenti, hogy amíg még van és működik a meglévő és a közeljövőben gyártott több tízezer, hagyományos belső égésű hajtómű (ez további 20–40 év!), addig más forrásból (például szintetikus úton) kell biztosítani ezek üzemanyag-ellátását. Ezt követően viszont meg kell találni a légi járművek levegőben való mozgatásához maradéktalanul alkalmas új erőgép(ek)et, és az ezek működtetéséhez szükséges mennyiségű, hosszú ideig gazdaságosan kitermelhető, illetve gyártható, előállítható új energiahordozó(ka)t. Utóbbiak széles körű, üzemszerű alkalmazása viszont csak a felsoroltak kitermelését, előállítását, szállítását, tárolását lehetővé tévő logisztikai hálózat kiépítését követően válik lehetségessé.



3. ábra
A légi közlekedés energiaigényének és a kitermelhető kőolaj mennyiségének változása a 21. században [3]

Mindez csak úgy valósítható meg, hogy a légi közlekedés egyre súlyosabb, káros környezeti hatásait nem hagyják figyelmen kívül, mivel a rendkívüli mértékben növekvő üzemanyag-fogyasztás jelentős mértékben hozzájárul a károsanyag-kibocsátáshoz és az éghajlatváltozáshoz. Az Európai Bizottság és a Holland Környezetvédelmi Ügynökség által 2022-ben kiadott EDGAR adatbázisa alapján az adott évben 37 857,58 millió t szén-dioxid került a légkörbe [4]. Azonban ebben a kimutatásban nem szerepelnek az egyéb, még erősebb üvegházhatású gázok, amelyek a repülőgép-üzemanyagok elégetése során szabadulnak fel, például nitrogén-oxidok, kén-dioxid és szén-monoxid, bár ezek jelentős hatással lehetnek a helyi levegő minőségére, és hozzájárulhatnak a szmog kialakulásához. A Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség (IATA) kimutatása alapján a légi közlekedés a globális szén-dioxid-kibocsátás körülbelül 2%-áért felelős.

Bár a Covid–19 miatt a légi közlekedés általi üzemanyag-fogyasztás az elmúlt években visszaesett, 2023-ban várhatóan visszatér a világjárvány előtti tendenciákhoz, így a következő években tovább fog növekedni. Ez jelentős kihívást jelent a légi közlekedési ágazat számára, amelynek egyensúlyt kell teremtenie a növekedés és a károsanyag-kibocsátás csökkentése között. Ennek érdekében különböző megoldási kísérletek láttak napvilágot, beleértve a nemzetközi egyezményeket, illetve technológiai fejlesztéseket. Az új meghajtási módszerek mellett egyre nagyobb figyelem irányul az alternatív tüzelőanyagok előállítására szolgáló progresszív eljárások kifejlesztésére és a repülésben való alkalmazásuk hatékonyabbá tételére. Napjainkban számos külföldi és nemzetközi szervezet egyre átfogóbban kutatja a repülőgépüzemanyag-előállítás alternatív módszereit azért, hogy ne csak a velük szemben támasztott fizikai-kémiai és hasznosítási követelményeknek való megfelelés, hanem ökológiai tulajdonságaik további javítása is lehetővé váljon.

A légi járművek károsanyag-kibocsátásának csökkentése szempontjából jelentős alternatívát jelentenek a szintetikus tüzelőanyagok (synfuels, más néven PtL, Power-to-Liquids), kerozinszerű „drop-in" üzemanyagok, amelyek kompatibilisek a legtöbb repülőgép hajtóművével, így azok jelentős átalakítása nélkül alkalmazhatók.

2. A szintetikus tüzelőanyagok fejlődése

A szintetikus tüzelőanyagok számos típusa és előállítási módja ismeretes, amelynek eredete 1902-re datálható és az indirekt cseppfolyósítási technológia megjelenésével köthető össze. Ekkor végezték el először sikeresen a szén-monoxid és szén-dioxid hidrogénezését, aminek eredményeként metán jött létre. Ez az esemény indította el a modern katalitikus hidrogénezés fejlesztését. Körülbelül tíz évvel később Fritz Haber ammóniát szintetizált katalitikus technikával, a korábbi légköri nyomáson végzett kísérletekkel ellentétben, magas hőmérsékletű és nagynyomású környezetben. Ezután, a nagynyomású katalitikus technológia gyorsan fejlődött. 1913-ban a német Badische Anilin und Soda Fabrik (BASF) cég szabadalmat szerzett a szén-monoxid nagynyomású katalitikus hidrogénezésére. A BASF szabadalom érdekelte Franz Fischer professzort, a Vilmos Császár Kémiai Intézet (ma Max Planck Kémiai Intézet) professzorát, aki társával, Hans Tropschsal együtt elkezdte tanulmányozni a reakciólehetőségeket. Fischer 1923-ban publikálta első eredményeiket, amelyekben vasforgácsot használtak katalizátorként 400–450 °C-os reakciókörnyezetben, hogy a termékek széles skáláját állítsák elő, beleértve az alkoholokat, ketonokat és aldehideket, de üzemanyagot még nem. Szénhidrogén-olajat először csak 1925-ben sikerült kis cseppekben szintetizálniuk. 1931 után a Fischer és más tudósok által kifejlesztett technikával, normál nyomáson és 180–220 °C-os hőmérsékleten kobaltkatalizátort alkalmazva már hatékonyan lehetett üzemanyagokat előállítani [5].

Ez a folyamat azonban nem volt mentes a nehézségektől, mivel a nem kellően tiszta gáz a katalizátor szennyezéséhez vezetett. További munkára volt szükség a gáztisztítási eljárások fejlesztése érdekében. 1933-ban megépült az első működő, közvetett cseppfolyósító kísérleti üzem. 1937-re már hét normál nyomású reaktort állítottak fel Holtenben, Rauxelben, Wanne-Eickelben, Lutzendorfban, Moersben, Berghamenben és Schwarzheidében, amelyek közül az utóbbi volt a legnagyobb üzem, évi 180 000 t kapacitással, és az egyetlen, amely még 1945-ben is működött. Számos oka volt Németország dominanciájának a szintetikus üzemanyagok kutatásának és előállításának területén a második világháború előtti és alatti években. Ezek közül a fő szerepet a nem megfelelő üzemanyag-ellátás jelentette, ami az első világháború elvesztésében is szerepet játszott. Az állami és magánforrásokból finanszírozott német tudósok két fő technikát dolgoztak ki a szénátalakításra, az olajhiány problémájának leküzdésére a második világháború kitöréséig. E módszerek közül az első a Bergius-technika, amely porított szén hidrogénezésén alapult, míg a Fischer, Tropsch és Pichler által kidolgozott második módszer közvetetten állított elő üzemanyagot széngázosítással, majd szintetizálással. Ezeknek a technológiáknak a fejlesztése gyorsan haladt a német kutatóintézetek, egyetemek és vállalatok laboratóriumaiban.

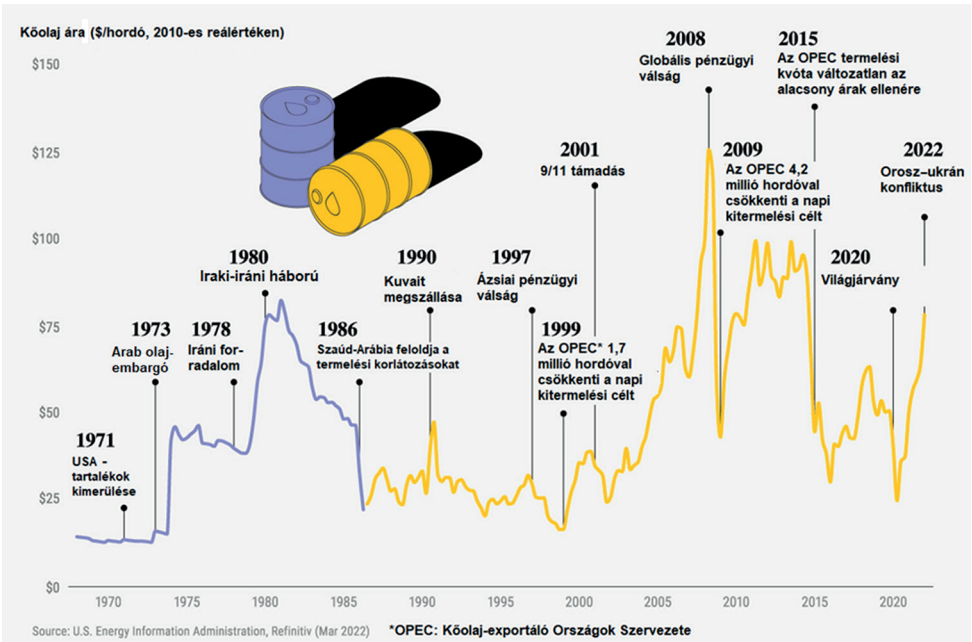
A két eljárás közül a Bergius-technika volt a fejlettebb, és sokkal nagyobb mértékben járult hozzá Németország folyékony üzemanyaggal való ellátásához, mint a Fischer–Tropsch-szintézis. A hidrogénezéssel kiváló minőségű repülőgép- és motorbenzint, míg a Fischer–Tropsch-szintézissel pedig dízel- és kenőolajat, valamint gyengébb minőségű benzint kaptak. A két eljárás valójában inkább egymás komplementere, semmint versenytársa volt, de mivel csak a hidrogénezéssel volt lehetséges jó minőségű benzin előállítása, az 1930-as évek végén és a háborús években sokkal nagyobb fejlődésen ment keresztül, mint a Fischer–Tropsch-szintézis. Az 1936-ban induló német négyéves terv keretében tíz Bergius-elven működő üzem létrehozására történt kezdeményezés 1,15 milliárd DM költséggel. A terv számos nehézségbe ütközött, többek között az acél-, munkaerő- és tőkehiány egyre inkább gátolta a teljes

energiafüggetlenség megvalósítására irányuló terveket. A nehézségek ellenére 1939 szeptemberében a termelőkapacitás évi 1,467 millió t üzemanyag szintetizálását tette lehetővé, amelynek mintegy 84%-a közvetlen hidrogénezéssel történt. 1944 márciusára, a termelési csúcs elérésekor, a teljes kapacitás körülbelül évi 4,5 millió t-t tett ki. A repülőgépüzemanyag-előállítás, amely 1944 elejére elérte az évi közel 2 millió t-t, szinte teljes egészében a közvetlen hidrogénező üzemekben történt. Ekkor a Luftwaffeban felhasznált tüzelőanyag megközelítőleg 92%-a szintetikus volt. Azonban a stratégiai bombázások miatt az üzemek nagy része megbénult, így az összkapacitásuk 1944 szeptemberére évi 360 000 t alá esett.

A németországi fejlesztések jelentős figyelmet kaptak az Egyesült Államokban. Bár szintetikus üzemanyagok iránt nem mutatkozott akkora érdeklődés, mint Németországban, de a kutatás az 1920-as években már megkezdődött, leginkább az olajpala-technológia területén. Hatékonyabb program azonban csak az 1940-es években indult. Az elemzők ekkor kezdték előrejelezni a hazai kőolajhiányt és az import növekvő szerepét az Egyesült Államok energiaellátásában. Később az USA erőfeszítéseit nagymértékben segítette a Németországban lefoglalt információ és eszközpark. 1944 végén a Belügyminisztérium Háborús Kőolajügyi Hivatala műszaki és tudományos önkénteseket kért, hogy csatlakozzanak a Szövetséges Erők előretolt egységeihez Németország ipari központjainak inváziója során. Sok esetben a bombázás annyira tönkretette a berendezéseket, hogy alig lehetett megmenteni, míg más esetben az Egyesült Államok hőcserélőket, nagynyomású befecskendező szivattyúkat és különféle speciális eszközöket szerzett meg és szállított az anyaországba. A német tudósok együttműködése hozzájárult a technológiatranszfer folyamatához. Több száz német tudóst alkalmaztak Franz Fischer vezetésével a megszerzett dokumentumok olvasására, fordítására és osztályozására. 1947-re az Egyesült Államok kőolaj iránti belső kereslete egyértelműen helyreállt, sőt jóval a várakozások fölé emelkedett. Időközben számos tanulmány készült, amely a szénátalakítás relatív költségeire vonatkozott. Az akkori gazdasági körülmények között az Országos Kőolajügyi Bizottság arra a következtetésre jutott, hogy a szintetikus üzemanyag fejlesztési programja csak a legsúlyosabb nemzetbiztonsági megfontolások esetén indokolt. Ennek elsődleges oka a Közel-Keleten és más régiókban található hatalmas olajtartalékok felfedezése volt, ami olcsóbbá tette az olajimportot a szintetikus üzemanyag hazai előállításához képest. Ezenkívül a szén cseppfolyósításának környezeti hatásai egyre nyilvánvalóbbá váltak, ami a levegő- és vízszennyezéssel kapcsolatos aggodalmakhoz vezetett. Ennek következtében 1954-ben bezárták az összes közvetett és közvetlen cseppfolyósító létesítményt, majd az 1970-es évek közepéig megszűnt minden jelentős nemzeti erőfeszítés a szintetikus üzemanyagok fejlesztésére Dél-Afrikán kívül. Bár ott a Ruhrchemie német cég már az 1930-as években szerződést kötött az Anglovaal céggel a Fischer–Tropsch-módszer alapján működő létesítmények létrehozásáról és szabadalmáról, az együttműködés az eszkalálódó világháború és annak következményei miatt nem valósulhatott meg. A háború után sok német tudós és mérnök elmenekült az országból, és a világ más részein, köztük Dél-Afrikában telepedett le. Az 1950-es években a palaolajkészletek kiürülése miatt üzemanyag-ellátás szempontjából kiszolgáltatott Dél-Afrika a növekvő energiaigény okán még kilátástalanabb helyzetbe került.

A dél-afrikai kormány is felismerte a szintetikus üzemanyag-technológiákban rejlő lehetőségeket, és megalapította a Dél-afrikai Szén-, Olaj- és Gázipari Társaságot (Sasol) az ipar fejlesztésére. A Sasol tudósai német technológiai alapokra támaszkodva hoztak létre szén cseppfolyósítására szolgáló, Fischer–Tropsch-eljárás alapján működő üzemeket, amelyek az ország szintetikusüzemanyag-iparának alapjául szolgáltak. A technológia jól illeszkedett

Dél-Afrika bőséges szénkészleteihez, és megbízható energiaforrást biztosított az ország számára. Idővel a Sasol kifejlesztette saját, egyedi megközelítését a Fischer–Tropsch-folyamathoz, ami végül a technológia kizárólagos tulajdonjogához vezetett, amelyet Synthol eljárásra neveztek át.



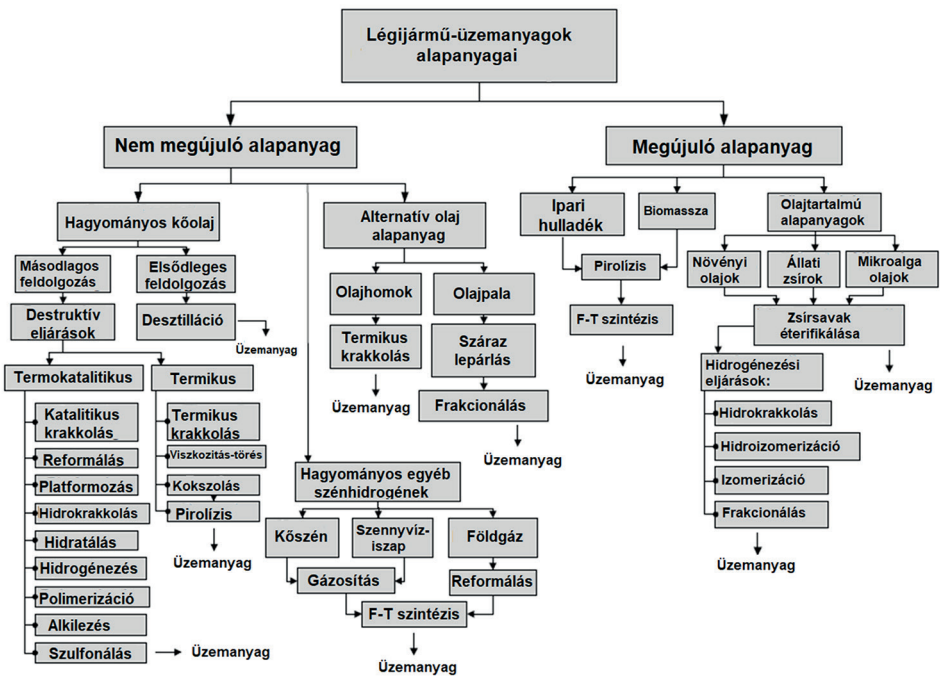
4. ábra
Világpolitikai események hatása a kőolaj piaci árára [7]

A gyártás 1955-ben indult meg, de a rendszer egésze csak 1960-ban működött kielégítően, ami már lehetővé tette a vállalat számára, hogy folyékony üzemanyagok széles skáláját állítsa elő, beleértve benzint, gázolajat és repülőgép-üzemanyagot (SPK – Synthetic Paraffinic Kerosene), amely már a gázturbinás hajtóművekben való felhasználásra is alkalmas volt. A Synthol-folyamat sikeréből adódóan a Sasol újabb létesítményeket hozott létre. Ezeket az üzemeket már sokkal nagyobb, több mint 50 000 hordó napi termelésre tervezték. A létesítmények megépítésére vonatkozó döntés az 1974-es olajembargó és az iráni export 1979-es leállítása, valamint az apartheid miatti embargók kedvezőtlen következményeinek elhárítására született [6]. A cég sikere a szintetikus üzemanyagok fejlesztésében hozzájárult ahhoz, hogy Dél-Afrika vezető szerepet töltsön be az alternatív energiaforrások létrehozásának területén, és hozzájárult az ország gazdasági növekedéséhez és fejlődéséhez is. Ezzel párhuzamosan a világ más, kőolajforrásokban szegény országaiban is megindult vagy újjáéledt a szintetikus üzemanyagok kutatás-fejlesztése. Ezt leginkább a fosszilis tüzelőanyagok környezeti hatásaival kapcsolatos növekvő aggodalom, az olaj világpiaci árának ingadozása, valamint a külföldi olajkészletektől való függéssel összefüggő geopolitikai feszültségek okozták. Ahogyan az a 4. ábrán is látható, a 20. század utolsó negyedében a kőolaj ára nagymértékben ingadozott, ennek megfelelően a szintetikus tüzelőanyagok kereslete ezzel ellenkező változást mutatott. Ezzel párhuzamosan a technológia fejlődésével és a fenntartható repülőgép-üzemanyagok iránti

kereslet növekedésével a szintetikus kerozin előállítása gazdaságilag megvalósíthatóbbá és a repülőipar szereplői számára vonzóbbá vált.

3. Üzemanyagok előállításának lehetőségei

A 20. század végétől napjainkig számos fejlesztés és alternatív megoldás született repülőgép-tüzelőanyagok előállítására, amelyeket az 5. ábra foglal össze. Az elmúlt évtizedekben különféle megújuló erőforrások kutatására is sor került. Ezek fő előnye, hogy természetes eredetűek, nem képeznek többlet szén-dioxidot a légkörben, kevésbé károsak a környezetre, és könnyen lebomlanak.



5. ábra
A repülőgéptüzelőanyag-gyártás technológiáinak osztályozása a felhasznált alapanyag szerint [8]

A felhasznált nyersanyag típusa szerint öt különböző tüzelőanyag-csoportot határozhatunk meg:

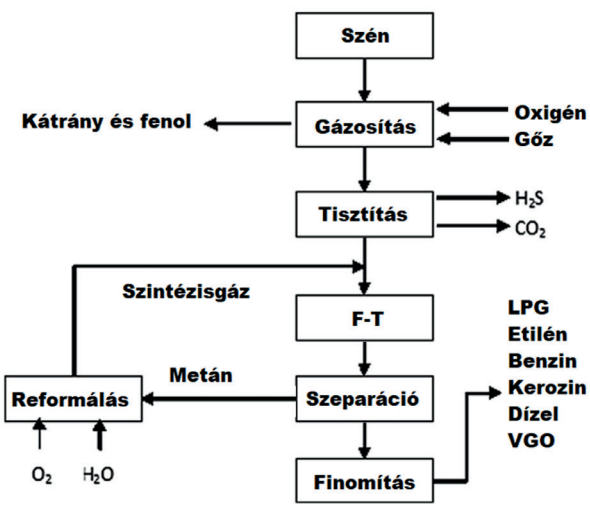
- hagyományos kőolajból származó (legfőképpen paraffinokat, izoparaffinokat, cikloparaffinokat és aromás vegyületeket tartalmaz);
- nem hagyományos olajból (olajhomok és olajpala) származó;
- szintetikus úton földgázból, szénből vagy szén és biomassza kombinációjából, Fischer–Tropsch-eljárással nyert;
- megújuló olajokból származó (biodízel, biokerozin, hidrogénezett növényi olaj – HVO);
- alkoholokból származó (AtJ – Alcohol to Jet) [8].

Ahogy az 5. ábrából látható, a jelenlegi technológiák nagy része továbbra is a különféle fosszilis tüzelőanyagok feldolgozására irányul, mint az olaj, szén, földgáz, olajpala és olajhomok. Azonban egyre nagyobb arányban állítják elő a megújuló alapanyagokból szintetikus úton létrehozott üzemanyagok különböző típusait. A bemutatott öt csoport átfogó vizsgálata túlmutat jelen munka keretein, ezért itt kizárólag a harmadik csoport elemzése történt meg. A Fischer–Tropsch-eljárás útján történő repülőgép-üzemanyag előállítása nagy fokú finomításokon esett át az évek során, de lényege nem változott. Az alábbiakban a szintetikus tüzelőanyagok különböző típusai és a jelenleg legelterjedtebb előállítási technológiák jellemzői tekinthetők át vázlatosan.

A szintetikus tüzelőanyagoknak, alapanyaguktól függően, rendszerint három csoportját különböztetjük meg:

- *CtL* (Coal to Liquid Fuel): szénalapú folyékony üzemanyag, amelynek előállítási folyamata általában két cseppfolyósítási módszerre osztható: direkt és indirekt. Ahogy a nevük is sugallja, a direkt eljárások a szénalapú szénhidrogéneket közvetlenül folyékony tüzelőanyaggá alakítják, míg az indirekt eljárások esetében a 6. ábrán látható módon a Fischer–Tropsch-eljárásban a kiindulási anyag az izzó szénen vízgőz átfúvatásával nyert szintézisgáz:

$$C + H_2O \xrightarrow{1000\,°C\ felett} CO + H_2 \tag{1}$$



6. ábra
Tipikus indirekt széncseppfolyósítási eljárás [10]

A folyamat során szén-monoxidból és hidrogénből álló gázkeverék keletkezik. Elméletileg ez a szintézisgáz 50 térfogat% szén-monoxidból és 50 térfogat% hidrogénből áll. Azért, hogy a Fischer–Tropsch-szintézishez optimális gázösszetételt kapjunk, tovább kell növelni a hidrogéntartalmát. Ezt úgy érik el, hogy 400–500 °C-ra hevített vízgőzzel elegyítve

KOH-tartalmú Fe_2O_3-katalizátoron vezetik át. Ekkor a szintézisgázban levő szén-monoxid a vízgőzzel a következő egyenlet szerint reagál:

$$CO + H_2O \xleftrightarrow{katalizátor} CO_2 + H_2 \tag{2}$$

A kapott gázelegyből a szén-dioxidot vízzel nyomás alatt kimossák, és az így nyert hidrogént vízgázzal a kívánt arányban elegyítik. Ezt követi a gáz megtisztítása a nemkívánatos melléktermékektől, különösen a kén-dioxidtól és a szén-dioxidtól. A gáztisztítási eljárás kulcsfontosságú, mivel mind a kén-dioxid, mind a szén-dioxid gátolja a folyamat optimális teljesítményét. A megfelelő összetételű gázelegyet 10 bar nyomáson, 180 °C-on fém katalizátoron vezetik át. A Fischer–Tropsch-szintézisre alkalmas katalizátorok – főleg vas, kobalt, nikkel és ruténium – közül jelenleg egyedül a vasnak van ipari jelentősége. Az eljárás során különböző szénhidrogének keveréke keletkezik, amely a paraffin-szénhidrogének mellett telítetlen szénhidrogéneket is tartalmaz, amelyekből a szeparációs és finomítási folyamatok után üzemanyagok széles halmazát állítják elő, például benzint, dízelt vagy repülőgép-hajtóanyagot, fűtőgázt vagy cseppfolyósított petróleum gázt (LPG) és viaszokat. Az így kapott kénmentes tüzelőanyagok elégetése során kevesebb nitrogén-oxid kerül a légkörbe. Emellett a folyamatból elektromos energia és műtrágya is kinyerhető. Azonban a CtL gyártási technológiája továbbra is az energiahatékonyság, a környezeti hatások és a gazdasági megvalósíthatóság bizonytalanságával néz szembe, hiszen az előállítási folyamatok vízfelhasználása és szén-dioxid-kibocsátása igen magas [3], [9].

- *GtL* (Gas to Liquid Fuel): olyan színtelen, szagtalan tüzelőanyag, amelynek alapanyaga a földgáz és egyéb gáz halmazállapotú szénhidrogének. A földgázt az egyik legtisztább és legnagyobb mennyiségben előforduló fosszilis tüzelőanyagként tartják számon, hiszen nem tartalmaz ként, nitrogént, aromás vegyületeket, mint a kőolajból előállított üzemanyagok, de szállítása négyszer drágább, mint a kőolajé. Mivel a 2000-es évek elején az olaj világpiaci ára emelkedett, a fosszilis tüzelőanyagok kimerülése és a környezetszennyezés miatt jelentős figyelem irányult az ebben a technológiában rejlő lehetőségekre is. A GtL eljárás kulcsfontosságú eleme a szintézisgáz létrehozása parciális oxidációval, majd ennek kémiai átalakítása hosszabb láncú szénhidrogénekké, amelyekből jellemzően tüzelőanyagok, mint például kerozin, cseppfolyósított kőolajgáz (LPG), közel nulla kéntartalmú benzin, magas cetánszámú dízel, illetve kenőanyagok és viaszok készülnek [11].
- *BtL* (Biomass to Liquid Fuel): biomassza alapú tüzelőanyag, amelynek nyersanyagát több lépésben termokémiai úton hozzák létre magas keményítő- és cellulóztartalmú növényekből, illetve hulladékból és algákból. A biomassza termelési és feldolgozási technológiái terén az elmúlt évtizedben jelentős előrelépés történt. Számos olyan eljárás jött létre, amely során a biomassza biológiai, fizikai és termikus átalakítás útján tüzelőanyaggá alakítható. Ezek közül a pirolízis, amelyet a Fischer–Tropsch-szintézis követ, az egyik legjobb lehetőség repülőgép-üzemanyagok előállítására. A biomasszából, különösen a keményfából származó üzemanyag maximális energiahatékonysága nagyobb, mint a szénből vagy földgázból előállított társaié (77%, 64%, illetve 68%). A biomassza elgázosítása azonban a hagyományos berendezésekben salakosodási és szennyeződési problémákat okozhat, mivel nátriumot, káliumot és egyéb alkálifémeket tartalmazhat [8].

Megállapítható, hogy a biomassza alapanyagként való alkalmazása kettős célt szolgál: a szén-dioxid-kibocsátásból eredő éghajlatváltozás lassítását és a hagyományos hajtóanyagoktól való függőség csökkentését (főleg a közlekedési szektorban). A BtL üzemanyagok csoportja az alapanyag eredete, származása, termőterülete alapján vagy az előállítási technológiai generációk szerint (első, második, harmadik, negyedik) kategorizálhatók. Az első generációsok alapanyagai élelmezésre is alkalmas növényekből származnak, mint például a kukorica, burgonya vagy napraforgó. A magas cukor-, cellulóz- vagy keményítőtartalmú növényekből bioetanol, a magas olajtartalmú növényekből biodízel készül. A második generációs bioüzemanyagok kiindulópontját olyan növények és szerves hulladékok biztosítják, amelyek se emberi élelmezésre, se állati takarmányozásra nem megfelelők, azonban a termesztés továbbra is olyan termőföldön történik, ahol erre alkalmas növények is megélnek. A harmadik generáció fő alapanyaga a különböző mikro- és makroalgák, amelyek általában génmódosításon esnek át annak érdekében, hogy minél ellenállóbbak legyenek és minél több olaj kitermelése legyen lehetséges belőlük. A negyedik generáció esetében már nem közvetlenül a biomasszából, hanem a génmódosított mikroalgák mellett élesztőgombák és cianobaktériumok által szén-dioxidból előállított anyagokból készül. Hosszú távon a BtL üzemanyagok bizonyos tekintetben prioritást élveznek más alternatívákhoz képest, mivel előállításuk technológiai szempontból a legkevésbé terheli a környezetet, azonban alapanyagainak elérhetősége korlátozott lehet, potenciálisan versenyhelyzettel járhat, és etikai kérdések is felmerülhetnek a termőföldek más célra való felhasználhatósága miatt [12].

4. Alternatív repülőgép-tüzelőanyagok szabályozási rendszere

Mivel a szintetikus üzemanyagok előállításának kezdettől fogva alapvető célja, annak dugattyús motorokban való alkalmazása volt, a gázturbinás hajtóművekben történő felhasználás merőben új problémákat vetett fel, ennélfogva a szintetikus kerozin fejlesztése csak jóval később vezetett eredményhez.

Ezeknek a tüzelőanyagoknak szigorú kritériumrendszernek kell megfelelniük, amelyek a kerozin kémiai, fizikai tulajdonságait szabályozzák a polgári és katonai repülés követelményeinek maradéktalan kielégítése érdekében. Ilyen követelmények például:

- magas energiasűrűségük legyen;
- kémiailag, halmazállapotukat tekintve stabilnak kell lenniük, nem léphetnek reakcióba a fedélzeti tüzelőanyag-rendszer elemeivel, berendezéseivel;
- alkalmasnak kell lenniük a repülőgép berendezéseinek, hajtóműve(inek), légkondícionáló rendszerének és hordfelületeinek a kívánt mértékű hűtésére;
- legyenek kompatibilisek a jelenleg alkalmazott repülőeszközökkel és azok kiszolgálásához szükséges infrastruktúrával, lehetőleg változtatás nélkül, vagy minimális átalakítással, korszerűsítéssel [3].

Egy hajtóanyag alkalmazhatóságát különböző nemzeti és nemzetközi szabványok határozzák meg. Ilyenek:

- katonai üzemeltetésben a NATO-szabványoknak való megfelelés;
- UK MOD Defence Standard (az Egyesült Királyság védelmi minisztériumi szabványa) 91-091 „AVTUR";

- ASTM (Egyesült Államok szabványügyi testülete) D7566 Szabványos módszerek szintetikus szénhidrogén tartalmú repülőgép tüzelőanyagokhoz;
- ASTM D1655 Szabvány a repülésben használatos tüzelőanyagok specifikációiról;
- GOST (Oroszország és a FÁK szabványa) 10227 TS-1.

Ezek a specifikációk mind nagyon hasonlók, mivel lényegében ugyanazt az anyagot írják le, azaz a kerozint. Például az ASTM D1655 és a Def Stan 91-91 szinte azonos követelményeket támaszt a Jet A-1-re: a körülbelül 30 vizsgálati kritérium közül csak két kisebb eltérés van a vizsgálati határértékekben (savasságszint és egy naftalintartalomhoz kapcsolódó kritérium). Az energiasűrűséggel, fagyás- és lobbanásponttal, összetétellel, illékonysággal, viszkozitással, szennyeződés- és adalékanyag-tartalommal, valamint egyéb meghatározó tüzelőanyag-jellemzőkkel kapcsolatos összes követelmény azonos. A tüzelőanyagok megfelelő minőségét és specifikációit a repülőeszköz és a hajtómű típustanúsítványa, valamint a helyi előírások határozzák meg, bár a leggyakrabban a fentebb felsorolt szabványokat idézik [13]. Ez az egységes szabályozás kiemelten fontos, hiszen a globálisan érvényes üzemanyag-szabványoknak nem megfelelő tüzelőanyag-típusok felvetnék a kompatibilitás kérdését, és valószínűleg az ellátó infrastruktúra költséges megkettőzését tennék szükségessé. Ennélfogva ezeknek az új tüzelőanyagoknak a piacra lépéséhez 100%-os kompatibilitásra van szükség a meglévő típusokkal [8].

Az ASTM D1655 a hagyományos kőolajból származó tüzelőanyagokkal szemben támasztott követelményeket írja le, a D5766 pedig a szintetikus tüzelőanyagokkal és azok keverékével kapcsolatos előírásokat tartalmazza. Azonban jelenleg a D5766-os szabvány követelményeinek való maradéktalan megfelelés csak hagyományos kerozinnal való keveréssel érhető el. Amennyiben az alternatív tüzelőanyag tanúsítványt kap, attól kezdve ASTM D1655 repülőgép-üzemanyagnak tekintendő, így bekerülhet a hagyományos repülőgépüzemanyag-kezelő, -tároló és -elosztó hálózatba. Az első, hivatalosan is engedélyezett alternatíva az 50%-ban szintetikus kerozint tartalmazó „Félszintetikus" repülőgép-üzemanyag[1] volt, amelynek hitelesítése 1998-ban történt meg, de azóta számos típust elfogadtak [14].

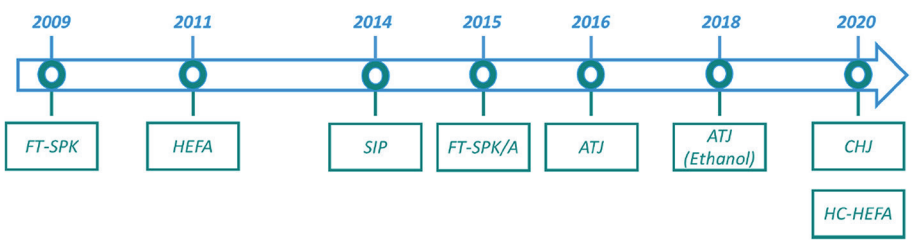
Az alternatív tüzelőanyagok csoportján belül kiemelt fontosságú a fenntartható tüzelőanyagok (SAF) létrehozása. A Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) különbséget tesz az alternatív repülőgép-üzemanyagok (AAF), valamint a SAF között. Az előbbieket kőolajtól eltérő forrásokból állítják elő (szén, földgáz, biomassza, hidrogénezett zsírok és olajok stb.). A SAF-ek pedig olyan AAF-ek, amelyek megfelelnek a fenntarthatósági kritériumoknak. Bár a SAF-nek nincs egységes, nemzetközileg elfogadott definíciója, a Szén-dioxid Kompenzáció és Kiegyenlítő Rendszer a Nemzetközi Repülésben (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA) keretében kísérletet tettek a fenntarthatósági kritériumok meghatározására, annak érdekében, hogy a nemzetközi légi közlekedésből származó üvegházhatású gázok kibocsátása a 2020. évi szintre csökkenthető és ott fixálható legyen [15].

A CORSIA meghatározásának értelmében azt a hajtóanyagot nevezhetjük SAF-nek, amely legalább 10%-os karbonlábnyom-csökkenést ér el a fosszilis tüzelőanyagok 89 g CO_2 e/MJ-hoz képest [16].

Az alábbiakban a jelenleg elfogadott típusok olvashatók, a tanúsítványok kiadásának idővonala pedig a 7. ábrán látható.

[1] Semi-Synthetic Jet Fuel, SSJF.

- A Fischer–Tropsch szintetikus paraffin kerozin *(FT-SPK),* amely a szén, földgáz vagy biomassza fentebb leírt eljárással történő feldolgozásával jön létre. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Fischer–Tropsch szintetikus aromás kerozin *(FT-SKA),* hasonlóan készül a FT-SPK-hoz, de a folyamat során alkilezett benzol hozzáadása történik. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Hidrogénezett észterekből és zsírsavakból előállított szintetikus paraffin kerozin *(HEFA-SPK),* amely a növényi olajok és az állati zsírok hidrogénnel történő redukálásával létrejövő szénhidrogén. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Hidrogénezett szénhidrogének *(HHC-SPK vagy HC-HEFA).* Ennek a típusnak az előállítási folyamata hasonló az előző típushoz, de bővül a megengedett alapanyagok csoportja a biológiai forrásokból előállított tiszta szénhidrogénekre, például a triterpéneket termelő Botryococcus braunii algafajból. Keverési határa legfeljebb 10%.
- A hidrogénezett fermentált cukorból származó szintetikus izoparaffin *(HFS-SIP)* különböző cukrok tiszta paraffin molekulákká alakításával állítható elő fermentációs eljárással. Keverési határa legfeljebb 10%.
- Az alkoholból előállított szintetikus paraffin kerozin *(ATJ-SPK)* jelenleg még csak az izobutanol és az etanol felhasználásával hozható létre. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Katalitikus hidrotermolízissel előállított szintetikus kerozin *(CH-SK vagy CHJ).* Zsírsavak és észterek hidrotermikus átalakításával előállított, hidrogénnel kezelt szintetikus kerozin. Keverési határa legfeljebb 50% [17].



7. ábra
SAF-technológiák tanúsításának idővonala [18]

5. Elért eredmények az alkalmazás területén

A már említett nemzetközi egyezmények által meghatározott szabályozási keretrendszernek való megfelelés érdekében több nagy légitársaság és repülőgépgyártó cég is törekszik az alternatív üzemanyagok minél nagyobb arányú integrálására és ezáltal az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére. Ezt úgy érik el, hogy olyan üzemanyag-előállító vállalatokkal (Velocys, Shell, Fulcrum BioEnergy) kötnek együttműködési szerződéseket és folytatnak közösen kísérleteket, amelyek az alternatív tüzelőanyagok kutatásában és fejlesztésében élen járnak. Ezeknek a kooperációknak az eredményeként számtalan kísérlet történt olyan üzemanyagok felhasználhatóságának tökéletesítésére, amelyek a későbbiekben potenciálisan

helyettesíthetik a Jet A és Jet A-1 típusú üzemanyagokat. Ezek közül néhány kiemelkedő eredményt említünk, a teljesség igénye nélkül.

2008 februárjában egy Airbus A340-es háromórás tesztrepülés során olyan tüzelőanyagot használt, amely 50%-ban tartalmazott GTL-t [19].

Azonban nemcsak a civil, hanem a katonai célú légi járművek üzemeltetésénél is egyre nagyobb szerepet töltenek be a szintetikus és a bioüzemanyagok egyaránt. 2007-ben az Amerikai Légierő B-52-es repülőgépével végzett tesztrepülést, amelynek során az eszköz kerozin és GTL 1:1 arányú keverékével üzemelt. Nagy előrelépést jelentett 2017-ben a GKN RM12 hajtóművel felszerelt JAS-39 Gripen vadászgép (8. ábra), amely 50%-os bioüzemanyag-keverékkel hajtott végre demonstrációs repülést. Ezáltal a GKN Aerospace a Saabbal és a Swedish Defense Material Administration-nel való együttműködése által a fenntartható katonai repülés úttörőjévé vált [20].

8. ábra
Bioüzemanyaggal hajtott JAS-39 Gripen [20]

A KLM Holland Királyi Légitársaság első fenntartható, szintetikus alapú kerozin felhasználásával üzemeltetett Boeing-737 típusú utasszállító járata 2021. január 22-én repült Amszterdamból Madridba. A gép üzemanyagtartályaiban 500 l volt a fenntartható hajtóanyagból [21].

A 2021 márciusával kezdődő projekt keretében egy éven belül három különböző típusú Airbus emelkedett a levegőbe HEFA-SPK típusú üzemanyag-keverék felhasználásával. Először egy Airbus A350 volt 2021 márciusában, majd egy A319neo, végül 2022 márciusában egy A380 [22]. Az Airbus a kereskedelmi repülőgépek mellett a Safran Makila 2 típusú hajtóműveket használó H225-ös helikopterekben is vizsgálta a hígítás nélküli SAF tüzelőanyag-rendszerre gyakorolt hatásait. A kísérletekben részt vevő légi járművek a 9. ábrán láthatók [23], [24].

9. ábra
SAF-el hajtott Airbus A350 (a), A319neo (b) [25], *A380 (c)* [22] *utasszállító repülőgépek és H225 helikopter (d)* [23]

2023. január 30-án az Emirates végrehajtotta mérföldkőnek számító bemutató repülését, amelynek során egy Boeing 777-300ER egyik GE90 típusú hajtóműve 100%-os SAF felhasználásával működött, míg a másik hagyományos kerozint használt. Ez lehetővé tette az üzemanyagok teljesítményének összehasonlítását [26].

6. Felmerülő problémák és lehetőségek

A Jet A és Jet A-1 üzemanyagok számos szénhidrogén egyedi keverékei, amelyeket csupán egyetlen kémiai képlettel nem lehet leírni. A gázturbinás hajtóműveket úgy tervezték, hogy a Jet A és Jet A-1 tulajdonságai kihasználásával működjenek a repülésbiztonság lehető legmagasabb szinten tartása mellett, a lehető legjobb teljesítménnyel. Mivel a jelenleg gyártás alatt lévő, illetve a közelmúltban készült repülőeszközök még évtizedekig üzemelni fognak, ezért egyelőre az alternatív tüzelőanyagokat kell ezek kiszolgálásához igazítani, tehát olyan hajtóanyagok létrehozására kell törekedni, amelyek önmagukban vagy keverve képesek kiváltani a kerozint. Az elégetésen kívül a tüzelőanyag a légi járművek bizonyos rendszereiben hőcserélő közegként funkcionál, illetve a munkafolyadék szerepét is ez tölti be. Bár az égés során a hajtóművekben lejátszódó folyamatokat évtizedek óta tanulmányozzák, továbbra is maradtak ismeretlen elemek. Például a nagy magasságon történő újragyújtás kritikus tényezői nem jellemezhetők jól: a porlasztás, az üzemanyag felületi feszültségének, viszkozitásának, sűrűségének, valamint a levegő hőmérsékletének és nyomásának kölcsönhatása; az üzemanyag nyomása és a molekulák összetétele is fontos szerepet játszik a teljes folyamat megértésében.

Sajnos a jelenleg alkalmazott repülőeszközök 100%-ban alternatív fenntartható tüzelőanyaggal való üzemeltetése még nem megoldott feladat. Ennek oka, többek között,

magas paraffintartalmuk, ezáltal magas dermedéspontjuk, illetve az aromás vegyületek hiánya miatt a repülőeszközök nitril tömítéseire gyakorolt károsító hatásaik.

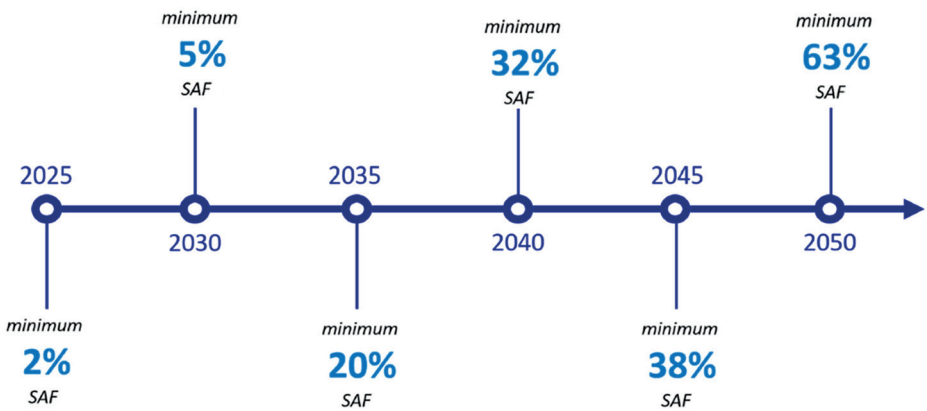
A kerozinnal való keverés nélkül, önmagában alkalmazható szintetikus gázturbinás hajtómű üzemanyagának létrehozására több megközelítés létezik:

- *A hagyományos tüzelőanyagok tulajdonságainak létrehozása egyetlen szintetikus üzemanyagban:* Ez a megoldás a fent említett okokból még nem alkalmazható.
- *A Jet A és A-1 tulajdonságainak létrehozása kevert szintetikus üzemanyagban:* Ez egy aromás és egy nem aromás szénhidrogéneket tartalmazó vegyület kombinálásával lenne kivitelezhető, akár több komponens felhasználása mellett.
- *Az aromás vegyületek helyettesítése vagy a rájuk vonatkozó követelmények csökkentése:* Amennyiben a tüzelőanyagban az aromásszénhidrogén-tartalom túl alacsony, az üzemanyagrendszer tömítései összezsugorodnak, és szivárgás alakul ki. Más vegyületek, például a cikloparaffinok is az aromás vegyületekhez hasonló hatást gyakorolnak a tömítésekre, így ez a lehetőség jelenleg értékelés alatt áll. A későbbiekben bizonyos kutatások azonosíthatnak más helyettesítő molekulákat.
- *Az aromás vegyületeket igénylő anyagok helyettesítése:* Ma már több modern hajtómű esetében megtörtént a nitril tömítések jobb minőségű, ilyen összetevőt nem igénylő, fluorocarbon és fluorszilikon tömítésekre való cseréje. Ennélfogva egy aromás vegyületek nélküli üzemanyag, amely megfelel a Jet A és Jet A-1 összes többi specifikációjának, megfontolandó alternatíva lehet a kompatibilis repülőeszközökben való alkalmazásra. Ez azonban nem lenne „drop-in" a régebbi típusú repülőeszközök esetében, és más jellegű megbízhatósági és repülésbiztonsági aggályokkal kellene szembenézni.
- *A tüzelőanyagokkal szemben támasztott követelmények újradefiniálása:* Lehetséges, hogy a Jet A/A-1 jelenlegi specifikációinak nem mindegyike szükséges a hajtómű és a repülőgép biztonságos működéséhez. Az egyre gyorsuló tempójú kutatás-fejlesztés miatt az új típusú tüzelőanyagok kifejlesztésének üteme és sokrétűsége indokolttá teheti az ASTM minősítési folyamatának és a követelményeknek a frekventáltabb felülvizsgálatát, ami hosszabb távon lehetővé tenné a repülőgéptüzelőanyagok specifikációinak az előzőekben bemutatott lehetőségekhez szükséges módosítását [27].

Azonban nem szabad elfelejteni, hogy a szintetikus tüzelőanyagokra alkalmazott fenntarthatósági követelmények nem egyeznek meg teljesen azokkal a műszaki, biztonsági és teljesítményjellemzőkkel, amelyek az ASTM szabványok alapján a repülőeszközökben felhasználható tüzelőanyagokat minősítik. Tehát abból, hogy az üzemanyag 100%-ban szintetikus még nem következik, hogy 100%-ban fenntartható is. Bár a CORSIA meghatározása világszerte irányadónak tekinthető, egyes nemzetek vagy légitársaságok elkötelezhetik magukat a magasabb fenntarthatósági követelmények mellett.

Mivel a CORSIA szakpolitikai intézkedései nem biztos, hogy elegendők ahhoz, hogy a légitársaságokat SAF-ek alkalmazására ösztönözzék, így az Európai Bizottság közzétette az „Irány az 55%" intézkedéscsomagot, amely az uniós jogszabályok felülvizsgálatát és aktualizálását, valamint új kezdeményezések bevezetését célzó javaslatokat tartalmaz, és az uniós szakpolitikák összhangját hivatott biztosítani az Európai Tanács és az Európai Parlament által elfogadott éghajlat-politikai célokkal. Az intézkedéscsomag célja, hogy 2030-ra 55%-kal

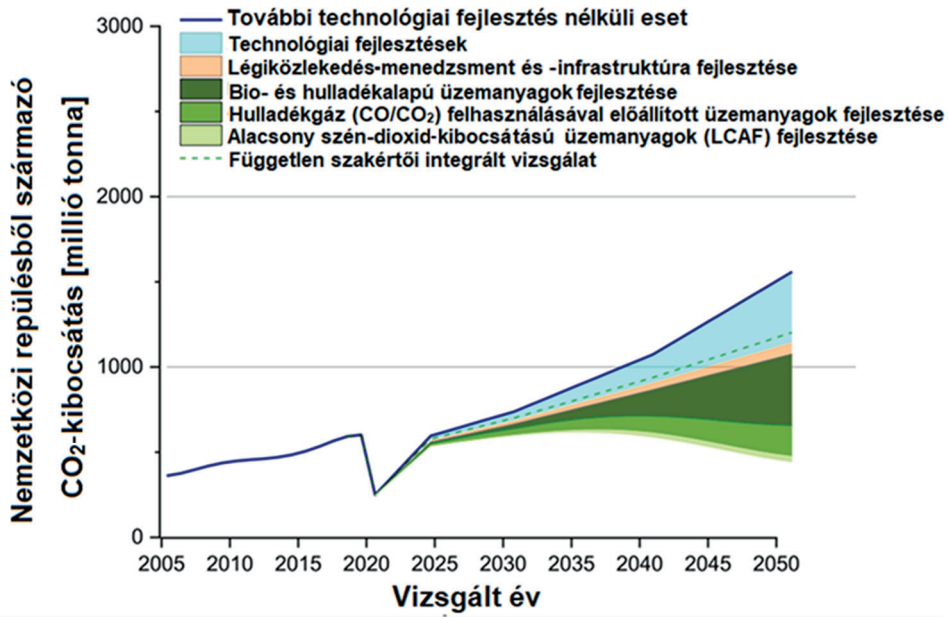
csökkenjen az EU szén-dioxid-kibocsátása. Ez az első alkalom, hogy az EU kötelezővé teszi a SAF-ek alkalmazását az európai repülőtereken. Az üzemanyag-ellátók kötelesek lesznek gondoskodni arról, hogy az üzemeltetőknek szállított összes repülőgép-üzemanyag egy bizonyos százaléka SAF legyen. Az intézkedéscsomag szerint a megbízások 2025-ben 2%-os minimális mennyiséggel kezdődnek, majd ötéves időközönként növekednek, hogy végül 2050-re elérjék a 63%-os mennyiséget [18] (10. ábra).



10. ábra
A SAF bevezetésének javasolt ütemezése a ReFuelEU Aviation rendelettervezet alapján [18]

Ezeket a törekvéseket is számításba véve az ICAO 2022-ben kiadott jelentésében több hosszú távú forgatókönyv megvalósíthatóságát tárgyalja a szén-dioxid-kibocsátás jelentős csökkentésének lehetőségeire, ideértve az ágazaton belüli intézkedéseket, innovatív technológiákat és új típusú üzemanyagokat. Ebben a jelentésben közzétett predikcióban látható a nemzetközi légi közlekedésből származó károsanyag-kibocsátás mértékének lehetséges változása egészen 2050-ig (11. ábra). Itt láthatók azoknak az elemzéseknek az eredményei, amelyek a jövőbeni bio- és hulladékalapú fenntartható repülőgép-üzemanyagok termelési potenciáljáról és előállításukhoz kapcsolódó hatásokról, valamint a fosszilis alapú, illetve alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátású repülőgép-üzemanyagokról adnak becsléseket.

Jelentős technológiai előrelépés nélkül a nemzetközi légi közlekedés szén-dioxid-kibocsátása 2050-ig várhatóan a jelenlegi szint többszörösére fog nőni. 2018-ban a nemzetközi légi közlekedés körülbelül 188 millió t üzemanyagot fogyasztott, ami 593 millió t szén-dioxid-kibocsátást eredményezett. 2050-re az üzemanyag-fogyasztás az előrejelzések szerint a 2018-as érték 1,9-2,6-szeresére nő. A legoptimistább üzemanyag-technológiai fejlesztéseket feltételezve a nemzetközi üzemanyag-hatékonyság várhatóan átlagosan évi 1,53%-kal javul. Ez azt jelzi, hogy az ICAO évi 2%-os tüzelőanyaghatékonyság-javítási célkitűzése 2050-re valószínűleg nem teljesül. A repülőipar hosszabb távon, a légiközlekedés-menedzsment, a légijármű-technológia és az alternatív tüzelőanyagok fejlesztésével együttesen lehet képes megfékezni a légi közlekedésből származó nettó szén-dioxid-kibocsátás növekedését, ez azonban valószínűleg jelentős beruházásokat tesz szükségessé. Ezen túlmenően továbbra is magasak a jövőbeni légi közlekedés fenntarthatósági kérdéseivel kapcsolatos bizonytalanságok [28].



11. ábra
A nemzetközi légi közlekedés nettó CO_2-kibocsátása 2005–2050 között (3,16 kg CO_2/1 kg üzemanyag-elégetést alapul véve) [28]

7. Összefoglalás

Az elmúlt évtizedekben megindult több iparág dekarbonizálásának folyamata, így a repülőiparban is számos kutatás folyik a karbonsemlegességre való átmenet felgyorsítása érdekében. Ebben az átalakulásban kulcsfontosságú szerepet játszanak azok a fenntartható üzemanyagok, amelyek „drop-in" jellegük miatt előnyt élveznek más alternatívákkal szemben, hiszen kompatibilitásuk a jelenlegi repülőeszközökkel és infrastruktúrával lehetővé teszi az azonnali felhasználást. Bár a kőolaj alapú hagyományos üzemanyag-előállítás még mindig világszerte domináns technológia, de a kőolajforrások kimerülése és ehhez kapcsolódóan az üzemanyagárak ingadozása erős ösztönzést nyújtott a légitársaságok számára, hogy fontolóra vegyék az alternatív üzemanyagforrások alkalmazását. Ezek közül a legnagyobb potenciált a Fischer–Tropsch-eljárással, földgázból, szénből és biomasszából előállított tüzelőanyagok hordozzák magukban. Emellett több nemzetközileg elfogadott eljárással lehetséges kiváló minőségű szintetikus paraffin kerozin (SPK) előállítása megújuló alapanyagokból, mint például növényi olajok, állati zsírok, algák és hulladékok. Azonban a nemzetközi szabványokban meghatározott kritériumok miatt ezek egyelőre csak hagyományos tüzelőanyaggal való keverés mellett alkalmazhatók. Ennélfogva további lépések nélkül ez csupán átmeneti megoldás. A fenntartható légi közlekedés hosszú távú fejlődésének biztosítása érdekében a repülőiparnak törekednie kell a 100%-ban SAF alternatív tüzelőanyagok felhasználására és az ehhez szükséges technológiai

feltételek megteremtésére. A jelenlegi technológiai akadályok átlépésével és több alternatív meghajtási mód párhuzamos alkalmazásával hosszú távon lehetővé válhat a fosszilis függőség megszüntetése. Azonban ahhoz, hogy ez valósággá válhasson, elengedhetetlen a légi közlekedési ágazatban részt vevők és a politikai döntéshozók együttműködése.

Felhasznált irodalom

[1] Óvári Gy., *Alternatív energiák a repülésben. Karbonsemleges vagy karbonmentes repülőtér?* GINOP AF KKT Referátum, Szolnok, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2019.

[2] Óvári Gy., Fehér K., „Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségszerűség kompromisszumokkal II. rész," *Haditechnika,* 55. évf. 1. sz. pp. 15–19. 2021. Online: https://doi.org/10.23713/HT.55.1.03

[3] Óvári Gy., Szegedi P., „Alternatív üzemanyagok alkalmazásának lehetőségei a repülésben," *Repüléstudományi Közlemények,* 22. évf. 2. sz. pp. 29. 2010.

[4] M. Crippa et al., *CO2 Emissions of All World Countries –2022 Report*. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2022.

[5] A. N. Stranges, „The US Bureau of Mines's Synthetic Fuel Programme, 1920–1950s: German Connections and American Advances," *Annals of Science,* 54. évf. 1. sz. pp. 29–68. 1997. Online: https://doi.org/10.1080/00033799700200111

[6] P. Hilsenrath, „The Development of Synthetic Fuels in South Africa," *Journal of Energy and Development,* 14. évf. 2. sz. pp. 269–284. 1989.

[7] J. Ross, „Visualizing Historical Oil Prices (1968–2022)". *Advisor Channel,* 2022. május. 4. Online: https://advisor.visualcapitalist.com/historical-oil-prices

[8] S. Boichenko, O. Vovk, A. Yakovleva, „Overview of Innovative Technologies for Aviation Fuels Production," *Chemistry and Chemical Technology,* 7. évf. 3. sz. pp. 305–312. 2013. Online: https://doi.org/10.23939/chcht07.03.305

[9] Gál T., Ábrahám J., Némethné Dr. Sóvágó J., *Petrolkémiai technológiák*. Budapest, Miskolci Egyetem, 2011.

[10] G. Liu, B. Yan, G. Chen, „Technical Review on Jet Fuel Production," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 25. évf. pp. 59–70. 2013. Online: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.025

[11] O. L. Eliseev, „Gas-to-Liquid Technologies," *Russian Journal of General Chemistry,* 79. évf. 11. sz. pp. 2509–2519. 2009. Online: https://doi.org/10.1134/S1070363209110395

[12] Fehér K., Óvári G., „A mikroalgák felhasználási lehetőségei a biodízel üzemanyagok előállításában," *Repüléstudományi Közlemények,* 29. évf. 2. sz. pp. 119–136. 2017.

[13] E. P. Fedorov et al., „Standards Requirements for Domestic and Foreign Jet Fuels for Civil Aviation," *Chemistry and Technology of Fuels and Oils,* 40. évf. 4. sz. pp. 211–214. 2004. Online: https://doi.org/10.1023/B:CAFO.0000041216.52513.ab

[14] M. Braun-Unkhoff et al., „About the Interaction between Composition and Performance of Alternative Jet Fuels," *CEAS Aeronautical Journal*, 7. évf. 1. sz. pp. 83–94. 2016. Online: https://doi.org/10.1007/s13272-015-0178-8

[15] C. Eulalia, S. Jaan, *Sustainable Aviation Fuels*. Belgium, European Parliamentary Research Service, 2020. Online: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659361/EPRS_BRI(2020)659361_EN.pdf

[16] M. Prussi et al., „CORSIA: The First Internationally Adopted Approach to Calculate Life-cycle GHG Emissions for Aviation Fuels," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 150. évf. p. 111398. 2021. Online: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398
[17] J. Pechstein, A. Zschocke, „Blending of Synthetic Kerosene and Conventional Kerosene," *Biokerosene: Status and Prospects,* pp. 665–686. 2018. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_25
[18] N. Detsios et al., „Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review," *Energies,* 16. évf. 4. sz. p. 1904. 2023. Online: https://doi.org/10.3390/en16041904
[19] Fehér K., „Alternatív tüzelőanyagok alkalmazása a repülésben," *Műszaki Katonai Közlöny,* 28. évf. 2. sz. pp. 43–56. 2018.
[20] GKN Aerospace, *GKN Aerospace continues jet engine biofuel testing.* 2020. június 26. Online: https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2020/gkn-aerospace-continues-jet-engine-biofuel-testing
[21] KLM, *World first in the Netherlands by KLM, Shell and Dutch ministry for Infrastructure and Water Management: first passenger flight performed with sustainable synthetic kerosene.* 2021. február 8. Online: https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene
[22] Airbus, *First A380 powered by 100% Sustainable Aviation Fuel takes to the skies.* 2022. március 28. Online: https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-03-first-a380-powered-by-100-sustainable-aviation-fuel-takes-to-the
[23] Airbus, *First Airbus helicopter flight with 100% sustainable aviation fuel.* 2021. november 9. Online: https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-first-airbus-helicopter-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel
[24] ECLIF3 Study Resumes with 100% SAF Powering Both Engines of A350. *Travel News Asia,* 2021. november 3. Online: https://www.travelnewsasia.com/newspics/2021/AirbusA350flightlab.jpg
[25] Kárpáti D., „Higítás nélküli alternatív üzemanyaggal repült egy A319-es," *AirPortal,* 2021. október 31. Online: https://airportal.hu/higitas-nelkuli-alternativ-uzemanyaggal-repult-egy-a319-es/
[26] Emirates, *Emirates Successfully Tests Flying Boeing 777 Plane on Sustainable Jet Fuel.* 2023. január 31. Online: https://www.emirates.com/media-centre/emirates-operates-milestone-demonstration-flight-powered-with-100-sustainable-aviation-fuel
[27] S. Kramer et al., „Perspectives on Fully Synthesized Sustainable Aviation Fuels: Direction and Opportunities," *Frontiers in Energy Research,* 9. évf. p. 782823. 2022. Online: https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.782823
[28] G. G. Fleming, I. de Lépinay, R. Schaufele, „Environmental Trends in Aviation to 2050," in *Innovation for Green Transition ICAO Environmental Report,* pp. 24–31. 2022.

The Issues of Synthetic Fuel Use in Aviation

In recent years, an extraordinary amount of greenhouse gases have entered the atmosphere, a non-negligible part of it is related to aviation. Different types of synthetic fuels seem to be one of the most promising alternatives to replace the currently used crude oil, which has been produced since the 1930s. Due to their „drop-in" nature, their main properties are the same as conventional jet fuels, so they are compatible with most types of aircraft. However, the production of synthetic fuels in many cases involves a difficult or much more expensive process than in the case of traditional kerosene. Many plans have already been created to solve these problems. The implementation and the development of new procedures are currently underway, taking into account the goal of achieving carbon-neutral and then carbon-free military and civil aviation by the deadlines of 2030 and 2050. In this article, synthetic alternative fuels are presented, which could potentially be suitable for replacing kerosene. My aim is to present the most important results achieved so far and to predict the possible future of the use of synthetic fuels.

Keywords: *SAF, synthetic fuel, Fischer-Tropsch process, emission of harmful gases, drop-in fuels*

Csató Péter
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola

csato.peter@tud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

Péter Csató, MSc
PhD student
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Doctoral School of Military Engineering
csato.peter@tud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal
Az NKFI Alapból megvalósuló program

REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
35. évfolyam (2023) 1. szám 257–274. • DOI: 10.32560/rk.2023.1.18

Békési Bertold, Gajdács László, Knapiczius Attila

Drónok meghajtás szerinti lehetséges szerkezeti felépítései

A pilóta nélküli légi járművek (UAV-k) kritikus platformokként jelentek meg különböző területeken, beleértve a megfigyelést, a felderítést, a logisztikát és a légi fényképezést. A meghajtórendszerek döntő szerepet játszanak az UAV-k hatékony és megbízható működésének lehetővé tételében. Az ideális meghajtórendszer kiválasztása számos tényezőtől függ, például a feladat követelményeitől, a repülés időtartamától, a hasznos teherbírástól és a környezeti/környezetvédelmi szempontoktól. Míg a múltban a belső égésű motorok domináltak, kedvező tulajdonságaik miatt egyre nagyobb teret nyernek az elektromos és hibrid rendszerek. A meghajtástechnológia folyamatos fejlődése ígéretesnek bizonyul, a jövőben nagy teljesítményű, hatékonyabb és környezetbarátabb UAV-k gyártását teheti lehetővé. Ez az összefoglaló áttekintést nyújt az UAV-kban használt különböző meghajtási rendszerekről, kiemelve azok legfontosabb jellemzőit, előnyeit és kihívásait.

Kulcsszavak: *UAV, meghajtás, hibrid konfiguráció, architektúra*

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedben robbanásszerűen megnőtt a pilóta nélküli légi járművek (UAV-k), más néven drónok, pilóta nélküli légi/repülőgépes rendszerek (UAS) vagy távirányítású repülőgépes rendszerek (RPAS) alkalmazásainak száma.

A drónok fejlődésének egyértelmű alappillérei, amelyek megkövetelik napjainkban is az eszközök továbbfejlődését, a tudomány és technika előrehaladása. Egyértelműen kijelenthetjük, hogy a kor és tudomány haladtával eszközeink kisebbek, kompaktabbak, intelligensebbek, és akár kompatibilisek más eszközökkel [6]. A technológiai folyamatok terén az elmúlt években a mesterséges intelligencia [31] és a mikroprocesszoros technológia fejlődésével az UAV-k egyre nagyobb figyelmet kaptak, amelynek eredményeképpen olyan légi robotokká váltak, hogy összetett feladatokat is képesek ellátni [22], [23], [37]. A kutatás és a fejlesztés egyre inkább az autonóm működés és a többcélú feladatok végrehajtása irányába tolódik, amit a mesterséges intelligencia kutatása és további fejlesztése tud megfelelően támogatni [16]. Könnyű használhatóságukkal, biztonságosságukkal, alacsony költségükkel és környezetbarát jellegükkel az UAV-k különféle típusú veszélyes, nagy hatótávolságú és hosszú távú küldetéseket hajthatnak végre katonai és polgári területeken, és így egyre nagyobb részt foglalnak el a légi járművek piacán. A világ országai szintén nagy jelentőséget tulajdonítanak a különféle UAV-technológiák fejlesztésének, hogy megfeleljenek a különféle küldetési követelményeknek [37].

A légi járművek tervezésének korai szakaszában, amikor a rendszert alkotó elemek összessége még nem áll tökéletesen össze, lehetőségünk nyílik arra, hogy a kívánt hatást és célt elérve a hagyományos megvalósítások mellett olyan megoldásokhoz is folyamodhassunk, amelyek csak évtizedekkel később jelennek meg a konvencionális kialakítások után, de lehetővé teszik egy-egy cél hatékonyabb végrehajtását [2].

Jelenleg az UAV-knak számos típusa létezik, és különböző területeken használják őket, a polgári és a katonai repüléstől kezdve. Ezért számos kritériumot javasoltak az UAV-k különböző csoportokba osztályozására [27]. Vagyis a kategorizálásnak célja általában az, hogy valamilyen kritériumok szerint rendezett és egységes képet nyújtson a további vizsgálatokhoz [5]. A drónok különböző paraméterek alapján különféle osztályozásokkal rendelkeznek, azaz az UAV-kat feloszthatjuk a következők szerint:

- feladat típusa (polgári vagy katonai) [5];
- a repülési zóna típusa (beltéri és kültéri) [5];
- a műveleti környezet (földi, légi, felszíni, víz alatti, űrbéli) [5], [33];
- felépítés (merev-, forgószárnyas, hibrid és biológiai alapúak) [5], [8], [9], [10], [11], [27];
- felhasználás módja (egyszeri és többszöri) [8], [9], [10], [11];
- a meghajtás módja (dugattyús, gázturbinás és elektromotoros) [8], [9], [10], [11];
- az irányítás módszere [autonóm (programvezérelt), megosztott autonóm (kombinált vezérlésű) és távműködtetésű (távirányítású) [1], [8], [9], [10], [11];
- az indítás módja (földi és légi indítású) [8], [9], [10], [11];
- visszatérés módja (leszállással, ejtőernyővel, elfogó hálóval) [8], [9], [10], [11];
- repülési jellemzők (sebesség, magasság, hatósugár, repülési időtartam) alapján is [8], [9], [10], [11].

A felhasználók szempontjából a fő jellemzők, amelyek alapján összehasonlítják és kiválasztják az UAV-kat: a repülés időtartama, a hatótávolság, a hasznos teher felhasználhatósága, alkalmazhatósága, illetve fizikai méretei [3], [7]. Fontos szempont a légi járművek esetében, hogy milyen sebességgel képesek repülni, mekkora a hasznos terhelhetőségük, illetve milyen hatótávolságra tudnak eljutni. Ebben az esetben is a légi jármű feladatkörének megfelelően vannak, amelyeket kisebb vagy nagyobb távolságra alkalmaznak, illetve a sebesség tekintetében is, ha a feladatkör azt kívánja, akkor hangsebesség feletti sebességgel repülő légi jármű is rendelkezésre áll már napjainkban [5], [14]. Az 1. táblázat az UAV-k előnyeit és hátrányait mutatja be különböző paraméterek, jellemzők alapján [27].

1. táblázat
UAV-típusok összehasonlítása (Békési Bertold [27] alapján)

UAV típusa	merevszárnyas	forgószárnyas	csapkodószárnyú
Ár	közepes	közepes	magas
Manőverező képesség	alacsony	magas	közepes
Gyártás és javítás	közepes	közepes	magas
Hatótávolság	magas	közepes	alacsony
Repülésbiztonság	közepes	közepes	alacsony
Energiafelhasználás	alacsony	magas	közepes
Polgári alkalmazás	közepes	magas	közepes
Katonai alkalmazás	magas	közepes	alacsony

A táblázatból látható például, hogy a forgószárnyas UAV-kat (multirotor) gyakrabban használják mind a polgári, mind a katonai alkalmazásokban, olyan előnyök miatt, mint a költség és a nagy manőverezhetőség [27]. 2004-ben az UAV-gyártás 98%-a katonai célú volt. A polgári alkalmazásokban használtak többsége katonai UAV-fejlesztésre vezethető vissza. A polgári felhasználásra szánt drónok nagyon kis és jelentéktelen arányt képviseltek (körülbelül 2%) a katonai célokra használt UAV-khoz képest. A fennmaradókat katonai, kereskedelmi és nem kormányzati szervezetek üzemeltették, a katonai és a kereskedelmi piac között jelentős átfedésekkel [28]. Abban az időben a katonai területen leginkább a merevszárnyúakat használták. Az UAV-kon elérhető tudomány és technológia fejlődésével és népszerűségével a forgószárnyas eszközök egyre népszerűbbek lettek a hobbisták, a kereskedelmi szervezetek és a kormányok számára is. 2019-es adatok alapján az USA-ban a forgószárnyas UAV-k a globális piaci részesedés 62,6%-át tették ki, míg a merevszárnyúak 25,4%-ot, a hibrid pedig 12%-ot [35].

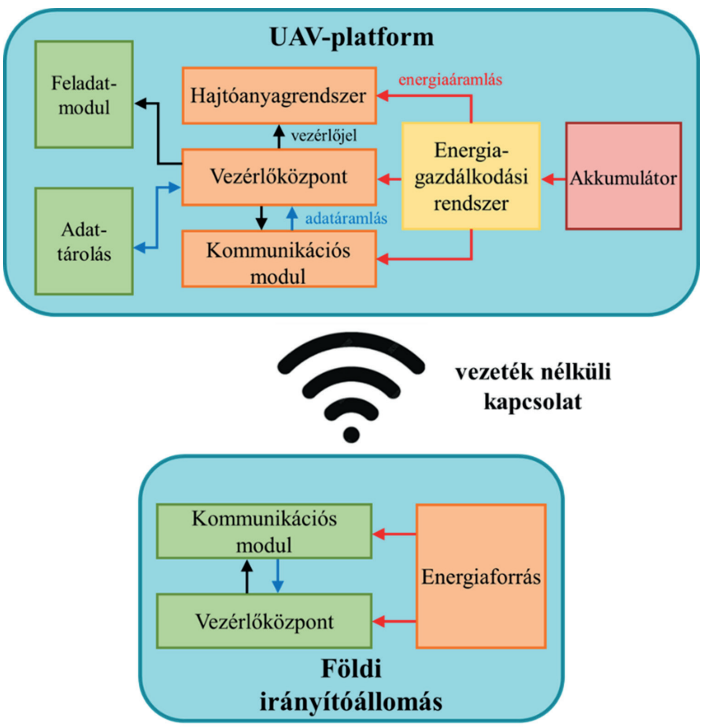
A forgószárnyas drónok energiafogyasztásának problémája azonban még mindig nagy kihívást jelent, mivel gyakran sok elektromos motort használnak (4, 6, 8, 10, 12), így az ehhez felhasznált energia nagyon nagy, ami a forgószárnyasok repülési idejét rövidebbé teszi (a kereskedelmi forgalomban kapható forgószárnyas UAV-k repülési ideje általában kevesebb, mint 1 óra) [27]. A pilóta nélküli légi járművek meghajtási technológiája jelentős mértékben kapcsolódik az UAV-k repülési teljesítményéhez, amely a repülés egyik legfontosabb fejlesztési irányává vált. A cikkben a szerzők az UAV-k meghajtási lehetőségeit tárgyalják (üzemanyag-, üzemanyag–elektromos hibrid és tisztán elektromos UAV-meghajtórendszerek), kiemelve azok legfontosabb jellemzőit, előnyeit és kihívásait.

2. UAV-k meghajtórendszerének konfigurációja

Az UAV tervezésénél és építésénél az egyik legfontosabb feladat, hogy a rendszer a lehető leghosszabb ideig működőképes legyen, ami a drón élettartamának növelését jelenti. Ennek a problémának a megoldására számos módszert alkalmaznak, például az UAV-formák optimális aerodinamikai paraméterekkel való tervezése a súrlódás és az aerodinamikai ellenállás csökkentése érdekében, vagy az UAV-rendszer tömegének csökkentése. Ezeknek a módszereknek számos előnye van, de amikor elérnek egy bizonyos szintet, nehéz továbblépni. Egy másik megközelítés, amelyre számos kutató összpontosította kutatásait, az UAV-k energiaellátásának megoldása. A pilóta nélküli légi jármű energiatároló rendszer kapacitáskorlátozása az UAV-alkalmazások szempontjából kulcsfontosságú műszaki kihívás. Az UAV-típusok közül a multirotor az egyik leggyorsabb energiafogyasztású gép. Legtöbbjük akkumulátorának élettartama kevesebb mint 60 perc. E probléma megoldására két lehetőség van: az akkumulátor kapacitásának növelése és az akkumulátor feltöltése. Az akkumulátor kapacitásának növelése esetén azonban ennek a lehetőségnek van néhány hátránya, amikor a jelenlegi akkumulátortechnológia meglehetősen korlátozott. Egészen pontosan az akkumulátor kapacitásának növelésével nő az akkumulátor tömege, amelyet az UAV-nak magával kell vinnie. Számos módszert vizsgáltak az akkumulátorban lévő energiasűrűség növelésére, de még nem történt nagy előrelépés. Az UAV működési idejének növelése érdekében a kutatás és fejlesztés középpontjában az akkumulátor külső forrásból való újratöltésének módszere áll. Az akkumulátor töltésére két módszer létezik: a vezeték nélküli és a vezetékes töltés. A jelenlegi vezetékes töltési technikának vannak korlátai, például a bonyolultság, a nem megfelelő

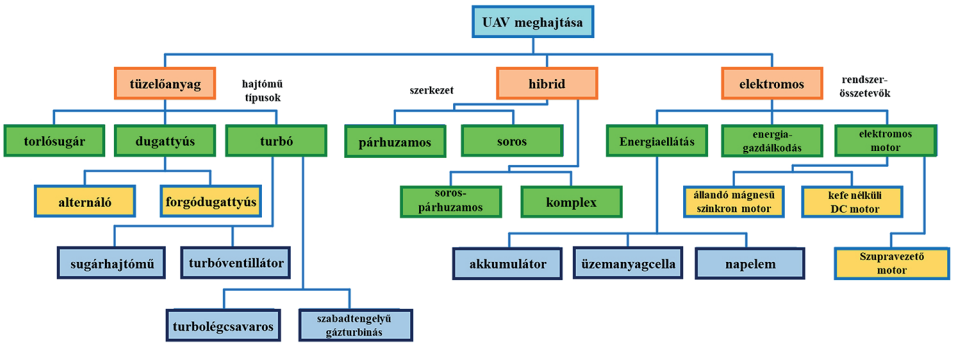
mobilitás és az alacsony hatékonyság. Eközben a vezeték nélküli töltési technika megoldotta a vezetékes töltés korlátait, amivel kellően nagyobb mozgásszabadságot biztosít. Az UAV-k hosszabb ideig és folyamatosan működhetnek anélkül, hogy töltés céljából vissza kellene térniük a bázisukra. A vezeték nélküli töltési módszerek széles skáláját kutatták és fejlesztették ki a hatékony akkumulátortöltési technika megtalálása érdekében. Ezeknek a módszereknek megvannak a maguk előnyei és hátrányai – ezt a területet nem tárgyaljuk a tanulmányunkban –, amivel a [27] irodalom foglalkozik részletesebben.

A tervezett küldetés pontos teljesítése érdekében az UAV-nak és az őt támogató rendszereinek stabilan és rendezetten kell együttműködniük. Általánosságban az UAV-k légi járműből, földi vezérlőrendszerből, hasznos teherrendszerből és adatkommunikációs rendszerből állnak. Néhány nagy UAV-nak gyakran szüksége van egy felszállási és helyreállítási, valamint földi támogató rendszerre és más alkatrészek támogatására is (1. ábra).



1. ábra
Pilóta nélküli repülőgéprendszerek összetétele (Békési Bertold [37] alapján)

A meghajtórendszer az UAV teljesítményének magja, általában energiaforrásokból és hajtóművekből (teljesítményegységekből) áll, amelyek magukban foglalják a hajtóműveket és az elektromos motorokat. Az energiaforrások szerint az UAV meghajtórendszerei nagyjából három típusba sorolhatók, beleértve az üzemanyagot, a hibrid üzemanyag–elektromos és a tisztán elektromos rendszert (2. ábra).



2. ábra
Az UAV-hajtóművek osztályozása az energiatípusok alapján (Békési Bertold [37] alapján)

Ezek közül a hagyományos üzemanyag-meghajtású rendszerek több kategóriába sorolhatók, mint például dugattyús, gázturbinás és sugárhajtóműves motorok a különbség szerint [37]. A dugattyús motorral hajtott járművek általában egy- vagy többhengeres (kettő, négy) változatban vonó, illetve toló légcsavarral készülnek. Előnyük, hogy kevésbé zajosak, megbízhatók, és kevés kiegészítő berendezés szükséges működésükhöz [15]. A gázturbinás hajtóművek a propulzió létrehozásának módjától függően lehetnek: sugárhajtóművek (egyáramú-, és kétáramú sugárhajtóművek); turbólégcsavaros hajtóművek; légcsavar-ventilátoros hajtóművek [30].

A hagyományos üzemanyag-meghajtási rendszereket használó UAV-k előnye a nagy hasznos teher, a hosszú repülési időtartam, kiterjedt hatótáv, a gyors utántöltés lehetősége. Ezek azonban zajjal és károsanyag-kibocsátással járnak és rendszeres, összetett karbantartást igényelnek. A növekvő környezeti problémák és a fosszilis tüzelőanyagok kimerülése miatt azonban a repülőgépek energiaproblémája folyamatos kihívássá vált; így most a hibrid és a tisztán elektromos UAV-k állnak a figyelem középpontjában. A hibrid meghajtási rendszer egy hajtóműből és egy villanymotorból áll, amelyek együttesen állítják elő a repülőgép repüléséhez szükséges energiát, ami a hagyományos üzemanyag-meghajtáshoz képest mintegy 30%-os üzemanyag-fogyasztást takarít meg [37].

Az elektromos meghajtási rendszerek akkumulátorokat vagy üzemanyagcellákat[1] használnak energiaforrásként, amelyek nagyobb hatékonyságot és környezeti fenntarthatóságot biztosítanak. Az általuk használt elektromos motorok viszont egyre népszerűbbek alacsony zajszintjük, csökkentett károsanyag-kibocsátásuk és egyszerűsített karbantartási követelményeik miatt. Az elektromos meghajtású UAV-k számára azonban továbbra is kihívást jelent a korlátozott energiatárolási kapacitás és a rövidebb repülési időtartam [37].

[1] Az üzemanyagcella egy galvánelem, amely átalakítja az üzemanyag kémiai energiáját elektromos energiává. Az üzemanyagcellák működésük során nem juttatnak a környezetükbe olyan káros anyagokat, mint a hagyományos tüzelőanyagok (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, illetve lebegő részecskék), így akár környezetbarátnak is nevezhető (lenne). Viszont a hidrogén betáplálásúak vízgőzt bocsátanak ki magukból, ami a magasabb légrétegekben, ahol a légi járművek közlekednek, hozzájárul az üvegházhatáshoz. Ezenkívül, a működéshez szükséges hidrogén előállítása jelenleg döntő hányadában nem környezetbarát technológiákkal, fosszilis eredetű energiahordozók felhasználásával történik (pl. gőz-, katalitikus reformálás, elektrolízis), ami így kizárja a H2 környezetbarát besorolását [4], [26].

3. Hagyományos üzemanyag-meghajtó rendszer UAV-hoz

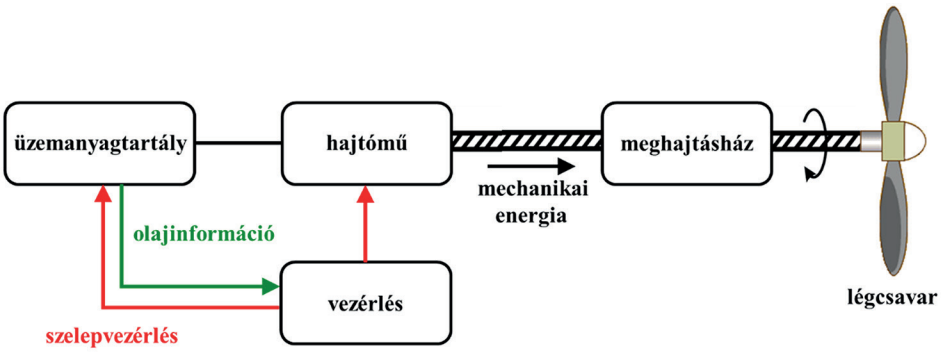
A hagyományos tüzelőanyagok töltik be a legnagyobb szerepet a repülőgépek üzemeltetésében. A pilóta nélküli légi járművek esetében viszont ez már korántsem igaz, így egyértelműen nem jelenthető ki. Az UAV üzemanyag-meghajtási rendszere az a mechanizmus, amely lehetővé teszi a pilóta nélküli légi járművek számára a repülés elérését és fenntartását az üzemanyag mechanikai energiává alakításával. Ennek a rendszernek az elemei a legelterjedtebbek nemcsak légi, de más közlekedési módok esetében is, hiszen a technológia egyik legrégebbi és legfinomabban csiszolt ága. Ellentétben a feltörekvő új rendszerekkel, az eljárás működésének szinte minden előnye és hátránya ismert, így a megfelelő infrastruktúra és gyártási eljárások rendszerei is rendelkezésre állnak [25].

Az üzemanyaggal működő UAV-k alapvetően két kategóriába sorolhatók: dugattyús és turbinás motorok. A légi járművek hajtóműveinek részletes felosztásával a [9], [17], [30], [36] irodalmak foglalkoznak. A 2. táblázat a különböző hajtóművek teljesítmény-összehasonlítását mutatja be. A polgári és a katonai repülőgépekhez képest az UAV-k többségében sokkal kisebb méretűek. Ezért, bár a hajtóművek alapjai megegyeznek a nagy repülőgépekével, az UAV-khoz alkalmas hajtóműveknek számos jellemzővel kell rendelkezniük, beleértve a hosszú élettartamot, a kis térfogatot, a nagy teljesítmény-tömeg arányt, a robusztusságot és a könnyű karbantartást. Hatásfokát tekintve a legideálisabb meghajtási forma az üzemanyagok energiasűrűségének köszönhetően.

2. táblázat
Különböző típusú hajtóművek és UAV-k repülési jellemzői (Békési Bertold [37] alapján)

Típus	Hajtómű jellemzői			UAV jellemzői			
	kimeneti teljesítmény	fordulatszám	teljesítmény–tömeg arány [kW/kg]	sebesség [km/h]	repülési magasság [m]	repülési idő	tömeg [kg]
dugattyús motor	20–400 LE	3000–7000	0,76–1,37	110–260	2500–9700	< 40	< 1150
forgódugattyús motor	< 120 LE	6000–12 000	< 4,1	–	2500–8000	–	< 1000
sugárhajtómű	< 170 kN	–	< 10	700–1100	3000–14 000	< 2,5	< 2500
nagy kétáramúsági fokú gázturbinás hajtómű	< 560 kN	–	< 11	500–1100	3000–20 000	< 42	< 12 000
turbólégcsavaros hajtómű	< 1000 LE	1000	< 4	350–500	14 000–16 000	< 32	< 3200
szabadtengelyű gázturbinás hajtómű	< 9000 LE	–	3–7	180–300	4000–6100	< 4	< 1500

Az UAV üzemanyag-meghajtó rendszere általában egy üzemanyag-ellátó rendszerből, hajtóműből/elektromos motorból, mechanikus erőátvitelből és légcsavarból áll (3. ábra). A rendszer felépítéséből ismert, hogy a hajtómű/motor kétségtelenül az üzemanyag-meghajtó rendszer magja, amely az energiaátalakítás és az UAV-tápegység szerepét tölti be.



3. ábra
Üzemanyag-meghajtás architektúrája (Békési Bertold [37] alapján)

Mivel jól bevált eljárásról beszélünk, a szükséges infrastruktúra és a karbantartáshoz szükséges követelmények ebben az esetben állnak a leginkább rendelkezésre [37].

4. Hibrid meghajtás

Az UAV-k üzemanyagmeghajtó rendszereinek fejlesztése egyre érettebbé válik. A kőolajkészletek kimerülése vagy a károsanyag-kibocsátás növekedése miatt egyre súlyosbodó éghajlati viszonyok mind jól mutatják, hogy a jól bevett, hagyományos eljárások kezdenek elavulttá válni, és nem elégítik ki az új kor követelményeit [37]. Hasonló akadályokat állít fel az egyes országok külpolitikája. Nincs olyan állam, amelynek a gazdasága teljes mértékben független lehetne, a természeti erőforrások szétszórtan találhatók meg a Föld különböző pontjain, így a gyártást más országok gazdaságpolitikája is befolyásolja [34].

A hibrid-elektromos repülőgépek vizsgálata a légi közlekedés jövőjének egyik lehetséges megoldása, és akár végleges választ is jelenthet az olyan kihívásokra, mint a repülés gazdaságossága, az üzemanyag-hatékonyság növelése, a csendesebb gépek és a szennyező anyagoktól mentes levegő, az Európai Unió *Flightpath 2050 Vision* című dokumentuma szerint [12]. A légi közlekedés jövőbeli fejlődését a *Flightpath 2050 Vision,* a NASA N+ stratégiája, az FAA[2] és az ICAO[3] által megfogalmazott környezetvédelmi célok teljesítésének követelményei határozzák meg. A legambiciózusabb célokat az Európai Unió *Flightpath 2050 Vision* tűzte ki, amely a 2000. évi állapothoz (SOA[4]) viszonyítva 65%-kal csökkenti az érzékelt zajkibocsátást, 75%-kal az utaskilométerenkénti szén-dioxid-kibocsátást és 90%-kal a nitrogén-oxidok (NOx) kibocsátását [12], [29].

A NASA N-plusz sorozata három fejlett generációs repülőgép stratégiai fejlesztési céljait vázolja fel a jövőbeni időkeretben: N+1, N+2 és N+3, ahol az „N" a jelenleg használatban

[2] FAA – Federal Aviation Administration: Szövetségi Légügyi Hivatal.
[3] ICAO – International Civil Aviation Organization: Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet.
[4] State-of-the-art: a legkorszerűbb.

lévő repülőgépekre utal. A legszigorúbb követelményeket az N+3-as időkeretbe tartozó repülőgépekre vonatkozóan fogalmazták meg; a célok között szerepel a 2005-ös szinthez képest 80%-os NOx-kibocsátáscsökkentés az utazórepülés során, 60%-os üzemanyag-csökkentés a 2005-ös SOA-szinthez képest, és 52 decibelben kifejezett effektív érzékelhető zajszint (EPNdB[5]) kumulatív csökkentése a Szövetségi Légügyi Hivatal által meghatározott 4. fokozatú zajszinthez képest. Az ENSZ Nemzetközi Polgári Repülési Szervezete szigorúan felszólított a légi közlekedés nettó CO_2-kibocsátásának 2050-re vonatkozó felső határértékének meghatározására [29].

Az elképzelések meglehetősen előremutatók. Az elektromos meghajtáson alapuló repülőgép-konstrukciók ígéretesnek bizonyulnak arra, hogy a repülőgépek üzemeltetését a környezetileg fenntartható világ számára kívánatos módon alkalmassá tegyék. Következetes kutatási beruházások történtek és történnek a benne rejlő lehetőségek felszabadítására, kilátásba helyezve a környezetvédelmi célok teljesítését [29].

A tisztán elektromos energiát használó rendszerrel való kiváltást is egyelőre az akadályozza, hogy az ilyen irányt vett eljárások még fejlesztés alatt állnak, és az itt felmerülő legnagyobb probléma még mindig az akkumulátor alacsony energiasűrűsége és az erőforrások hatékony tárolása [37].

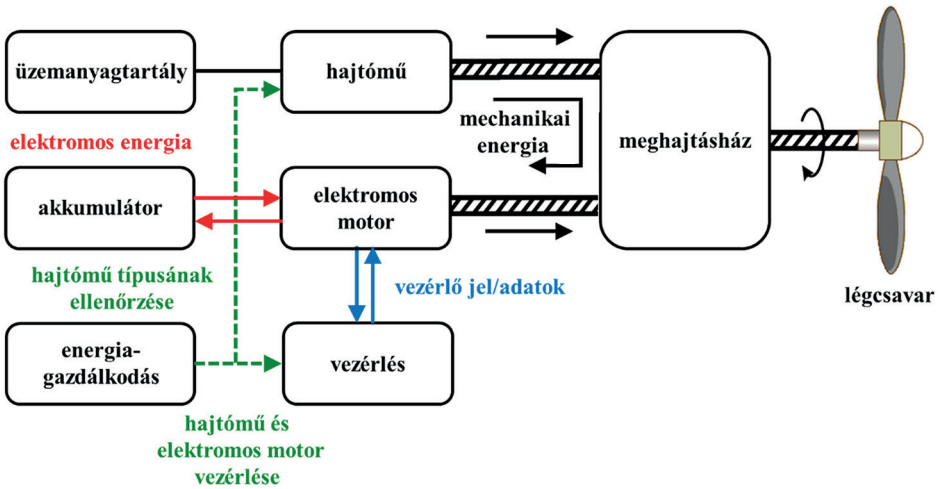
Az üzemanyag-meghajtó rendszerben a veszteség elsősorban a hajtóműből, a mechanikai veszteség pedig az áttételi szerkezet és a hajtótengely súrlódásából származik. A hibrid hajtásrendszerben a tényleges mechanikai veszteségek és hőveszteségek mellett magának a motornak is van bizonyos mértékű energiaveszteségе. Ugyanakkor az elektromos energia egy része elvész a motor és az akkumulátor közötti energiaátvitel során. A motor és a hozzá kapcsolódó mechanikai szerkezet növekedése elkerülhetetlenül többlet energiafelhasználással jár. Emellett nem elhanyagolható a hőveszteségből adódó súrlódás a rendszerben, a motorban és az elektromos energia átvitele során a vezetékekben sem [29], [37].

Mivel mind a két meghajtási mód kell ahhoz, hogy a szükséges paraméterek rendelkezésre álljanak, így olyan irányt vettek a korábbi fejlesztések, amelyek a kettő ötvözéséből hibrid meghajtási rendszer létrejöttét eredményezték. Vagyis az UAV-ban alkalmazott üzemanyag–elektromos hibrid meghajtási rendszer egy olyan repülőgép-meghajtási rendszer, amelyben az üzemanyagmotor és a generátor együttesen fejti ki a tolóerőt [37]. Általánosságban elmondható, hogy a hibrid szerkezetek nagyjából párhuzamos, soros, soros-párhuzamos és összetett struktúrákra oszthatók aszerint, hogy a motor közvetlenül biztosít-e tolóerőt.

4.1. Párhuzamos hibrid meghajtás

Ebben a rendszerben a belső égésű és a villanymotor/generátor együttes működése adja a szükséges tolóerőt [18]. Felépítését a 4. ábrán láthatjuk.

[5] Effective Perceived Noise in decibels. Az effektív érzékelt zaj decibelben vagy az effektív érzékelt zajszint (EPNL – Effective Perceived Noise Level) az egyes repülőgépek elhaladási eseményei relatív zajának mértéke. A repülőgép zajtanúsításához használják, és az egyes repülőgépekre vonatkozik, nem pedig a repülőtér zajterhelésére.



4. ábra
Párhuzamos hibrid meghajtás architektúrája (Békési Bertold [37] alapján)

A motor teljesítményétől függően (például túl magas) a rendszer a többletteljesítményt elektromos energiává alakítja a generátoron keresztül, és ezt az energiatárolóban tárolja. Ha a motor teljesítménye nem elegendő, az energiatároló eszköz elektromos energiát szabadít fel az elektromos motor meghajtására, hogy kompenzálja az elégtelen motorteljesítményt. Azaz ha a repülés során nagyobb teljesítmény szükséges, az energiatárolóban tárolt elektromos energiát felszabadítja, hogy kompenzálja a motor elégtelen teljesítményét. Ezzel tovább javítható az üzemanyag-ellátás hatékony működése és a rendelkezésre álló energia felhasználása. Ez az üzemmód tovább javíthatja az UAV meghajtórendszerének hatékonyságát az üzemanyag-fogyasztás csökkentése, valamint a repülésidő és a hatótávolság további javítása érdekében. Az energiagazdálkodási rendszer továbbá felügyeli a vezérlést, amely a belső égésű motort és villanymotort üzemelteti, ezzel kihasználva a rendszer azon tulajdonságát, amely a leghatékonyabb működtetést biztosítja ez által [24], [29], [37].

Természetesen ebben a felépítésben is jelen van az energiaveszteség, amely a rendszer komplexitásával növekszik. Ez lehet hő- és mechanikai veszteség, általában a motor esetében ezek a jellemzők. Ezek mellett az elektromos energia egy része is elvész az energiaátvitel során, illetve fontos tényező a súrlódások következtében fellépő energiaveszteség [21].

A [24] irodalom a MALE[6] UAV-kon vizsgálta a párhuzamos hibrid meghajtási rendszer megvalósítását. Azért volt érdekes vizsgálati eset, mert a repülőgépek ezen osztálya tekintetében egy viszonylag nagy teljesítményű elektromos gépre mindenképpen szükség van az olyan energiaigényes érzékelők, mint az EO/IR,[7] a szintetikus apertúrájú radar, a fényképalkotó érzékelő és távolságmérő, valamint a műholdas kommunikációs berendezések ellátásához. Az általuk használt hibrid elektromos meghajtórendszer speciális architektúrájának használatával arra

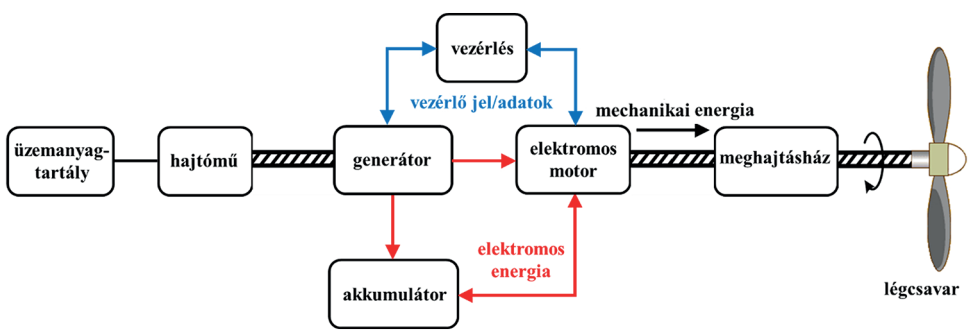
[6] Medium-altitude, long-endurance: Közepes repülési magasságú, hosszú repülési időtartamú.
[7] Electro-optic/infra-red: elektro-optikai/infravörös érzékelő.

a következtetésre jutottak, hogy csökkenthető a repülőgép maximális felszálló tömege (MTOM[8]) és a szükséges üzemanyag (vagy megnövelhető a küldetés hatótávolsága/repülési ideje). Egy másik fontos előny a repülőgép-biztonsági szint növelése a felszállás során. Végül kibocsátási szempontból a csökkentett belső égésű motor (ICE[9]) lényegében csökkenti a zaj- és infravörös kibocsátását, amely korlátozott ideig tovább csökkenthető, ha kikapcsolja az ICE-t és csak elektromos motort használ [24].

4.2. Soros hibrid meghajtás

A soros hibrid hajtásrendszer (5. ábra) legfontosabb jellemzője, hogy a motor nem közvetlenül biztosítja az UAV-hoz szükséges energiát (teljesítményt), hanem a generátort hajtja meg, amelynek segítségével a villanymotor már közvetlenül át tudja adni a kívánt tolóerőt egy mechanikus erőátviteli egységen keresztül [18].

Az alkalmazásban a villanymotor segítségével a légcsavar meghajtható, hogy a repülőgép indítási és leszállási szakaszában tolóerőt generáljon, amely csökkenti a turbinás hajtómű által termelt nitrogén-oxidokat a talaj közelében, így a gázturbina használható az elektromos motor meghajtására, hogy elektromos energiát állítson elő a nagy magasságban való utazás fázisában, ezzel is növelve a repülőgép hatótávolságát. Ezáltal javítható az energiafelhasználás hatékonysága, csökkenthető az üzemanyag-fogyasztás és csökkenthető az NOx-kibocsátás, ami a környezetvédelemben nagyon fontos [37].



5. ábra
Soros hibrid meghajtás (Békési Bertold [37] alapján)

Ezen túlmenően, mivel a gázturbinákat főként generátorok meghajtására használják az elektromos energia előállítására, és a repülőgépek teljesítménye pedig az elektromos motorokból származik, így a repülőgépek elosztott meghajtási rendszert is alkalmazhatnak, amely több tervezési lehetőséget biztosít az UAV-k aerodinamikai elrendezéséhez. Például a NASA N3-X UAV-ja hibrid meghajtási rendszert használ. A két szabadtengelyű gázturbinás hajtóműve

[8] Maximum Take-Off Mass: maximális felszálló tömeg.
[9] Internal Combustion Engine: belső égésű motor.

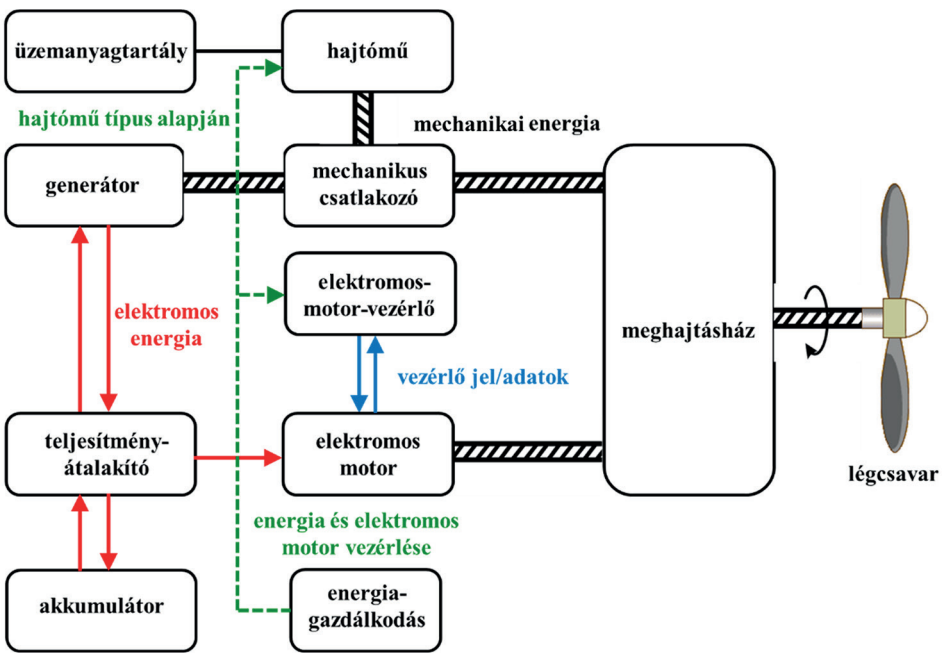
(turboshaft), amely két generátort hajt meg, és egy több villanymotorral hajtott meghajtási rendszerből áll [37].

Az architektúra új eleme a párhuzamos rendszerhez képest a generátor, amely megnöveli a maximális felszálló tömeget, illetve energiaveszteséget is generál a mechanikai energia villamos energiává alakítása során, ezek mellett pedig magasabb is az üzemanyag-fogyasztása [18].

A kutatások arra is rámutattak, hogy több soros elrendezés egyidejű, együttes használata is megengedett, sőt, a későbbiekben akár az utasszállító repülőgépek szállításába is integrálható az eljárás [38].

4.3. Soros-párhuzamos hibrid meghajtás

A 6. ábrán látható módon a soros-párhuzamos hibrid szerkezet egy soros és párhuzamos hibrid struktúrák fúziója, ahol az erőegység egy hajtóműből és egy villanymotorból tevődik össze [37].



6. ábra
Soros-párhuzamos hibrid meghajtás (Békési Bertold [37] alapján)

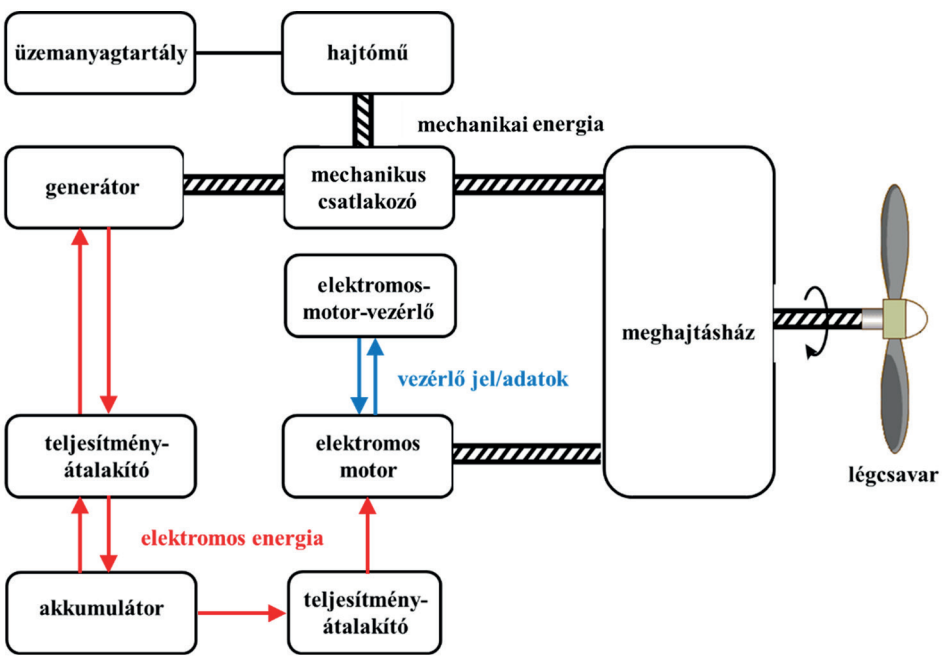
A hajtómű által termelt mechanikai energia részben az áttételházon (meghajtásházon) keresztül jut el a légcsavarhoz, míg a másik részt a generátor állítja elő az elektromos motor forgatásához, vagy az akkumulátorban tárolódik. A repülés során az elektromos motor és a hajtómű együttesen biztosítják az erőt a légcsavar forgatásához. Amikor az UAV kis sebességgel repül, a hibrid energiarendszer főként soros formában működik. Ha nagy sebességgel repül, a rendszer párhuzamos üzemmódban működik. Ezenkívül, amikor a drón aerodinamikai „fékező"

üzemmódban van, a generátor elektromos energiát termel, és azt az akkumulátorban tárolja. Ily módon az UAV soros-párhuzamos hibrid energiaellátó rendszer mind a soros, mind a párhuzamos szerkezetek előnyeit élvezheti. Az üzemállapot rugalmas beállítására való képessége lehetővé teszi az UAV számára, hogy alkalmazkodjon a bonyolult működési feltételekhez, és kifinomultabb energiagazdálkodási stratégiákkal dolgozzon. Ezért a soros-párhuzamos hibrid energiarendszer javíthatja az üzemanyag-felhasználás hatékonyságát, üzemanyagot takaríthat meg, és növelheti az UAV hatótávolságát [37].

A rendszer komplexitásából adódóan viszont nehézséget okozhat a lassú és kevésbé költséghatékony karbantartás, illetve a vezérlés összetettsége.

4.4. Komplex hibrid meghajtás

A generátor és az elektromos motor jobb vezérlése érdekében a soros-párhuzamos hibrid szerkezet alapján egy komplex hibrid szerkezetet terveztek, amelynek felépítését a 7. ábra mutatja. A soros-párhuzamos hibrid meghajtásszerkezet alapján a komplex hibrid szerkezethez egy teljesítményelektronikai átalakítót adtak hozzá, hogy az elektromos motor és a generátor külön vezérelhető legyen. Így pontosabb rendszerirányítás és további üzemanyag-megtakarítás érhető el [37].

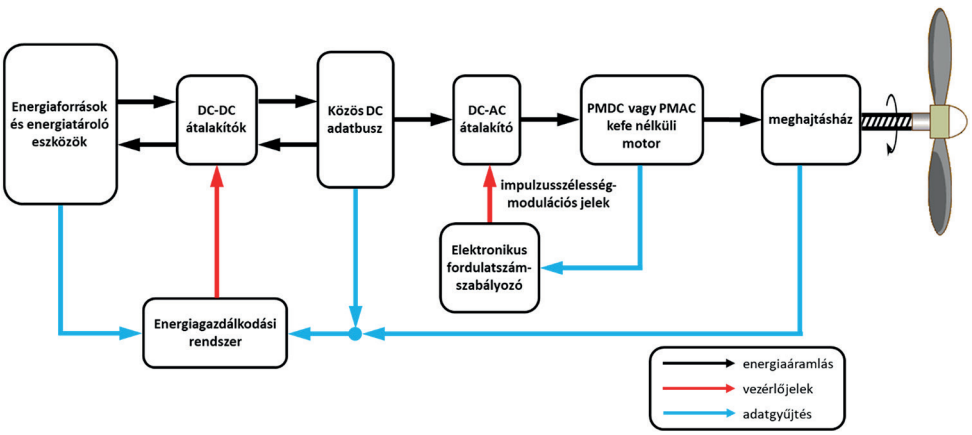


7. ábra
Komplex hibrid meghajtás (Békési Bertold [37] alapján)

5. Elektromos meghajtás

A már korábban bemutatott meghajtások kapcsán tárgyaltuk, hogy létezhet olyan architektúra is, amely tisztán elektromos energiát használ a tolóerő biztosítására. A fenti négy elrendezésben ez a fajta eljárás ugyan helyet kap, de önmagában nem képes akkora teljesítményt nyújtani, amely komolyabb célok elérése és a feladat végrehajtásának szempontjából elégséges lenne.

Ugyan folynak kísérletek és kutatások annak érdekében, hogy a közeljövőben kiemelt szerepet kaphassanak nemcsak civil, de ipari és katonai feladatok végrehajtásában is az ily módon meghajtott drónok, viszont az energiatároló eszközök alacsony energiasűrűsége a szükséges lépéseket még nem teszik lehetővé, kedvezőtlen arányt eredményez az eszköz tömege és a teljesítmény között. Az autóiparban ugyan megjelentek forradalmi eljárások, és az egy töltéssel megtehető útnak a hossza jelentősen megnövekedett, a repülési idő ilyen szintű megnövelésére és hasonló rendszer integrálására még várni kell, ám a hibrid meghajtás használata már jelentős kezdeti siker, és bebizonyosodott, hogy alacsony repülési sebesség és magasság esetén az elektromos meghajtás (8. ábra) kielégítő megoldásnak bizonyul [13], [37].



8. ábra
Elektromos meghajtású UAV-meghajtórendszer (Békési Bertold [19], [37] alapján)

Mindezek mellett figyelembe kell venni azokat a válaszokat, amelyeket a rendszer adhat a különböző környezeti hatásokra [32]. A rendszer jellege miatt az elektromágneses jelenségek csökkenthetik a megbízhatóságot, a vezérlés hatékonyságát. Ugyan a felépítés és az eljárás lehetőséget adnak a tervezési sokoldalúságra az elosztott rendszernek köszönhetően, így növelve a kedvező aerodinamikai tulajdonságokat, mégsem építhető meg olyan struktúra, amely általában ellenállna a legtöbb erőhatásnak [37].

Ami a tervezés és a karbantartás költségeit illeti, ebben az esetben ezek igen magasak. Egy akkumulátor megléte önmagában nem elég, szükséges redundáns elemek beépítése is, illetve a teljesítmény és az üzemidő növelésével ezeknek a száma arányosan nő.

Ahogyan az korábban látható volt a hibrid rendszerek esetében, az elektromos rendszer megléte elengedhetetlen, a költségek ellenére a karbantartása egyszerűbb, az energiaforrások

széles skálája pedig lehetővé teheti a későbbiekben, hogy igényeinknek megfelelően tetszőlegesen lehessen kialakítani a meghajtást.

6. Összefoglalás

A légi közlekedési ágazat jelentősen fejlődött a meghajtórendszer-technológia fejlesztésével, hogy a légi forgalom iránti keresletnövekedést és az üzemanyagárak ugrásszerű növekedését környezetvédelmi és gazdasági szempontból fenntartható módon kezelje. A légi közlekedési ágazat még nem érte el teljes növekedési potenciálját és piaci hatókörét – az Airbus és a Boeing előrejelzései szerint évi 4,8%-os növekedést várnak. A célok legfontosabb szempontjai az ágazatot energiahatékonyabbá, megbízhatóbbá tenni, valamint az emissziós és zajhatásokat csökkenteni. A kitűzött célok elérése érdekében számos technológiai lehetőséget vizsgálnak a repülőgépváz és a szerkezeti kialakítás, a meghajtási rendszer és a légiforgalmi irányítási rendszer fejlesztésére. Úgy vélik azonban, hogy a hagyományos technológia evolúciós fejlesztésével önmagukban nem érnék el az ilyen célokat. A kutatások és a környezeti hatások kezelése érdekében a gondolkodás a felé igazodik, hogy több elektromos energiát használjanak a meghajtórendszerben. A meghajtórendszer villamosítása ígéretes utakat kínál a működés energiahatékonyabbá, kevésbé szennyezővé és csendesebbé tételéhez [29].

Az elektromos energiaforrásokkal való kiegészítés lehetőséget ad a hajtóművek teljesítményének optimalizálására, amely egyébként a hagyományos kialakításban korlátozott. Az elektromos technológia számos egyedi tulajdonsággal is rendelkezik, amelyeket ki lehet használni az olyan újszerű meghajtási koncepciókból származó előnyök kihasználására, mint a hibrid-elektromos, elektromos meghajtású repülőgépek, az elosztott meghajtás (DP[10]), a határréteg-beviteli (BLI[11]) meghajtási koncepció, magas hőmérsékletű szupravezetők (HTS[12]) alkalmazása, a differenciál tolóerő-szabályozás és számos más fejlesztések [12], [29].

A tanulmány célja az volt, hogy röviden összefoglalja a tervezés korai szakaszában azt a három fő meghajtási irányt, amelyek a kívánt célok meghatározása után alapjául szolgálhatnak egy pilóta nélküli repülőeszköznek. Összevetve ezeket elmondható, hogy napjaink kihívásaira a legideálisabb megoldást egy olyan hibrid rendszer adhatja, amely hidat képez a repülés korai szakasza és a jövő potenciális megpróbáltatásai között. Láthattuk, hogy egy jól bevált alkalmazási forma a jelen kor követelményeinek már nem tud teljes egészében eleget tenni, még akkor sem, ha a hatásfoka a leginkább kedvező, de továbbra is olyan tulajdonságai vannak, amelyeket nem lehet egy lépésben kiváltani. Éppen ezért szükséges apránként beépíteni az új elemeket, és alkalmazni azokat mindaddig, amíg az újabb kutatások megoldást kínálhatnak a még fennálló akadályokra, és lehetővé teszik számunkra, hogy környezettudatosabban és gazdaságosabban tudjuk üzemeltetni a gyártást és az eszközeinket.

[10] DP – Distributed Propulsion: elosztott meghajtás.

[11] BLI – Boundary-Layer Ingestion: határréteg bevitel. A repülőgépek hatékonysága javításának egyik módja az, hogy csökkentsük a repülőgép saját hajtóműveinek használatát. A NASA Clevelandi Glenn Kutatóközpontjának mérnökei egy újfajta meghajtórendszert tesztelnek a határréteg bevitele elnevezésű elv alapján. Elemző tanulmányok kimutatták, hogy ez az új technológia potenciálisan akár 8,5%-kal is csökkentheti a repülőgép tüzelőanyag-elégetését a napjainkban használt repülőgépekhez képest [12]. A határréteg-beviteli (BLI) meghajtási koncepcióval a [20] irodalom foglalkozik részletesebben.

[12] HTS – High Temperature Superconducting: magas hőmérsékletű szupravezető.

Felhasznált irodalom

[1] S. I. Abdelmaksoud, M. Mailah, A. M. Abdallah, „Control Strategies and Novel Techniques for Autonomous Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicles: A Review," *IEEE Access,* 8. évf. pp. 195142–195169. 2020. Online: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031326

[2] V. Alulema et al., „Propulsion Sizing Correlations for Electrical and Fuel Powered Unmanned Aerial Vehicles," *Aerospace,* 2021, 8. évf. 7. sz. p. 171. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace8070171

[3] B. Békési, P. Koronváry, Are drones a boon or bane? *Scientific Research and Education in the Air Force – AFASES,* 19. évf. 1. sz. pp. 55–64. 2017. Online: https://doi.org/10.19062/2247-3173.2017.19.1.5

[4] Békési B., Juhász M., „Pilóta nélküli légijárművek energia forrásai," *Economica,* 7. évf. 1. sz. pp. 92–100. 2014. Online: https://doi.org/10.47282/ECONOMICA/2014/7/1/4311

[5] Békési B., Major G., A drónok konfigurációi, alkalmazási területei. in *Műszaki tudomány az észak-kelet magyarországi régióban 2022: Konferenciakiadvány.* Nyíregyházi Egyetem Páy G. szerk., Nyíregyháza, Nyíregyházi Egyetem, 2022. pp. 301–307.

[6] Békési B., Seres J., „Drónok alkalmazásának lehetőségei," *Repüléstudományi Közlemények,* 32. évf. 3. sz. pp. 5–19. 2020. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2020.3.1

[7] Békési B., Szegedi P., „Pilóta nélküli légijárművek – biztonság vagy fenyegetés," in *XV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia.* Mesterházy B. szerk., Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2016. pp. 130–141.

[8] Békési B., „Pilóta nélküli légijármű típusok sárkányszerkezeti megoldásai," in *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban,* Pokorádi L. szerk., Debrecen, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, 2013. pp. 122–132.

[9] Békési B., „Pilóta nélküli légijárművek jellemzése, osztályozásuk," in *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek,* Palik M. szerk., Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. pp. 65–109.

[10] Békési B., *UAV-k sárkányszerkezeti megoldásai.* Szolnoki Tudományos Közlemények 15., pp. 1–11. 2011.

[11] Békési L., Békési B., Merevszárnyú pilóta nélküli légijárművek (UAV-k). *Szolnoki Tudományos Közlemények,* 17., pp. 7–34. 2013.

[12] Békési, B., Sári, J., „A kriogenika felhasználhatósága a modern repülésben," *Repüléstudományi Közlemények,* 33. évf. 1. sz. pp. 137–156. 2021. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.11

[13] C. Yang et al., „Energy management of hybrid electric propulsion system: Recent progress and a flying car perspective under three-dimensional transportation networks," *Green Energy and Intelligent Transportation,* 2. évf. 1. sz. p. 100061. 2023. Online: https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100061

[14] Csóré A., Major G., „A pilóta nélküli légi járművek (UAV) evolúciója," *Repüléstudományi Közlemények,* 33. évf. 1. sz. pp. 171–191. 2021. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.13

[15] Békési B. et al., *Pilóta nélküli légijárművek: kategorizálás, fedélzeti hardver besorolás.* Kutatási jelentés, Szolnok, 2012.

[16] Gajdács L., Major G., „Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva," in *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III.,* Földi L. szerk., Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2022. pp. 101–120. Online: https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/static/pdfjs/web/viewer.html?file = https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/

bitstream/handle/20.500.12944/18470/06_Gajdacs_Laszlo-Major_Gabor_101-120.pdf?sequence = 1&isAllowed = y

[17] Hegedűs K., „A pilóta nélküli légijárművek hajtóműrendszerei," *Repüléstudományi Közlemények,* 28. évf. 1. sz. pp. 109–122. 2016. Online: https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4444

[18] D. Jimenez et al., „Evaluation of Series and Parallel Hybrid Propulsion Systems for UAVs Implementing Distributed Propulsion Architectures," *Aerospace,* 9. évf. 2. sz. p. 63. 2022. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace9020063

[19] D. Joshi, D. Deb, S. M. Muyeen, „Comprehensive Review on Electric Propulsion System of Unmanned Aerial Vehicles," *Frontiers Energy Research,* 10. évf. 752012. sz. 2022. Online: https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012

[20] K. Kafantaris, *Boundary Layer Ingestion Propulsion.* National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center, 2019. Online: www1.grc.nasa.gov/aeronautics/bli/

[21] O. Kose, T. Oktay, „Simultaneous quadrotor autopilot system and collective morphing system design," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology,* 92. évf. 7. sz. pp. 1093–1100. 2020. Online: https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2020-0026

[22] Major G., Etikus-e a drónok használata? *Honvédségi Szemle,* 144. évf. 2. sz. pp. 100–106. 2016. Online: https://kiadvany.magyarhonvedseg.hu/index.php/honvszemle/article/view/799/789

[23] Major G., „A pilóta nélküli légijármű rendszerek használata az elektronikai hadviselésben," *Repüléstudományi Közlemények,* 29. évf. 3. sz. pp. 301–315. 2017. Online: www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-22-0490_Major_Gabor.pdf

[24] M. Fioriti et al., „Design of hybrid electric heavy fuel MALE ISR UAV enabling technologies for military operations," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology,* 92. évf. 5. sz. pp. 745–755. 2020. Online: https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2019-0109

[25] R. Mikalsen, A. P. Roskilly, „A review of free-piston engine history and applications," *Applied Thermal Engineering,* 27. évf. 14–15. sz. pp. 2339–2352. 2007. Online: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.015

[26] Óvári Gy., Békési B., Fehér K., Az elektromos meghajtású repülés lehetőségei. in *XVIII. Természet-, Műszaki- és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia – 18th International Conference on Application of Natural-, Technological- and Economic Sciences,* Pozsgai A., Puskás J. szerk., Szombathely, ELTE Savaria Egyetemi Központ, 2020. pp. 23–33.

[27] K. L. Pham, et al., „The Study of Electrical Energy Power Supply System for UAVs Based on the Energy Storage Technology," *Aerospace,* 9. évf. 9. sz. p. 500. 2022. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace9090500

[28] A. Rango, et al., „Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management," *Journal of Applied Remote Sensing,* 3. évf. 1. sz. p. 033542. 2009. Online: https://doi.org/10.1117/1.3216822 DOI: https://doi.org/10.1117/1.3216822

[29] S. Sahoo, X. Zhao, K. Kyprianidis, „A Review of Concepts, Benefits, and Challenges for Future Electrical Propulsion-Based Aircraft," *Aerospace,* 7. évf. 4. sz. p. 44. 2020. Online: https://doi.org/10.3390/aerospace7040044

[30] Sánta I., *Repülőgép-hajtóművek I. (Gázturbinás hajtóművek).* Előadásvázlat, Budapest, 2009. Online: www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Tantargyak_anyagai/Repulogep_hajtomuvek_elm_I_BSc/HMU1_10506.pdf
[31] Sári, J., et al., „A mesterséges intelligencia alkalmazhatósága a modern kori repülésben," *Repüléstudományi Közlemények,* 33. évf. 1. sz. pp. 5–18. 2021. Online: https://doi.org/10.32560/rk.2021.1.1
[32] A.W. Schäfer et al., „Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft," *Nature Energy,* 4. évf. 2. sz. 2019. pp. 160–166. Online: https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-x
[33] H. Shakhatreh et al., „Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges," *IEEE Access,* 7. évf. pp. 48572–48634. 2019. Online: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530
[34] S. Kalantzakos, *Kína és a ritkaföldfémek geopolitikája.* Pallas Athéné Könyvkiadó Kft., 2019.
[35] M. Stewart, S. Martin, *Unmanned Aerial Vehicles: Fundamentals, Components, Mechanics, and Regulations.* Hauppauge, NY, Nova Science, 2020. Online: https://novapublishers.com/wp-content/uploads/2020/10/Unmanned-Aerial-Vehicles.pdf
[36] Varga B., *Gázturbinás hajtóművek teljesítmény és hatásfok növelésének műszaki technológiai háttere, és ezek hatása a katonai helikopterek korszerűsítésére.* Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola, 2013. Online: https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/static/pdfjs/web/viewer.html?file = https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/12292/Varga%20B%c3%a9la%20%c3%a9rtekez%c3%a9s.pdf?sequence = 14&isAllowed = y
[37] B. Zhang et al., Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies,* 15. évf. 2. sz. p. 455. 2022. Online: https://doi.org/10.3390/en15020455
[38] X. Zhang, „Distributed electric propulsion technology oriented to 2030," in *Proceedings of the 2nd China Aviation Science and Technology Conference,* Beijing, 2015. pp. 330–334.

Possible Drone Structures by Propulsion

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have emerged as critical platforms in various fields, including surveillance, reconnaissance, logistics and aerial photography. Propulsion systems play a crucial role in enabling UAVs to operate efficiently and reliably. The selection of the ideal propulsion system depends on a number of factors, such as mission requirements, flight duration, payload capacity and environment/environmental considerations. While internal combustion engines have dominated in the past, electric and hybrid systems are gaining ground due to their favourable characteristics. The continuous development of propulsion technology is promising and could enable the future production of more powerful, efficient and environmentally friendly UAVs. This summary provides an overview of the different propulsion systems used in UAVs, highlighting their main features, advantages and challenges.

Keywords: *UAV, propulsion, hybrid, configuration, architecture, structure*

Dr. Békési Bertold alezredes, egyetemi docens Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X	Bertold Békési, PhD Lieutenant Colonel, Associate Professor University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems bekesi.bertold@uni-nke.hu orcid.org/0000-0002-5709-789X
Knapiczius Attila BSc-hallgató Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék attila01.k@gmail.com orcid.org/0009-0001-4317-1120	Attila Knapiczius BSc Student University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems attila01.k@gmail.com orcid.org/0009-0001-4317-1120
Gajdács László százados, tanársegéd Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék gajdacs.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-2334-6859	László Gajdács, MSc Captain, Assistant Lecturer University of Public Service Faculty of Military Science and Officer Training Department of Aircraft Onboard Systems gajdacs.laszlo@uni-nke.hu orcid.org/0000-0003-2334-6859

A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Tartalom

Paulov Attila: *Az Operation Unified Protector a máltai légi navigációs szolgáltató szemszögéből* 5

Szilágyi Dávid, Szirocz ák Dávid, Fendrik Ármin: *Merevszárnyú drónok üzleti alkalmazásai Magyarországon* 19

Simon Sándor: *Pilóta nélküli légi járművek (típus) megfelelőségértékelésének és a légi járművek folyamatos légi alkalmassága fenntartásának hatása a légi közlekedés biztonságára* 35

Ripszám Dóra: *A magánszféra védelme a pilóta nélküli légi jármű alkalmazása során* 49

Schuster György: *A fejlesztésben használt szoftvermodellek alkalmazása és minősítése* 59

Schuster György: *Idősorok alkalmazása szoftvermegbízhatóság előrejelzésére* 71

Terpecz Gábor: *eVTOL légi járművek biztonsága* 81

Sándor Zsolt, Pusztai Máté: *A polgári pilóta nélküli légi járművek EU-s és hazai képzési rendszere* 101

Kiss Beatrix, Palik Mátyás: *A drónok katonai alkalmazása modern katonai műveletek során* 115

Dikácz Csaba: *Bombák Berlinre, 1940. június 7–8.* 131

Antal Péter, Péni Tamás, Tóth Roland: *Autonóm kvadkopterek modellezése, identifikációja és geometriai szabályozása agilis manőverezéshez* 141

Horváth Gábor: *A helyszíntől független katonai repülőtéri irányítás optikai rendszerének javasolt verifikációs kerete* 161

Dinh-Dung Nguyen, Utku Kale, Muhammed Safa Baş, Munevver Ugur, Tahir Hikmet Karakoc, Dániel Rohács: *Fundamental Elements of Drone Management Systems in Air Traffic Planning* 169

Varga Béla, Kavas László, Tóth József, Óvári Gyula: *Kriogén hajtóanyagok a polgári repülés területén* 185

Varga Péter János, Baross Márk Tamás, Wührl Tibor: *SDR mint lehetséges drónzavaró eszköz* 199

Szilvássy László: *H-47M2 „Kindzsal” repülőfedélzeti hiperszonikus rakéta* 211

Csató Péter: *A szintetikus tüzelőanyagok alkalmazásának kérdései a repülésben* 237

Békési Bertold, Gajdács László, Knapiczius Attila: *Drónok meghajtás szerinti lehetséges szerkezeti felépítései* 257